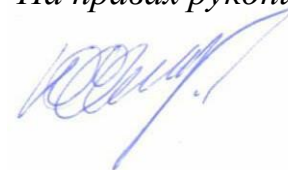


На правах рукописи



Козлова Юлия Сергеевна

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ
КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность,
(технические науки, отрасль энергетика)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре специальной электротехники автоматизированных систем и связи Академии ГПС МЧС России

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Крупин Михаил Владимирович

Официальные оппоненты: **Баширов Мусса Гумерович**
доктор технических наук, профессор
Филиал ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет» в г. Салавате,
кафедра «Электрооборудование и автоматика
промышленных предприятий», заведующий

Суворов Иван Флегонтович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Забайкальский государственный
университет», кафедра энергетики, профессор

Ведущая организация: **ФГБУ ВНИИПО МЧС России**

Защита состоится «22» февраля 2022 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/828/828d9a4e2182c7a32d932a6941dd37d9.pdf>

Автореферат разослан «22» декабря 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., профессор



Сивенков Андрей Борисович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Согласно статистическим данным ФГБУ ВНИИПО МЧС России, в Российской Федерации доля пожаров от теплового проявления электрического тока ежегодно составляет 20–35 %. Около 27 % от числа пожаров по электротехническим причинам составляют пожары, которые возникли от замыканий в воздушных электрических сетях.

В общей протяженности электрических сетей различных классов напряжений воздушные линии электропередачи (ВЛ) напряжением до 1000 В составляют более 30 %. Основная доля ВЛ до 1000 В приходится на обеспечение электрификации сельской местности, небольших городов, поселков. Для рассматриваемых линий характерны низкие показатели надежности, что связано со значительной степенью износа (более 50 % ВЛ отслужили свыше 35 лет) и нехваткой квалифицированного персонала.

Эксплуатация ВЛ осуществляется в широком диапазоне климатических факторов и сопровождается различными аварийными режимами, половина из которых связана с воздействием значительных ветровых нагрузок. Наиболее частыми аварийными режимами в указанных сетях являются короткие замыкания (более 60 %), возникающие, в основном, при схлестывании проводов и представляющие опасность образования источников зажигания – частиц расплавленного (горящего) металла. При этом возможно возгорание горючих веществ и материалов, находящихся в зоне разлета частиц.

В рассматриваемых линиях для защиты от коротких замыканий наиболее широко используют автоматические выключатели и плавкие предохранители, не гарантирующие недопущения образования источников зажигания по всей протяженности ВЛ.

Также, в соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок, при строительстве новых ВЛ, при реконструкции, ВЛ данного класса напряжения должны выполняться с использованием самонесущих изолированных проводов (СИП), что, по сути, может явиться решением проблемы образования источников зажигания при схлестывании. Однако темпы перехода на СИП очень низки, т.к. такое решение требует значительных временных и экономических затрат. Таким образом, ВЛ до 1000 В фактически продолжают эксплуатироваться в виде неизолированных проводов.

Иные способы исключения образования источников зажигания сводятся к предотвращению схлестываний проводов путем пространственного разнеса проводов в заданных пределах (дистанционные распорки различных типов), либо гашения возможных колебаний проводов (гасители). Перечисленные способы не нашли широкого применения ввиду различных недостатков, среди которых можно выделить дополнительные динамические нагрузки на провода, низкую электрическую и механическую прочность, подверженность гниению, возможное нарушение изоляции, конструктивную сложность и высокую стоимость изготовления.

Кроме того, следует отметить, что ни одно из перечисленных выше технических решений не учитывает влияния параметров короткого замыкания на образование источников зажигания. В то же время, пожарная опасность короткого замыкания (в частности, при схлестывании) зависит от ряда факторов, например, от величин тока и длительности короткого замыкания, площади поперечного сечения проводов, совокупное влияние которых до настоящего времени не описано и не определено математическими выражениями. Установление этих зависимостей необходимо для понимания того, какие участки сети являются незащищенными от образования источников зажигания при коротком замыкании, и, в случае необходимости, принятия соответствующих мер по повышению пожарной безопасности.

Таким образом, отсутствие методики оценки пожарной опасности коротких замыканий в ВЛ до 1000 В, а также выявленные недостатки существующих защит ВЛ обуславливают актуальность исследований, направленных на защиту ВЛ напряжением до 1000 В от образования источников зажигания при коротком замыкании, вызванном схлестыванием проводов, чему и посвящена настоящая работа.

Степень разработанности темы исследования. Проблеме снижения пожарной опасности электроустановок посвящено достаточно большое количество научных трудов, среди которых работы Г.И. Смелкова, А.И. Ревякина, В.Н. Черкасова, Г.В. Бокова, Н.П. Костарева.

Вопросами обеспечения пожарной безопасности сетей напряжением 0,4 кВ занимались также А.А. Сошников, А.С. Забиров, О.Н. Дробязко и др.

Результаты исследований пожарной опасности частиц металлов, образующихся при коротком замыкании, а именно: процесса горения этих частиц, их температуры и размеров, теплотворной способности, дальности разлета и др., были опубликованы в ряде трудов Г.И. Смелкова, А.А. Александрова и В.А. Пехотикова.

Однако, несмотря на проведенные исследования в данной области, задача обеспечения надлежащего уровня пожарной безопасности при эксплуатации ВЛ до 1000 В остается нерешенной.

Таким образом, **целью** работы является оценка пожарной опасности коротких замыканий в ВЛ напряжением до 1000 В.

Для достижения заявленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Разработать установку и методику экспериментального определения влияния параметров режима короткого замыкания (величин тока и длительности короткого замыкания, площади поперечного сечения провода) на образование частиц расплавленного металла.

2. Определить влияние указанных факторов (площади поперечного сечения провода, величины тока и длительности замыкания) на пожарную опасность коротких замыканий в ВЛ напряжением до 1000 В и экспериментально установить минимальные значения величин тока короткого замыкания для алюминиевых проводов различного сечения, при которых возможно образование источников зажигания.

3. Построить математическую модель для оценки пожарной опасности коротких замыканий в ВЛ напряжением до 1000 В.

Объект исследования – воздушные линии электропередачи напряжением до 1000 В.

Предмет исследования – параметры короткого замыкания (соотношения величин тока и длительности короткого замыкания для проводов различной площади поперечного сечения), влияющие на образование источников зажигания при схлестывании проводов ВЛ электропередачи напряжением до 1000 В.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана установка и методика экспериментального определения влияния параметров режима короткого замыкания проводов ВЛ на образование частиц расплавленного металла.

2. Впервые получены зависимости, характеризующие совокупное влияние величин тока и длительности короткого замыкания на пожарную опасность короткого замыкания в ВЛ напряжением до 1000 В, а также установлены минимальные значения токов короткого замыкания для проводов различного сечения, при которых образуются источники зажигания.

3. Разработан алгоритм и минимаксные поверхности, составляющие основу методики определения уровня пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В, позволяющей осуществлять оценку вероятности возникновения источников зажигания при коротком замыкании проводов.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что:

– получены зависимости, характеризующие совокупное влияние величин тока и длительности короткого замыкания на процесс образования источников зажигания для проводов различного сечения;

– разработана математическая модель для оценки пожарной опасности коротких замыканий проводов ВЛ напряжением до 1000 В.

Практическая значимость заключается в следующем:

– разработана экспериментальная установка с соответствующей ей методикой, применимая для дальнейших исследований пожарной опасности электроустановок;

– разработана методика оценки пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В;

– предложено устройство, обеспечивающее предотвращение образования источников зажигания при эксплуатации ВЛ электропередачи напряжением до 1000 В.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы математического моделирования, планирования эксперимента, теории подобия, теории нечетких множеств. Для исследований с применением аппарата нечеткой логики использован программный комплекс MathLab Simulink с пакетом расширения Fuzzy Logic. Экспериментальная часть включает в себя исследования на физической модели и последующую

обработку полученных данных в соответствии с законами математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Установка и методика для экспериментального исследования процесса образования капель расплавленного и раскаленного металла при коротком замыкании проводов ВЛ напряжением до 1000 В.

2. Результаты экспериментального исследования совокупного влияния величин тока и длительности короткого замыкания (для проводов различного сечения) на образование источников зажигания.

3. Математическая модель и методика для определения уровня пожарной опасности коротких замыканий в ВЛ напряжением до 1000 В.

4. Устройство, обеспечивающее предотвращение образования источников зажигания при эксплуатации ВЛ напряжением до 1000 В.

Степень достоверности результатов подтверждается корректным применением методов физического и математического эксперимента, теории подобия, применением для обработки полученных экспериментальных данных апробированных методов статистического анализа, а также внутренней непротиворечивостью результатов и их согласованностью с данными других исследователей.

Практическая реализация материалов диссертации:

– методика определения пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В используется в работе структурных подразделений ОАО «МРСК Урала – «Челябэнерго» для определения необходимости проведения профилактических мероприятий по предупреждению возгораний в охранной зоне ВЛ;

– методика определения пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В используется в работе Управления организации пожаротушения и проведения аварийно-спасательных работ Главного управления МЧС России по Челябинской области при оценке пожарной опасности территорий, где размещены данные сети;

– результаты исследований используются в учебном процессе Академии государственной противопожарной службы МЧС России, Южно-Уральского государственного университета при изучении дисциплины «Пожарная безопасность электроустановок».

Основные результаты работы докладывались и получили одобрение на 12 конференциях: LV Международной научно-практической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» (Южно-Уральский ГАУ, г. Челябинск, 2015), VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (ЮУрГУ, г. Челябинск, 2015), VIII международной научно-практической конференции «Перспективы развития науки и образования» (г. Душанбе, 2016), XX Юбилейном аспирантско-магистерском научном семинаре (г. Казань, 2016), V Всероссийской студенческой конференции (с международным участием) «Безопасность глазами молодежи» (г. Челябинск, 2019), Международной научно-практической конференции «Техносферная безопасность Байкальского

региона» (г. Чита, 2019), Международной научно-практической конференции «Перспектива развития науки и образования» (г. Душанбе, 2019), Национальной (Всероссийской) научной конференции «Современная аграрная наука: теория и практика» (г. Челябинск, 2020), на ежегодных научно-технических конференциях ЮУрГУ (НИУ) (г. Челябинск, 2015–2019 гг.), на еженедельных аспирантских семинарах кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ЮУрГУ (НИУ).

Публикации. Основные положения диссертационной работы отражены в 19 научных работах, из которых 3 статьи опубликованы в изданиях, входящих в «Перечень изданий, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертаций», получено 2 патента (1 на изобретение и 1 – на полезную модель).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (153 наименования). Содержит 138 страниц машинописного текста, в том числе 46 рисунков и 24 таблицы, 3 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования; сформулированы цель и задачи работы; обозначены объект и предмет исследования; изложена научная новизна основных положений диссертации, а также ее практическая значимость.

В первой главе «Анализ состояния вопроса обеспечения пожарной безопасности воздушных линий электропередачи» проведен анализ различных режимов эксплуатации ВЛ, выполненных неизолированными проводами, способных приводить к образованию источников зажигания (искр и капель расплавленного и раскаленного металла); дана общая характеристика пожарной опасности воздушных линий электропередачи при возникновении коротких замыканий; проведен краткий обзор методов и средств обеспечения пожарной безопасности электрических сетей, выполненных воздушными линиями; проанализированы существующие способы и средства предотвращения образования источников зажигания при схлестывании проводов воздушных линий электропередачи,

Наиболее распространенными аварийными режимами в сетях, содержащих ВЛ напряжением до 1000 В, являются короткие замыкания. Возникающие при этом токи могут явиться причиной образования источника зажигания. Известно, что при коротком замыкании проводников в месте контакта возникает переходное сопротивление, на котором выделяется значительное количество теплоты, представляемое как локальный тепловой удар, что ведет к чрезвычайно быстрому нагреву контактной зоны. Увеличение температуры приводит к возрастанию сопротивления металла, что, в свою очередь, увеличивает выделение теплоты. Скорость тепловыделения настолько высока, что теплота из зоны короткого замыкания

практически не передается в окружающую среду. В результате в зоне контакта существует высокая температура, близкая к температуре кипения металла (основной материал проводов ВЛ до 1000 В – алюминий, имеющий температуру плавления 660 °С, кипения – 2518,8 °С), что приводит к разбрызгиванию расплавленного металла, а также отгоранию жил или полному пережогу проводов. При этом, как свидетельствуют результаты исследований ВНИИПО, существует вероятность возгорания горючих веществ и материалов, находящихся в зоне разлета частиц расплавленного металла.

Способность частицы расплава выступать в качестве источника зажигания зависит от ряда параметров, например, геометрических размеров и массы частицы, удельной теплоемкости металла, коэффициента теплоотдачи, на которые, в свою очередь, влияют конструктивные особенности линии электропередачи, режимные параметры сети, а также факторы окружающей среды.

Для обеспечения пожарной безопасности при эксплуатации ВЛ необходимо установить закономерности образования источников зажигания: проанализировать влияние различных факторов (площади поперечного сечения, величин тока и длительности короткого замыкания) на процесс образования источников зажигания при замыкании проводов, определить минимальные значения тока и длительности короткого замыкания, при которых образуются источники зажигания; на основе этих закономерностей разработать математическую модель и соответствующую методику для оценки пожарной опасности при эксплуатации ВЛ, а также предложить устройство, обеспечивающее предотвращение образования источников зажигания при коротком замыкании, вызванном схлестыванием проводов, без отключения электроснабжения потребителей.

Во второй главе «Экспериментальные исследования влияния различных факторов на пожарную опасность коротких замыканий проводов воздушной линии электропередачи» проведен анализ существующих установок для моделирования коротких замыканий, на основе которого разработан лабораторный стенд с целью обеспечения определенных электрических условий, необходимых для имитации короткого замыкания с образованием частиц расплава в лабораторных условиях. Данный стенд, на который получен патент №191656 на полезную модель и принципиальная схема которого представлена на рисунке 1, позволяет исследовать влияние различных факторов на процесс образования частиц расплавленного металла в результате короткого замыкания (в частности, схлестывания проводов).

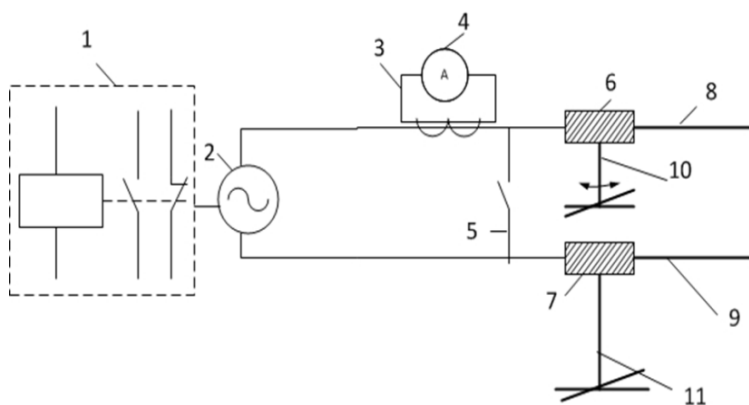


Рисунок 1 – Принципиальная схема лабораторного стенда:

- 1 – цепь управления;
- 2 – источник питания;
- 3 – трансформатор тока;
- 4 – амперметр;
- 5 – ключ для настройки экспериментального тока;
- 6 и 7 – изолирующие рукояти;
- 8 и 9 – исследуемые проводники;
- 10 и 11 – вертикальные стойки

Для определения последовательности действий при проведении исследований разработана методика эксперимента, включающая в себя следующие этапы.

1. Установление диапазона варьирования факторов.

2. Определение влияния каждого фактора на процесс образования капель расплавленного металла:

- величины тока короткого замыкания;
- длительности короткого замыкания;
- сечения провода.

3. Построение математической модели процесса образования пожароопасных частиц при замыкании проводов.

Диапазон варьирования величины тока короткого замыкания установлен на основе расчетных значений. Выбор нижней границы длительности существования замыкания осуществлен с учетом требований к срабатыванию электрической защиты, верхней – с учетом ограничения, связанного с разрушением провода при определенном времени замыкания. Для проведения эксперимента выбраны неизолированные алюминиевые провода, как наиболее широко применяемые в исследуемых сетях. Границы варьирования: минимальное – 25 мм^2 , максимальное – 70 мм^2 .

Эксперимент состоит из двух частей, каждая из которых включает несколько серий. В первой части исследуем влияние факторов на количество и размер образующихся частиц, во второй – при аналогичных значениях варьируемых факторов эксперимент проводим с горючей нагрузкой. Далее осуществляем сопоставление результатов двух частей эксперимента и устанавливаем размеры частиц, представляющих различную степень опасности с точки зрения возможности выступить в роли источника зажигания. Кроме того, выявляем влияние того или иного фактора на вероятность возникновения источника зажигания. Количество проводников для каждого эксперимента и общая выборка определены в соответствии с основными положениями математической статистики.

Количество образующихся в результате короткого замыкания частиц подсчитывалось для различных диапазонов диаметра: 0–1 мм – мелкие частицы, обладающие низкой зажигательной способностью, 1–3 мм – частицы,

размера которых достаточно для того, чтобы выступать в роли источника зажигания, 3 мм и более – частицы, при контакте с которыми существует высокая вероятность возгорания горючей среды (т.к. ВЛ до 1000 В распространены преимущественно в сельской местности, то в качестве горючей нагрузки принимались различные целлюлозные материалы: высушенная трава, солома, бумага).

Анализ полученных результатов (рисунки 2–4) показал, что при увеличении тока количество капель размером 0–1 мм значительно возрастает. Увеличение количества более крупных частиц также наблюдается с ростом тока замыкания, но носит менее интенсивный характер.

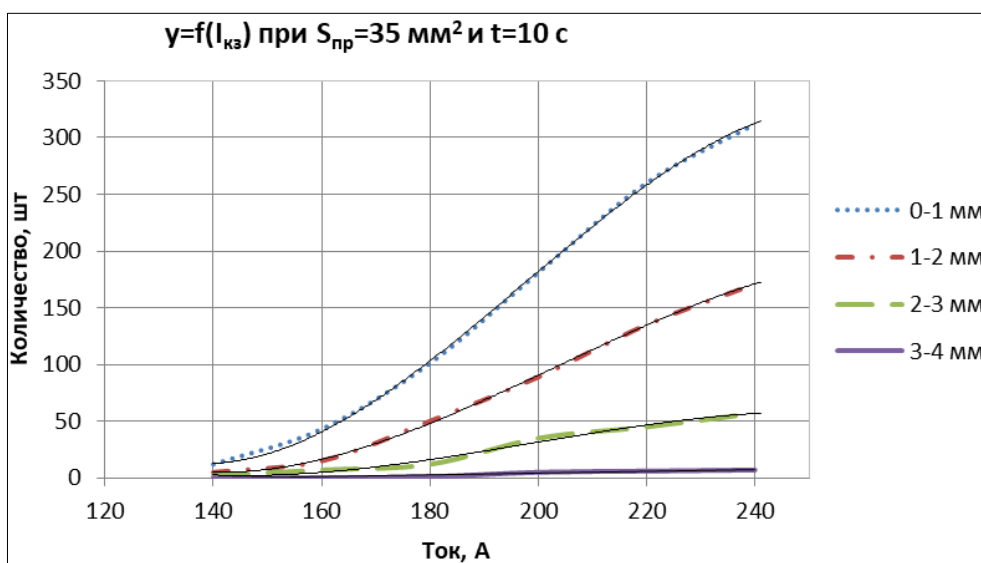


Рисунок 2 – Зависимости количества и размера капель от тока короткого замыкания

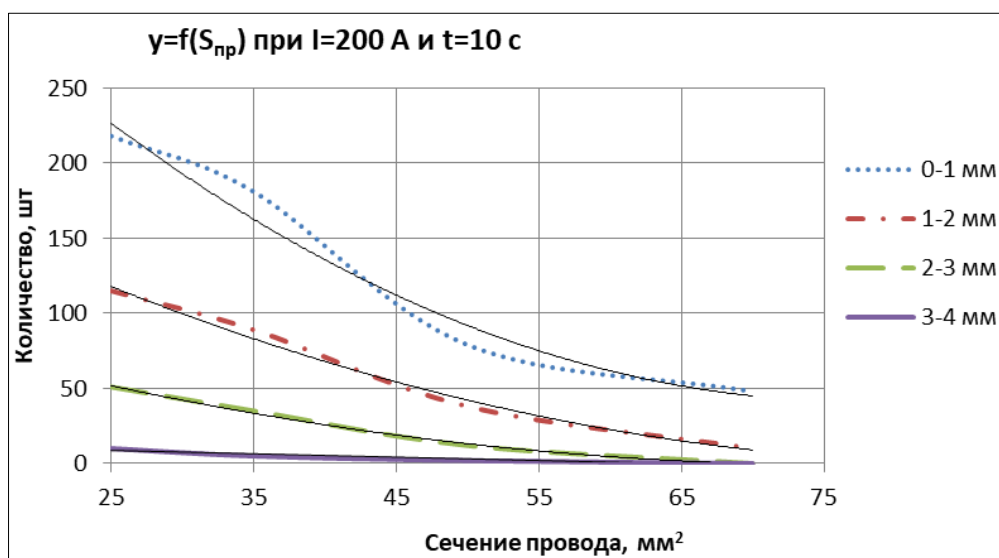


Рисунок 3 – Зависимости количества и размера капель от сечения провода

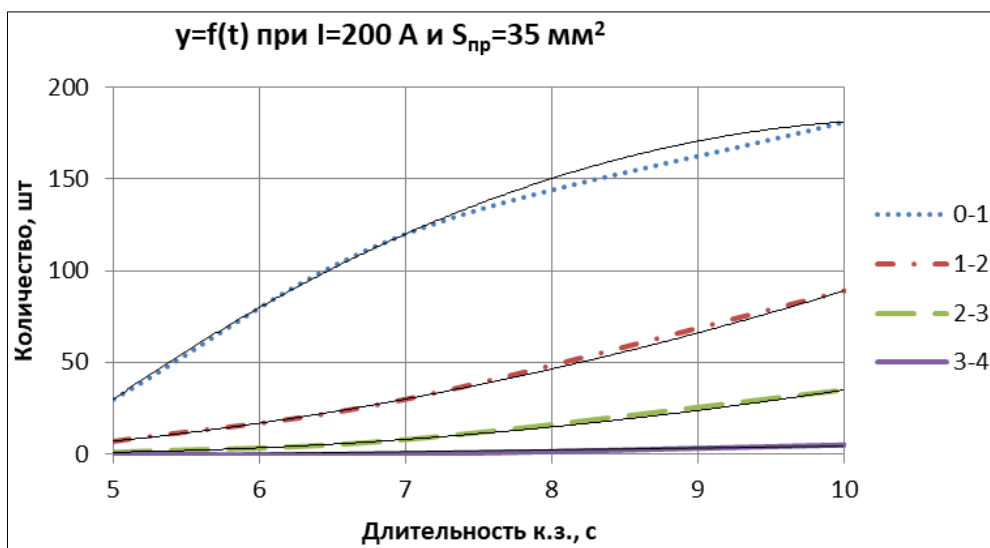


Рисунок 4 – Зависимости количества и размера капель от длительности короткого замыкания

Наличие капель крупного размера всегда позволяет делать вывод о большом количестве мелких частиц и капель среднего размера. При увеличении сечения проводника количество частиц уменьшается, а возрастание длительности существования замыкания приводит к росту числа частиц и их размера, что является очевидным.

Для получения оценки влияния нескольких факторов (величин тока и длительности короткого замыкания, а также площади поперечного сечения проводов) на возникновение источников зажигания использована теория планирования эксперимента. Математическая задача планирования эксперимента состоит в том, чтобы найти уравнение поверхности отклика, характеризующее влияние входных факторов на выходную величину.

Уравнение регрессии, полученное на основании результатов эксперимента, имеет вид:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_i x_j \dots, \quad (1)$$

где y – выборочная оценка функции отклика; x_i – факторы, которые варьируются при проведении эксперимента; b_{ij} , b_i – коэффициенты регрессии.

В качестве отклика принято количество пожароопасных частиц, управляемые факторы: ток и длительность короткого замыкания. Фактор «сечение провода» в полнофакторном эксперименте не учитывается, т.к. не представляется возможным подобрать сечение провода, которое соответствовало бы центру планирования для выбранного набора и диапазона факторов.

Условия проведения опытов записываются в виде матрицы планирования эксперимента, зависящей только от числа факторов и уровней каждого фактора (таблица 1). Для проводов различного сечения матрицы аналогичны.

Таблица 1 – Матрица эксперимента

	X1 (Ток к.з., А)		X2 (Длительность к.з., с)		X1X2 (Эффект взаимодействия двух факторов)	Y (Кол-во частиц)
	Кодированное значение	Физическое значение	Кодированное значение	Физическое значение		
1	+1	240	+1	10	+1	Y1
2	-1	140	+1	10	-1	Y2
3	+1	240	-1	5	-1	Y3
4	-1	140	-1	5	+1	Y4

Опыты проведены, в том числе в центре планирования эксперимента, для проводов каждого сечения. Результаты эксперимента (коэффициенты уравнений регрессии) сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения коэффициентов уравнения регрессии

	b_0	b_1	b_2	b_{12}
A-25	81,0	69,0	56,5	51,5
A-35	64,8	56,3	40,3	38,8
A-50	39,8	35,8	28,8	26,8
A-70	16,0	14,5	9,5	9,0

Коэффициенты при независимых переменных указывают на силу влияния факторов. Чем больше численная величина коэффициента, тем большее влияние оказывает фактор.

Переход от кодированных значений переменных к физическим осуществляется с помощью формулы (2):

$$x_i = \frac{x_{iH} - x_{i0}}{\lambda_i} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где x_i – кодированное значение i -го фактора; x_{iH} – физическое (натуральное) значение i -го фактора; x_{i0} – нулевое (центральное) значение i -го фактора; λ_i – интервал варьирования i -го фактора в физическом значении.

Уравнения регрессии в действительных переменных:

$$y_{A-25} = 236,4 - 1,71x_1 - 55,68x_2 + 0,412x_1x_2.$$

$$y_{A-35} = 171,05 - 1,2x_1 - 42,8x_2 + 0,31x_1x_2.$$

$$y_{A-50} = 122,6 - 0,89x_1 - 29,16x_2 + 0,214x_1x_2.$$

$$y_{A-70} = 35 - 0,25x_1 - 9,88x_2 + 0,072x_1x_2.$$

Таким образом, в работе впервые получены количественные оценки влияния указанных выше факторов на процесс образования капель расплавленного металла при коротком замыкании проводов ВЛ. При этом экспериментально определены граничные значения токов короткого замыкания, которые характеризуют различную степень вероятности инициирования зажигания.

В третьей главе «Математическая модель и методика определения пожарной опасности воздушных линий электропередачи» представлена методика оценки пожарной опасности короткого замыкания в ВЛ напряжением до 1000 В, основу которой составляют алгоритм и критерии определения уровня пожарной опасности, и также минимаксные поверхности, позволяющие осуществлять оценку вероятности возникновения источников зажигания при коротком замыкании проводов.

Определив вероятные значения токов короткого замыкания на различных участках ВЛ, а также учитывая эффективность срабатывания аппаратов защиты на этих участках, прогнозируется возможность возникновения источников зажигания (т.е. оценивается уровень пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В).

Уровень пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В выражается в единицах вероятности возникновения источника зажигания на i -м участке сети при том или ином сочетании величин тока и длительности короткого замыкания и характеризуется как: низкий – при вероятности до 0,1; средний – от 0,1 до 0,5; высокий – 0,5 и более. Полагая, что линия имеет провода одного и того же сечения по всей ее протяженности, необходимо установить ожидаемые значения величин тока и длительности короткого замыкания.

Длительность короткого замыкания зависит от того, насколько эффективно действует электрическая защита. На эффективность оказывают влияние правильный выбор и расстановка аппаратов защиты, а также их надежность. Для защиты ВЛ до 1000 В наиболее широко используются защиты, основанные на использовании плавких вставок и автоматических выключателей. Время срабатывания указанных аппаратов защиты определяется величиной токов однофазного короткого замыкания. Чем меньше номинальный ток плавкого предохранителя, тем больше предельная длина зоны защиты воздушной линии. При близких к трансформаторной подстанции повреждениях (до 50 м) кратности токов ОКЗ по отношению к номинальным токам защитных аппаратов велики (токи ОКЗ в 8–10 раз превышают номинальный ток аппаратов защиты), а время отключения ОКЗ не превышает 0,2–0,5 с. С учетом запаса по времени срабатывания защиты, время нагрева проводов на этом участке может быть принято 1,5 с. По мере удаления места повреждения от трансформаторной подстанции на расстояние более 50 м кратности токов ОКЗ уменьшаются, и время отключения может значительно превышать 5 с – величину, определяемую действующей редакцией ПУЭ как верхнюю нормируемую границу ($t_{\max}^{\text{норм}}$). Данные числовые значения используются для определения ожидаемой длительности короткого замыкания, соотносимой с условием (3) и используемой в качестве входной переменной, влияющей на уровень пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В.

$$t_{\text{окз}} = \begin{cases} t_{\text{бстрд}}, & \leq 1,5 \text{ с} \\ t_{\text{ср}}, & 1,5 < t < 5 \text{ с}, \\ t_{\text{отказ}}, & > 5 \text{ с} \end{cases} \quad (3)$$

где $t_{\text{быстр}} -$ быстрое срабатывание защиты; $t_{\text{ср}} -$ время срабатывания не превышает нормативного значения; $t_{\text{отказ}} -$ защита не обеспечивает отключение за требуемое время.

Результаты проведенных исследований показывают, что лишь в 3–5 % случаев токи короткого замыкания в исследуемых сетях инициируют работу предохранителей, обеспечивая отключение участка сети за нормируемый промежуток времени (не более 5 с на наиболее удаленном от трансформаторной подстанции участке сети). Предельная зона защиты, обеспечиваемая плавкими предохранителями (автоматическими выключателями), не превышает 250–350 м.

Таким образом, в рамках данной работы сделано допущение о том, что на участках ВЛ напряжением до 1000 В, находящихся в зоне защиты плавких предохранителей (автоматических выключателей), образование источников зажигания маловероятно, а длительность протекания токов короткого замыкания на незащищенном участке может превышать 5 с. Расчетные величины токов короткого замыкания (для ВЛ, используемых трансформаторы различной мощности, различные аппараты защиты) на незащищенных (пожароопасных) участках определили диапазон экспериментальных значений тока короткого замыкания.

Расчетные значения тока короткого замыкания могут быть отнесены к одному из токовых диапазонов, представляющих различную степень опасности образования источников зажигания. Условия (4) – (6) соответственно отражают диапазоны токов короткого замыкания, условно названные неопасным, пожароопасным и обладающим высокой пожарной опасностью:

$$I_{\text{н.о.}} = \begin{cases} < 120 \text{ A, } S_d = 25 \text{ мм}^2; \\ < 130 \text{ A, } S_d = 35 \text{ мм}^2; \\ < 160 \text{ A, } S_d = 50 \text{ мм}^2; \\ < 180 \text{ A, } S_d = 70 \text{ мм}^2. \end{cases} \quad (4)$$

$$I_{\text{п.о.}} = \begin{cases} 120 - 180 \text{ A, } S_d = 25 \text{ мм}^2; \\ 130 - 190 \text{ A, } S_d = 35 \text{ мм}^2; \\ 160 - 220 \text{ A, } S_d = 50 \text{ мм}^2; \\ 180 - 250 \text{ A, } S_d = 70 \text{ мм}^2. \end{cases} \quad (5)$$

$$I_{\text{в.п.о.}} = \begin{cases} > 180 \text{ A, } S_d = 25 \text{ мм}^2; \\ > 190 \text{ A, } S_d = 35 \text{ мм}^2; \\ > 220 \text{ A, } S_d = 50 \text{ мм}^2; \\ > 250 \text{ A, } S_d = 70 \text{ мм}^2. \end{cases} \quad (6)$$

где $I_{\text{н.о.}} -$ ток, при котором не образуется источников зажигания; $I_{\text{п.о.}} -$ ток, при котором вероятно образование источников зажигания; $I_{\text{в.п.о.}} -$ ток, при котором существует высокая вероятность образования источников зажигания.

Полученные величины токов короткого замыкания, в зависимости от длительности этого замыкания, будут характеризовать различный уровень пожарной опасности ВЛ (в рамках данной работы условно характеризуемый как низкий, средний или высокий).

Одним из признаков сложности построения модели уровня пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В является неопределенность в поведении системы-оригинала. Нечеткая модель системы-оригинала в первую очередь характеризуется неопределенностью типа нечеткости границы системы, а также отдельных ее состояний, входных и выходных воздействий. В таких случаях наиболее целесообразно воспользоваться специальными методами, ориентированными на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных. В таких ситуациях технология нечеткого моделирования является наиболее конструктивной.

Для оценки пожарной опасности ВЛ (связанной с возможностью возникновения источника зажигания при коротком замыкании проводов) с использованием основных законов нечеткой логики, реализованных в программном продукте Matlab, построена математическая модель и соответствующие ей трехмерные минимаксные поверхности, отражающие влияние величин тока и длительности короткого замыкания на исследуемый процесс образования источников зажигания.

В общем случае нечетким логическим выводом называется аппроксимация зависимости уровня пожарной опасности короткого замыкания в ВЛ y от воздействующих факторов x_n вида $y=f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ с помощью нечеткой базы знаний и операций над нечеткими множествами. Для определенного входного вектора факторов $X'=\{x'_1, x'_2, \dots, x'_n\}$ степень принадлежности нечетким термам d_j из базы знаний определяется системой нечетких логических уравнений (7):

$$\mu^d_j(X') = \bigvee_{p=1, k} \bigwedge_{i=1, n} [\mu^{jp}(x'_i)], \quad (7)$$

где \bigvee – операция максимума; \bigwedge – операция минимума; $\mu^{jp}(x'_i)$ – функция принадлежности фактора x_i нечеткому терму a_i^{jp} , $i=1, n$, $j = 1, m$, $p = 1, k_j$.

Нечеткое множество, отражающее уровень пожарной опасности ВЛ и соответствующее входному вектору воздействующих факторов X' , определяется выражением (8):

$$y = \bigcup_{j=1, m} \int_y^{\bar{y}} \min(\mu^{dj}(X'), \mu^{dj}(y)) / y, \quad (8)$$

где \bigcup – операция объединения нечетких множеств; $\mu^{dj}(y)$ – функция принадлежности уровня пожарной опасности короткого замыкания в ВЛ нечеткому терму d_j .

При описании переменных используются лингвистические переменные с соответствующими нечеткими множествами на заданной области определения.

Все этапы применения теории нечетких множеств для анализа уровня пожарной опасности ВЛ описаны на примере линии, выполненной неизолированными проводами марки А–25, в котором в качестве входных переменных используется величина тока короткого замыкания и быстродействие электрической защиты линии, в качестве выходной переменной – уровень пожарной опасности (вероятность возникновения источника зажигания при коротком замыкании проводов).

При формировании базы правил были использованы результаты, полученные в ходе проведения экспериментальных исследований влияния различных параметров на пожарную опасность воздушных линий.

Матрица правил (таблица 3) и сформированные на ее основе правила составляют основу системы нечеткого логического вывода.

Таблица 3 – Матрица правил для оценки уровня пожарной опасности воздушной линии электропередачи напряжением до 1000 В

Быстродействие защиты	Величина тока		
	Малая	Средняя	Высокая
Быстро сработала	Низкий	Низкий	Средний
Сработала	Низкий	Средний	Высокий
Отказ или превышение времени срабатывания	Средний	Высокий	Высокий

В таблице 4 представлены характеристики функций принадлежности. Диапазоны токов короткого замыкания связаны со значениями, при которых образуются частицы различных размеров, отличающиеся способностью инициировать зажигание (как указано ранее). Характеристика быстродействия защиты выбрана в соответствии с требованиями ПУЭ. Выражение уровня пожарной опасности ВЛ принято в единицах вероятности, отражающих количество возгораний, к которым привело воздействие определенного сочетания значений величин тока и длительности короткого замыкания.

Таблица 4 – Характеристика входных и выходных переменных

Наименование	Терм-множества	Тип функции принадлежности	Значения параметров функции принадлежности
Величина тока замыкания	Малая	Z	[0 120 140]
	Средняя	P	[120 150 170 180]
	Большая	S	[170 180 200]
Быстродействие защиты	Быстро сработала	Z	[0 1,5]
	Сработала	P	[1,5 3 5]
	Отказ или превышение времени срабатывания	S	[4 5 10]
Уровень пожарной опасности	Низкий	P	[0 1 2]
	Средний		[1 2 4 5]
	Высокий		[4 5 8 10]

На рисунке 5 приведена минимаксная поверхность, отображающая влияние входных переменных на значение выходной переменной «Уровень пожарной опасности».

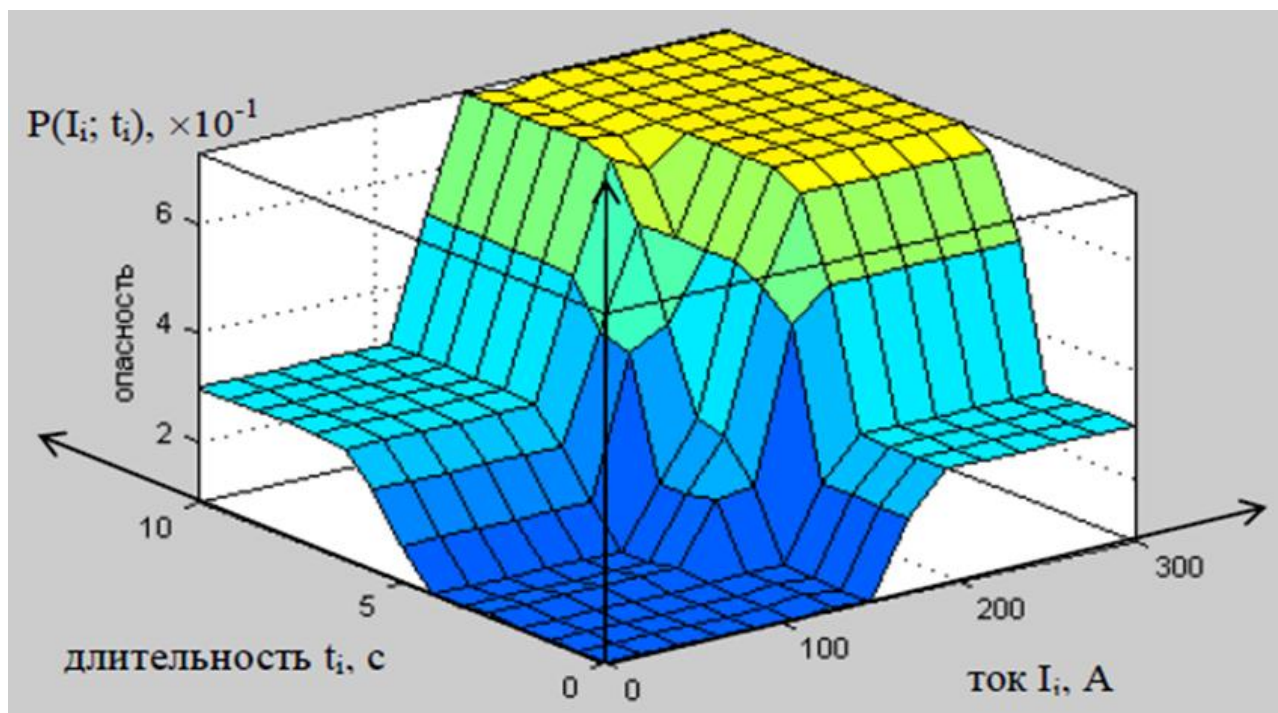


Рисунок 5 – Поверхность, отображающая влияние входных переменных на выходную переменную

Данная поверхность является результатом работы всех правил нечеткого вывода (при дефаззификации методом центра тяжести).

Область определения величины тока ограничена значением в 300 А, т.к. уже при значениях тока 260 – 280 А (для проводника сечением 70 мм²) образуются частицы с высокой зажигательной способностью.

Обобщая изложенное выше, уровень пожарной опасности воздушной линии электропередачи определим как функцию нескольких переменных:

$$F = f(I_{кз}; t_{кз}; S_d), \quad (9)$$

где F – уровень пожарной опасности; $I_{кз}$ – величина тока короткого замыкания, А; $t_{кз}$ – длительность короткого замыкания, с; S_d – сечение провода, мм².

Учитывая сформулированные критерии определения уровня пожарной опасности при коротком замыкании проводов ВЛ до 1000 В, зависимость (9) можно представить как:

$$F = \begin{cases} \text{низкий, } I_{\text{н.о.}} \text{ и } t \leq t_{\text{ср}} \\ \text{низкий, } I_{\text{п.о.}} \text{ и } t_{\text{бстрд}} \\ \text{средний, } I_{\text{н.о.}} \text{ и } t_{\text{отказ}} \\ \text{средний, } I_{\text{п.о.}} \text{ и } t_{\text{ср}} \\ \text{средний, } I_{\text{в.п.о.}} \text{ и } t_{\text{бстрд}} \\ \text{высокий, } I_{\text{п.о.}} \text{ и } t_{\text{отказ}} \\ \text{высокий, } I_{\text{в.п.о.}} \text{ и } t \geq t_{\text{ср}} \end{cases} . \quad (10)$$

Таким образом, возможность возникновения источников зажигания при эксплуатации ВЛ напряжением до 1000 В определяется по алгоритму, являющемуся основой методики оценки пожарной опасности ВЛ и изображенному на рисунке 6.

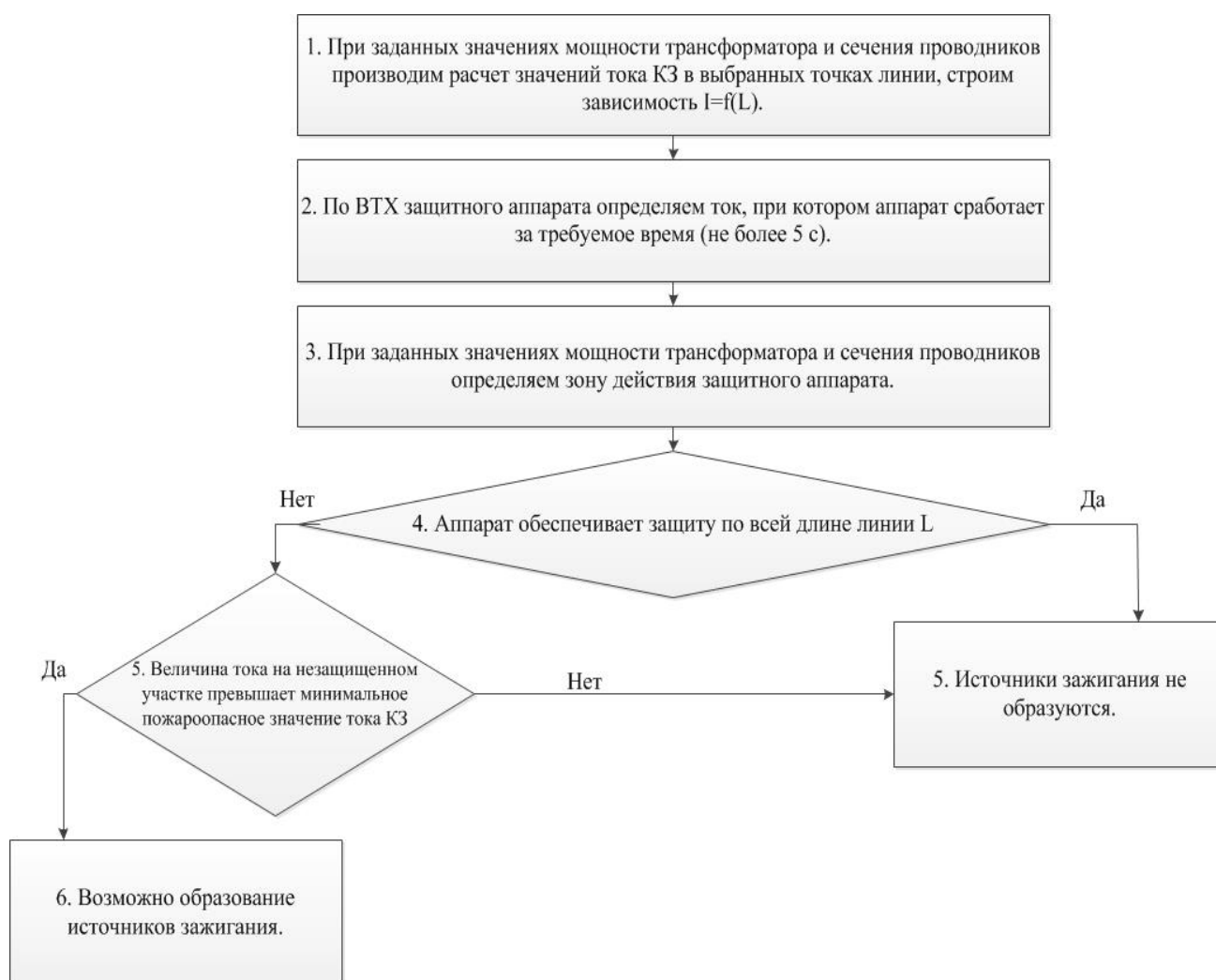


Рисунок 6 – Алгоритм определения возможности возникновения источников зажигания

Оценка пожарной опасности короткого замыкания сводится к определению возможности образования источников зажигания в соответствии со следующими этапами (графическая интерпретация представлена на рисунке 7):

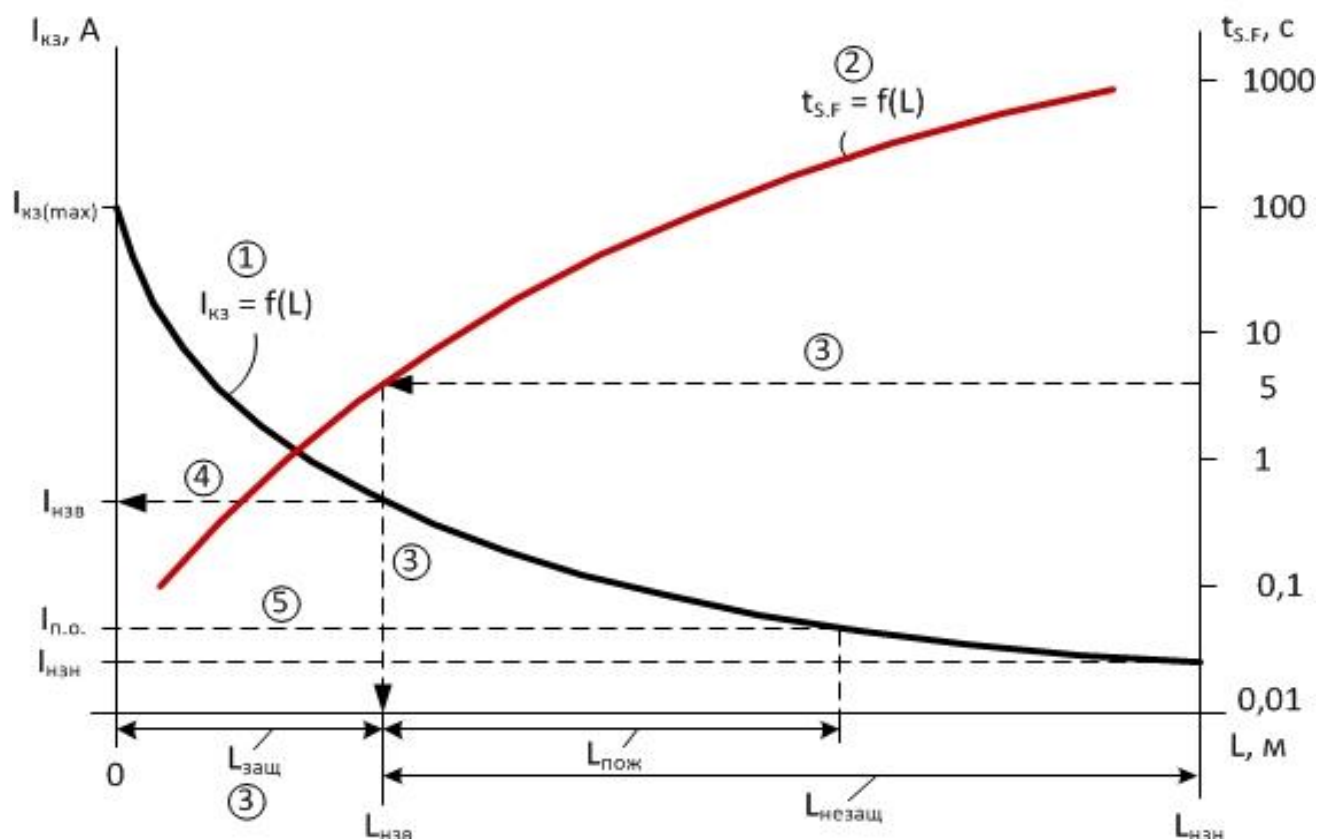


Рисунок 7 – Этапы оценки пожарной опасности короткого замыкания

1. Рассчитываются токи короткого замыкания в различных точках ВЛ. Строится график функции изменения величины тока от длины участка ВЛ между ТП и точкой замыкания ($I_{кз}=f(L)$).

2. По паспортным времятоковым характеристикам аппарата защиты ($t_{S,F} = f(I)$) и графику функции строится зависимость времени срабатывания от длины воздушной линии ($t_{S,F} = f(L)$).

3. По графику функции $t_{S,F} = f(L)$ определяется зона защиты ($L_{защ}$) аппарата, установленного в начале ВЛ, в которой обеспечивается время срабатывания не более 5 с.

4. Определяются граничные значения токов короткого замыкания ($I_{нзв}$ и $I_{нзн}$) в незащищенной зоне.

5. Значения токов короткого замыкания I_i в незащищенной зоне ($I_{нзн} \leq I_i \leq I_{нзв}$) сравниваются с величиной минимального пожароопасного значения тока $I_{п.о.}$. В случаях, когда $I_i \geq I_{п.о.}$, возможно образование источников зажигания. Следовательно, необходимо принять меры по предотвращению их образования.

Далее проанализированы факторы, влияющие на вероятность возникновения источников зажигания при схлестывании проводов, и на этой основе предложена функциональная схема устройства, обеспечивающего предотвращение образования источников зажигания.

Анализ факторов, превращающих схлестывание проводов в источник создания энергии воспламенения, позволил сделать вывод о том, что разработка устройства, предназначенного для обеспечения пожарной безопасности воздушных линий напряжением до 1000 В при схлестывании проводов, должна основываться на:

- непрерывном измерении скорости ветра в период повышенной пожарной опасности;
- измерении тока короткого замыкания;
- контроле времени существования короткого замыкания.

С учетом изложенного была разработана функциональная схема устройства, представленная на рисунке 8, на которое получен патент РФ №2740025 на изобретение.

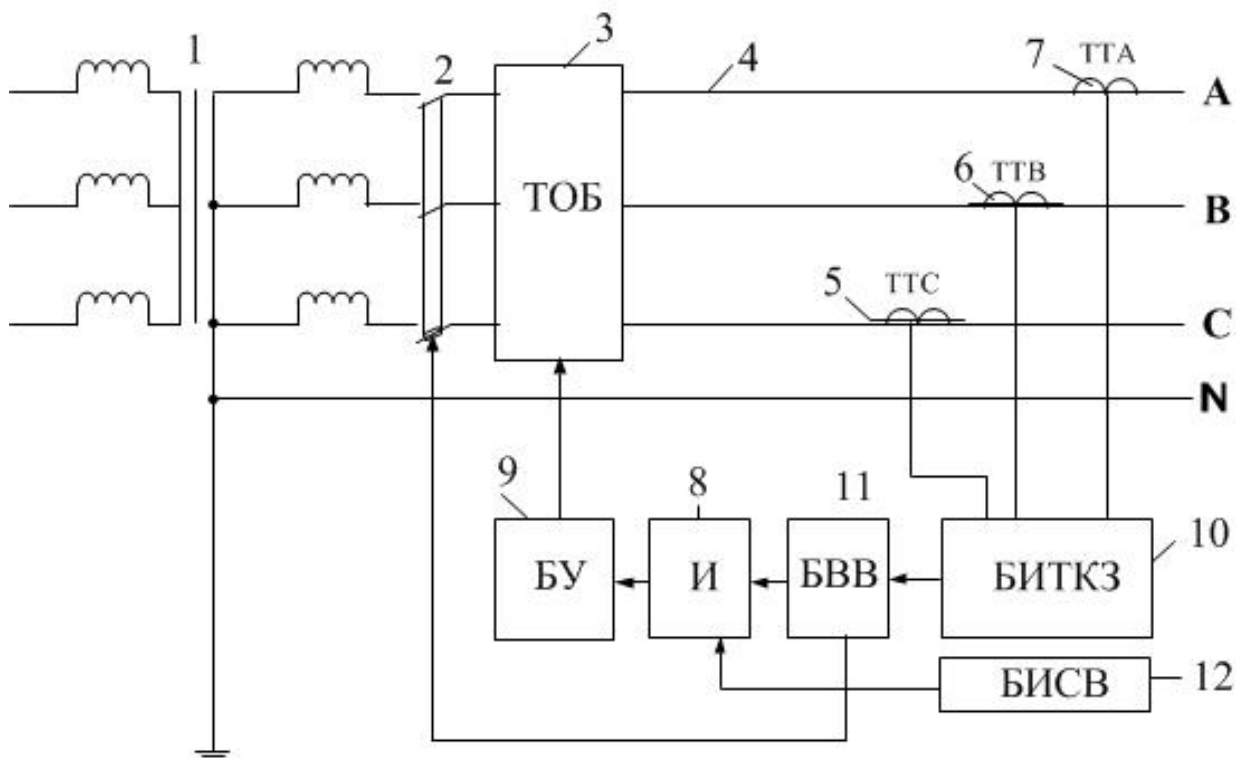


Рисунок 8 – Функциональная схема устройства обеспечения пожарной безопасности ВЛ при схлестывании проводов:

- 1 – питающий трансформатор; 2 – аппарат защиты (автоматический выключатель);
 3 – токоограничивающий блок; 4 – четырехпроводная трехфазная сеть;
 5–7 – трансформаторы тока; 8 – логический элемент «И»; 9 – блок управления; 10 – блок измерения тока короткого замыкания; 11 – блок выдержки времени; 12 – блок измерения скорости ветра

Токоограничивающий блок 3 предназначен для ограничения тока короткого замыкания без отключения электроснабжения потребителей. Ограничение тока происходит до величины (с учетом сечения фазных проводов), при которой не образуются источники зажигания.

Блок измерения токов короткого замыкания 10 осуществляет измерение величин этих токов.

Блок измерения скорости ветра 12 обеспечивает контроль величины этой скорости, и, если скорость ветра превысит определенную величину, на его выходе появляется логический сигнал, подаваемый на один из входов элемента «И» 8. При наличии на другом входе элемента «И» 8 сигнала от блока измерения токов короткого замыкания 10 на выходе элемента «И» 8 появляется логический сигнал, инициирующий (через блок управления 9) ограничение тока короткого замыкания. Блок управления 9 с учетом сечения фазных проводов, значения которых были введены при установке предлагаемого устройства на соответствующей линии, включает токоограничивающий блок 3, устанавливая при этом ток в линии, при котором не образуются источники зажигания.

Если на входе блока измерения токов короткого замыкания 10 через 5 с не исчезает сигнал (контроль времени осуществляет блок выдержки времени 11), то с выхода блока выдержки времени 11 поступает команда на отключение аппарата защиты 2 в начале линии.

Таким образом осуществляется работа устройства предотвращения возникновения источников зажигания при схлестывании проводов ВЛ электропередачи напряжением до 1000 В.

Заключение содержит констатацию основных научных и практических результатов работы.

В приложениях представлены: Методика оценки пожарной опасности ВЛ напряжением до 1000 В, копии патентов, акты внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе предложено новое решение в обеспечении пожарной безопасности ВЛ электропередачи напряжением до 1000 В при коротких замыканиях, вызванных схлестыванием проводов, состоящее в разработке методики оценки пожарной опасности ВЛ, связанной с образованием источников зажигания при коротких замыканиях, а также ставшее основой для разработки устройства, обеспечивающего предотвращение образования источников зажигания.

2. Разработана экспериментальная установка (патент РФ №191656 на полезную модель) и методика экспериментального определения влияния параметров режима короткого замыкания (величин тока и длительности короткого замыкания, площади поперечного сечения провода) на образование частиц расплавленного металла.

3. Впервые получены зависимости, характеризующие совокупное влияние величин тока и длительности короткого замыкания на процесс образования источников зажигания для алюминиевых проводов различного сечения, а также установлены минимальные значения токов короткого замыкания для проводов различного сечения, при которых уже образуются источники зажигания.

4. Предложены математическая модель и алгоритм определения вероятности возникновения источников зажигания при коротких замыканиях в ВЛ напряжением до 1000 В, что позволяет осуществлять оценку пожарной опасности этих ВЛ.

5. Разработано устройство, обеспечивающее предотвращение образования источников зажигания при схлестывании проводов ВЛ напряжением до 1000 В, на которое получен патент РФ №2740025 на изобретение.

Основные научные результаты работы отражены в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. Семенцова, Ю.С. Пожарная опасность схлестываний проводов воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ [Текст] / А.И. Сидоров, Ю.С. Семенцова // Безопасность жизнедеятельности. Секция «Пожарная безопасность». – 2017. – № 2. – С. 32–35.

2. Козлова, Ю.С. Определение количества капель расплавленного металла при однофазном коротком замыкании [Текст] / Ю.С. Козлова // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – №3 (14). – С. 28–31.

3. Козлова, Ю.С. Определение уровня пожарной опасности воздушных линий электропередачи напряжением до 1000 В [Текст] / В.И. Зыков, Ю.С. Козлова, М.В. Крупин // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2021. – №1. – С. 34–39.

Патенты по теме исследования:

4. Козлова, Ю.С. Экспериментальный стенд / Ю.С. Козлова, А.И. Сидоров, И.Н. Ишимов // Патент РФ на полезную модель №191656 МПК G01R 31/02, заявл.20.03.2019, опубл.15.08.2019.

5. Козлова, Ю.С. Устройство для предотвращения возникновения пожароопасных признаков и необоснованных отключений при схлестывании проводов воздушных линий электропередачи напряжением 380 В / Ю.С. Козлова, А.И. Сидоров, А.М. Ершов и др. // Патент РФ на изобретение №2740025 МПК H02H 5/10, H02G 1/02, заявл.15.06.2020, опубл.30.12.2020.

Остальные публикации по теме диссертации:

6. Семенцова, Ю.С. Анализ причин пожаров в электроустановках [Текст] / Ю.С. Семенцова // Электробезопасность. – 2015. – №3. С. 53–58.

7. Семенцова, Ю.С. О подходах к анализу статистических данных по причинам пожаров [Текст] / А.И. Сидоров, Ю.С. Семенцова, И.Ю. Питель и др. // Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: Сборник материалов VI-й Международной научно-практической конференции: в 2 т. /

под. ред. А.И. Сидорова – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – Т.2. – С. 190–193.

8. Семенцова, Ю.С. О причинах пожаров в распределительных электрических сетях [Текст] / Ю.С. Семенцова // Перспективы развития науки и образования: Сборник VIII международной научно-практической конференции. – Душанбе, 2016. – Ч. 1. – С. 94–96.

9. Семенцова, Ю.С. Пожарная опасность однофазных коротких замыканий воздушных линий электропередачи напряжением до 1000 В [Текст] / Ю.С. Семенцова // Сборник XX Юбилейного аспирантско-магистерского научного семинара, посвященного Дню энергетика. – Казань, 2016. – Т. 2. – С. 325–326.

10. Козлова, Ю.С. Применение теории планирования эксперимента для решения задач обеспечения пожарной безопасности воздушных линий электропередачи [Текст] / Ю.С. Козлова // Вестник науки и образования. – 2018. – №17 (53). – Ч. 1. – С. 32–34.

11. Козлова, Ю.С. Экспериментальная установка для исследования пожарной опасности процесса схлестывания проводов воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ [Текст] / Ю.С. Козлова // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: материалы IV Всероссийской студенческой конференции (с международным участием). Секция «Безопасность в чрезвычайных ситуациях». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2017. – С. 221–223.

12. Козлова, Ю.С. О влиянии рода тока на пожарную опасность электроустановок [Текст] / Ю.С. Козлова // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: Сборник материалов V Всероссийской студенческой конференции (с международным участием): в 2 т. / под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – Т. 2. – С. 179–180.

13. Козлова, Ю.С. Пожарная опасность короткого замыкания проводов воздушных линий электропередачи [Текст] / Ю.С. Козлова // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: Сборник материалов V Всероссийской студенческой конференции (с международным участием): в 2 т. / под ред. А.И. Сидорова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2019. – Т. 2. – С. 177–178.

14. Козлова, Ю.С. Обеспечение пожарной безопасности территорий, прилегающих к охранной зоне воздушных линий электропередачи [Текст] / А.И. Сидоров, Ю.С. Козлова // «Техносферная безопасность Байкальского региона»: Материалы международной научно-практической конференции / Забайкальский государственный университет. – Чита: ЗабГУ, 2019. – С. 42–45.

15. Козлова, Ю.С. О необходимости защиты от схлестываний проводов воздушных линий электропередачи [Текст] / Ю.С. Козлова // Перспектива развития науки и образования: Сборник материалов Международной научно-практической конференции – Душанбе, 2019. – Ч. 1. – С. 56–57.

16. Козлова, Ю.С. Основные направления повышения пожарной безопасности воздушных линий электропередачи напряжением 0,4 кВ [Текст] / Ю.С. Козлова, А.И. Сидоров // «Актуальные вопросы агроинженерных наук в

сфере энергетики агропромышленного комплекса: теория и практика: материалы национальной научной конференции Института агроинженерии». – Челябинск: ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ, 2020. – С. 88–93.

17. Козлова, Ю.С. Влияние различных факторов на пожарную опасность воздушных линий электропередачи [Текст] / Ю.С. Козлова, Г.А. Полунин // «Национальная безопасность России: актуальные аспекты»: Сборник избранных статей Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие», 2020. – С. 34–35.

18. Козлова, Ю.С. Нечеткие множества для анализа пожарной опасности воздушных линий электропередачи [Текст] / Ю.С. Козлова, Г.А. Полунин // «Национальная безопасность России: актуальные аспекты»: Сборник избранных статей Всероссийской научно-практической конференции. – СПб.: ГНИИ «Нацразвитие». 2020. – С. 35–36.

19. Козлова, Ю.С. Устройство для обеспечения пожарной безопасности при схлестывании проводов воздушных линий электропередачи напряжением до 1000 В [Текст] / Ю.С. Козлова // Актуальные проблемы обеспечения безопасности в Российской Федерации: Сборник материалов Дней науки с международным участием (1–4 июня 2021 г.). – Екатеринбург: Уральский институт ГПС МЧС России, 2021. – Ч. 1. – С. 113–115.

Подписано в печать 16.12.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 405.

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4