

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Ханис Владислав Андреевич

**СИСТЕМА ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И
ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ
НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ**

2.9.3. Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация
(технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Беспалько Сергей Валерьевич

МОСКВА 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 КРАТКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА.....	12
1.1 Анализ состояния пожарной безопасности и причин возникновения пожаров на пассажирском железнодорожном транспорте	12
1.2 Обзор конструктивных особенностей электрооборудования пассажирского вагона	17
1.2.1 Анализ систем электроснабжения и электрооборудования пассажирского вагона подвижного состава	17
1.2.2 Обзор пожароопасных узлов и причин возгораний электрооборудования пассажирского вагона	28
1.3 Обзор и исследование методов обнаружения, диагностики, контроля и предупреждения пожароопасных состояний в элементах электрических сетей и электрооборудования	31
1.4 Сущность предлагаемого подхода	47
1.5 Выводы по разделу 1	50
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	52
2.1 Метод и модель обнаружения оптического излучения (оптической вспышки) искрового разряда по интенсивности излучения в видимом диапазоне длин волн на фоне нестационарных оптических помех	53

2.2 Метод и модель определения текущей температуры в контролируемой области электропроводки на основе анализа спектра теплового излучения инфракрасного диапазона длин волн	62
2.3 Выводы по разделу 2	72
3 СТРУКТУРНАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	73
3.1 Обзор и выбор типов датчиков для получения достоверной текущей информации о степени пожароопасности электрических сетей пассажирского вагона	73
3.2 Разработка функциональной схемы системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов	77
3.3 Разработка и обоснование структурной схемы системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов.....	82
3.4 Разработка алгоритмов функционирования системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов.....	89
3.5 Разработка технического облика системы диагностики и раннего предупреждения пожароопасных состояний в вагонах пассажирского подвижного состава	93
3.6 Выводы по разделу 3	99
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УЗЛОВ И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ	101

4.1 Исследования функционирования системы методом численного эксперимента и результаты численных расчетов алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов по интенсивности в видимом диапазоне длин волн.....	101
4.2 Результаты численных расчетов оценки пожароопасности электропроводки по спектральному составу в инфракрасном диапазоне длин волн.....	103
4.3 Описание программной реализации численной модели фотодетектора оптического излучения в электрический сигнал	104
4.4 Методика оценки вероятности возникновения пожаров на основе мониторинга пожароопасных состояний электрооборудования пассажирских вагонов	107
4.5 Численное моделирование функционирования системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрооборудования пассажирских вагонов.....	109
4.6 Выводы по разделу 4	123
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	124
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	127
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ А	147
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	152

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Пожары из-за неисправности электрических сетей на подвижном составе железнодорожного пассажирского транспорта даже при относительно небольшом масштабе могут приводить к значительному материальному ущербу и гибели людей. В системах защиты электрических сетей пассажирских вагонов реагирование, как правило, начинается при выходе параметров сети за пределы допустимых значений и (или) при возникновении возгорания, что, как показывает практика, не в полной мере обеспечивает пожаробезопасность вагонов. Основным недостатком общепринятых подходов к оценке риска пожара соответствующих программных и технических средств является то, что подавляющее их большинство рассчитано на реакцию по уже сформировавшейся ситуации реальной пожароопасности. Таким образом, значительным недостатком существующих технических средств защиты электрических сетей вагонов является то, что их подавляющее большинство рассчитано на реакцию на конечной стадии развития опасной ситуации.

В настоящее время в пассажирских вагонах практически отсутствуют системы ранней защиты электрических сетей от возникновения пожароопасных состояний. Под ранней защитой понимается выявление (мониторинг) и принятие контрмер в отношении потенциально пожароопасных неисправностей электрических сетей, при которых параметры сетей находятся в допустимых для эксплуатации диапазонах. Примерами таких неисправностей являются первоначально незначительные нарушения электрических контактов и изоляции проводов, которые, однако, со временем усиливаются и могут привести в определенный момент времени к резкому нагреву (в том числе из-за возникновения электрической дуги) и возгоранию материалов окружающей среды. В связи с этим представляется актуальным создание и внедрение в системы защиты электрических сетей пассажирских вагонов еще одного уровня

защиты на основе мониторинга и раннего выявления потенциально пожароопасных неисправностей электрических сетей. В этом случае становится возможным заблаговременное устранение неисправностей и предотвращение возгораний. Количественная оценка пожароопасных состояний в виде вероятности возгорания на определенном интервале времени позволяет ранжировать пожароопасные состояния по степени опасности и сигнализировать о необходимости немедленного или отложенного на некоторое время устранения неисправностей. В случае возгораний в пассажирских вагонах представляется эффективным дополнительно к системам защиты и пожаротушения использовать мониторинг и диагностику пожароопасных состояний электрических сетей, позволяющих принимать предупредительные меры до возникновения возгораний. Таким образом, исследования по разработке средств защиты и оценке риска возникновения пожароопасных состояний на подвижном составе железнодорожного пассажирского транспорта являются актуальной научной задачей, решение которой позволит обоснованно уменьшить риск их возникновения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам совершенствования методов и устройств предупреждения пожаров посвящены работы Королёва И. С., Кривова Ю. Н., Мкртумова А. С., Бурмаки А. А., Казакова С. В., Темникова А. Г. и других ученых.

Значительный вклад в обеспечение пожарной безопасности на железнодорожном транспорте внесли ученые Филиппов В.И., Петров Г.И., Беспалько С.В., Пономарев В.М., Шебеко Ю.Н., Навценя В.Ю., Никитин А.В., Гаранжа И. В., Ряховский В.И. и др.

Вопросы разработки средств диагностики и раннего предупреждения о рисках пожароопасных состояний в электрических сетях подвижного состава были решены в известных работах недостаточно полно, что обусловлено использованием в большинстве из них признаков, связанных с динамикой поведения электрических параметров сетей. В связи с этим представляется перспективным новый подход, заключающийся в использовании оптических

эффектов, возникающих при наличии неисправностей в виде слабых искровых разрядов, нагрева в области повреждения изоляции и т.п. При этом сбор оптических данных может осуществляться на основе высокоразвитой элементной базы волоконно-оптических линий связи (оптоволокна, фотодетекторы, циркуляторы, спектральные фильтры).

Цель и задачи диссертационной работы. Целью диссертации является повышение эффективности защиты электрических сетей пассажирских вагонов от возникновения неисправностей и пожароопасных состояний, сокращение времени ранней диагностики возникновения риска пожароопасной ситуации в электрических сетях пассажирского вагона на основе использования оптических признаков и применения волоконно-оптических систем.

Для достижения цели исследования в диссертационной работе были поставлены и решены следующие задачи:

- проведён системный анализ возможностей существующих систем защиты электрических сетей, средств контроля, сигнализации, управления и автоматического обнаружения пожаров, систем диагностики электрооборудования, систем энергоснабжения и электрооборудования пассажирских вагонов подвижного состава, моделей, методов, алгоритмов и методик оценки и предупреждения о пожароопасных состояниях электрических сетей;

- разработана и исследована совокупность взаимосвязанных моделей раннего обнаружения потенциально опасных неисправностей в электрических сетях пассажирских вагонов на основе применения волоконно-оптических датчиков;

- разработаны методы раннего обнаружения и оценки рисков возникновения пожаров в критических элементах электросетей пассажирских вагонов (искровых и микродуговых разрядов, точек повышенного нагрева изоляции) по сопутствующим им оптическим излучениям видимого и инфракрасного диапазонов;

- разработана структурно-функциональная организация системы защиты электрических сетей пассажирских вагонов на основе мониторинга и раннего выявления потенциально пожароопасных узлов электрических сетей и электрооборудования;
- разработаны алгоритмы функционирования волоконно-оптических датчиков для раннего обнаружения потенциально опасных неисправностей в электрических сетях;
- разработаны практические рекомендации обнаружения возгораний в электрических сетях пассажирского вагона.

Научная новизна работы. Научная новизна выполненных исследований состоит в следующем:

- впервые разработаны методы и модели раннего обнаружения и оценки рисков возникновения пожаров в критических элементах электросетей пассажирских вагонов (искровых и микродуговых разрядов, точек повышенного нагрева изоляции) по сопутствующим им оптическим излучениям видимого и инфракрасного диапазонов;
- предложена и реализована структурно-функциональная организация системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов на основе волоконно-оптических датчиков, позволяющая повысить оперативность контроля и мониторинга состояний пожароопасности электрических сетей пассажирских вагонов, отличающаяся двухуровневой многоканальной структурой регистрации и обработки контролируемых параметров оптического и теплового излучений;
- разработана методика оценки рисков возникновения пожаров в критических элементах электросетей пассажирских вагонов;
- дано научное обоснование практических рекомендаций по применению методики оценки рисков возникновения пожаров в критических элементах электросетей пассажирских вагонов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Представленные научные результаты, выводы и предложения развивают существующую систему

предупреждения пожаров на железнодорожном подвижном составе. Разработаны методы и модели оценки и мониторинга пожароопасных состояний в элементах электрических цепей пассажирского вагона на основе волоконно-оптического датчика. Предложена система мониторинга пожароопасных состояний электрических сетей пассажирского вагона на основе волоконно-оптического датчика. Разработаны функциональная и структурная схемы системы мониторинга пожароопасных состояний электрических сетей. Составлен алгоритм функционирования системы и разработано программное обеспечение обработки данных, передаваемых в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

Результаты исследований могут использоваться при проектировании электросетей пассажирских вагонов и разработке систем защиты от пожароопасных состояний. Также результаты используются в учебном процессе на кафедре «Вагоны и вагонное хозяйство» РУТ (МИИТ) при подготовке специалистов по направлению «Подвижной состав».

Методология и методы исследования. Выполнение цели исследования и решение поставленных задач осуществлялось с использованием следующих методов:

- метода системного анализа - при обзоре конструктивных особенностей и повреждаемости электрооборудования пассажирского вагона (раздел 1);
- метода математического моделирования - при разработке моделей обнаружения оптического излучения искрового разряда по интенсивности излучения и определения текущей температуры в контролируемой области электропроводки на основе анализа спектра теплового излучения (раздел 2);
- методов автоматического управления и эффективности целенаправленных процессов - при разработке функциональной и структурной схем системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов (раздел 3);
- структурного метода - при разработке алгоритмов функционирования системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей

пассажирских вагонов (раздел 3);

- методов модельного эксперимента, имитационного и численного моделирования – при проведении исследования функционирования системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрооборудования пассажирского вагона на основе предложенных и реализованных математических моделей (раздел 4);

- метода исследования операций – при разработке программы для имитационного моделирования случайных искровых разрядов в элементе электрооборудования пассажирского вагона (раздел 4).

Положения, выносимые на защиту.

1 Модели раннего обнаружения потенциально опасных неисправностей в электрических сетях пассажирских вагонов на основе применения волоконно-оптических датчиков.

2 Метод оценки пожароопасности электрических сетей пассажирских вагонов по интенсивности излучения в видимом диапазоне длин волн на фоне нестационарных оптических помех и метод определения текущей температуры в контролируемой области электропроводки по анализу спектра теплового излучения инфракрасного диапазона длин волн.

3 Структурно-функциональная организация системы защиты электрических сетей пассажирских вагонов на основе мониторинга и раннего выявления потенциально пожароопасных узлов электрических сетей и электрооборудования.

4 Алгоритмы функционирования волоконно-оптических датчиков для раннего обнаружения потенциально опасных неисправностей в электрических сетях.

5 Методика оценки текущих пожароопасных состояний электрических сетей пассажирских вагонов.

6 Практические рекомендации по оценке текущих пожароопасных состояний электрических сетей пассажирских вагонов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается применением современных,

апробированных и соответствующих цели и задачам настоящей работы методов исследования. Достоверность аналитических моделей подтверждена результатами численных экспериментов.

Материалы диссертации апробировались на:

- I Международной научной конференции аспирантов и молодых учёных «Железная дорога: путь в будущее», г. Москва (2022 г.);
- XXVI Всероссийской научно-практической конференции КриЖТ ИрГУПС «Молодёжная наука», г. Красноярск (2022 г.);
- Международной студенческой научно-практической конференции «Актуальные вопросы эксплуатации подвижного состава в современных условиях», г. Нижний Новгород (2021 г.);
- Международной научно-практической конференции «Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология», г. Якутск (2021 г.);
- XXIX Международном конкурсе научно-исследовательских работ «Всероссийского Общества Научных разработок «ОНР ПТСАЙНС», г. Москва (2020 г.);
- II Международной научно-практической конференции «Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология», г. Якутск (2020 г.);
- IV Всероссийской научно-практической конференции «Образование - Наука - Производство», г. Чита (2020 г.);
- 9-й Международной молодёжной научной конференции «Поколение будущего» - 2020: взгляд молодых учёных», г. Курск (2020 г.);
- научно-технических семинарах кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство» РУТ (МИИТ) (2019 - 2022 гг.).

1 КРАТКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

1.1 Анализ состояния пожарной безопасности и причин возникновения пожаров на пассажирском железнодорожном транспорте

Своевременное решение задач выявления угроз безопасности на железнодорожном транспорте является главным условием его бесперебойного функционирования. Одной из основных задач обеспечения безопасности на железнодорожном подвижном составе является задача повышения уровня пожарной безопасности.

Динамика развития пожаров на транспорте в период с 2013 года по 2021 год показывает, что доля пожаров на транспорте снижается и занимает третье место от общего числа пожаров в РФ (рисунок 1.1) [1-5].

По данным Федерального государственного бюджетного учреждения «Всероссийский ордена «Знак Почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны» министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» России (ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ) количество пожаров на транспорте в 2021 году составляет 4,4 % от общего числа пожаров по видам объектов, прямой материальный ущерб составляет 2125795 тысячи рублей, погибло 87 человек. На рисунке 1.2 приведено распределение пожаров по видам объектов в РФ за 2021 год [1-5].

Современный железнодорожный транспорт является наиболее безопасным видом транспорта, однако анализ статистических данных в период с 2013 года по 2021 год показывает, что на подвижном составе железных дорог произошло более 400 единиц пожаров в результате которых погибло 10 человек и 10 человек

получили травмы, в 2021 году отмечается 20 единицы пожаров на вокзалах (погибло 3 человека, прямой ущерб составил 0,84 миллионов рублей).

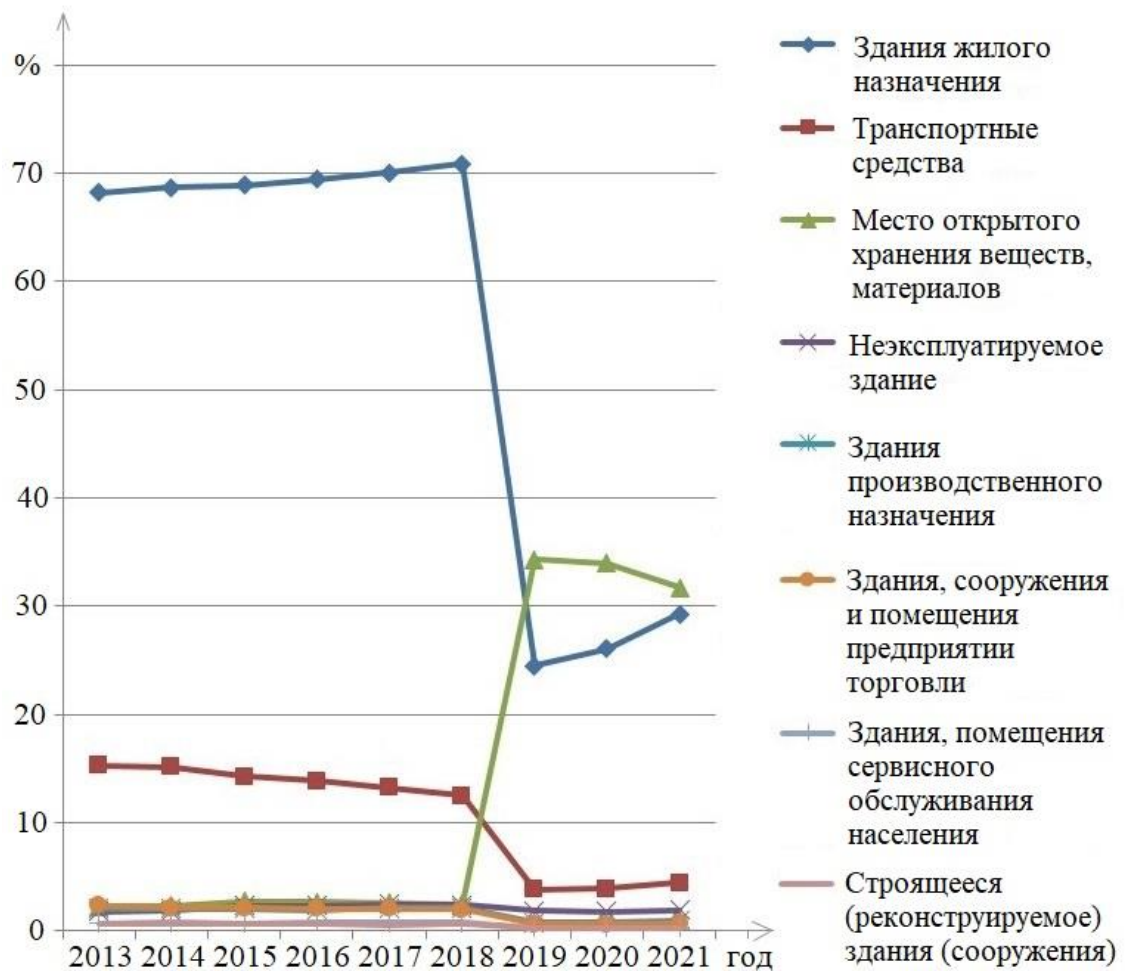


Рисунок 1.1 - Динамика пожаров по видам объектов

Анализ статистических данных ФГБУ ВНИИПО МЧС России в период с 2013 года по 2021 год показал, что на железнодорожном подвижном составе произошло 468 единиц пожаров: 2021 год – 112 единиц, 2020 год – 113 единиц, 2019 год – 98 единиц, 2018 год – 21 единиц, 2017 год – 20 единиц, 2016 год – 17 единиц, 2015 год – 24 единицы, 2014 год – 24 единицы, 2013 год – 39 единиц, из них 76 (16,23 %) единиц пожаров приходится на пассажирские вагоны (рисунок 1.3) [1-10].



Рисунок 1.2 - Доля пожаров по видам объектов от общего количества пожаров

На рисунке 1.3 приведено распределение пожаров, произошедших в 2013 – 2021 гг. на пассажирском подвижном составе.

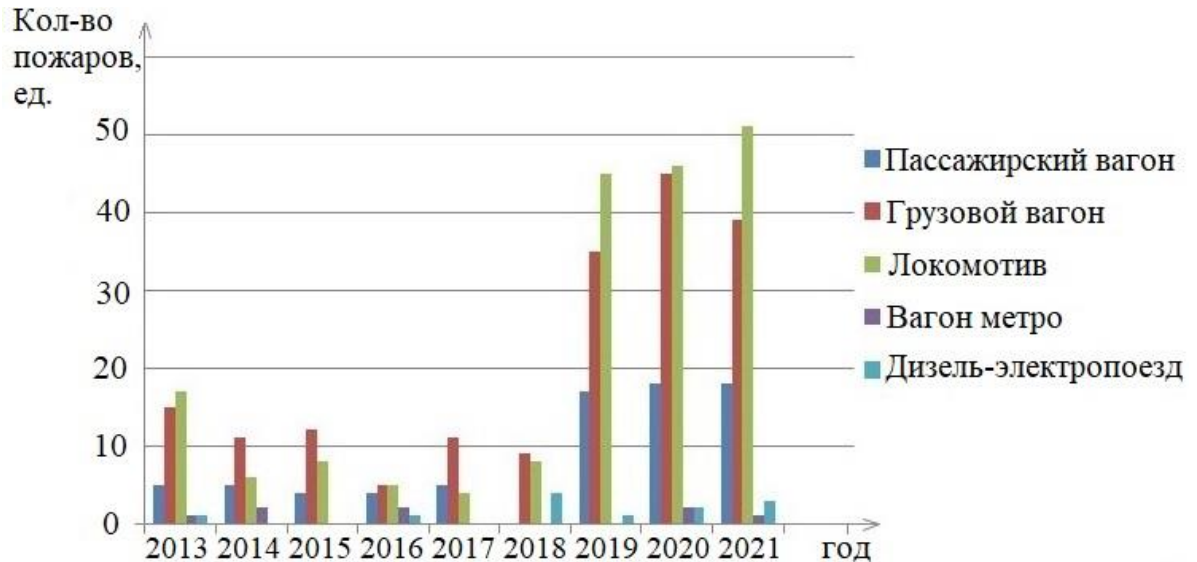


Рисунок 1.3 – Количество единиц пожаров подвижного состава

В 2021 году - 51 пожар при эксплуатации тягового состава (локомотивов) (в 2020 году – 46 пожаров), 39 пожаров при эксплуатации грузового состава (в 2020 году – 45 пожаров), 18 пожаров при эксплуатации пассажирского состава (в 2020 году – 18 пожаров, в 2019 году - 17 пожаров). Таким образом, не смотря

на принимаемые противопожарные меры, риск возгораний на подвижном составе остаётся высоким [1-10].

Статистика пожаров на подвижном составе в 2021 году показывает, что в 2021 году количество пожаров увеличилось и составило 127 единиц, что превысило показатели 2013 -2018 г.г. более чем в 3 раза (рисунок 1.4).

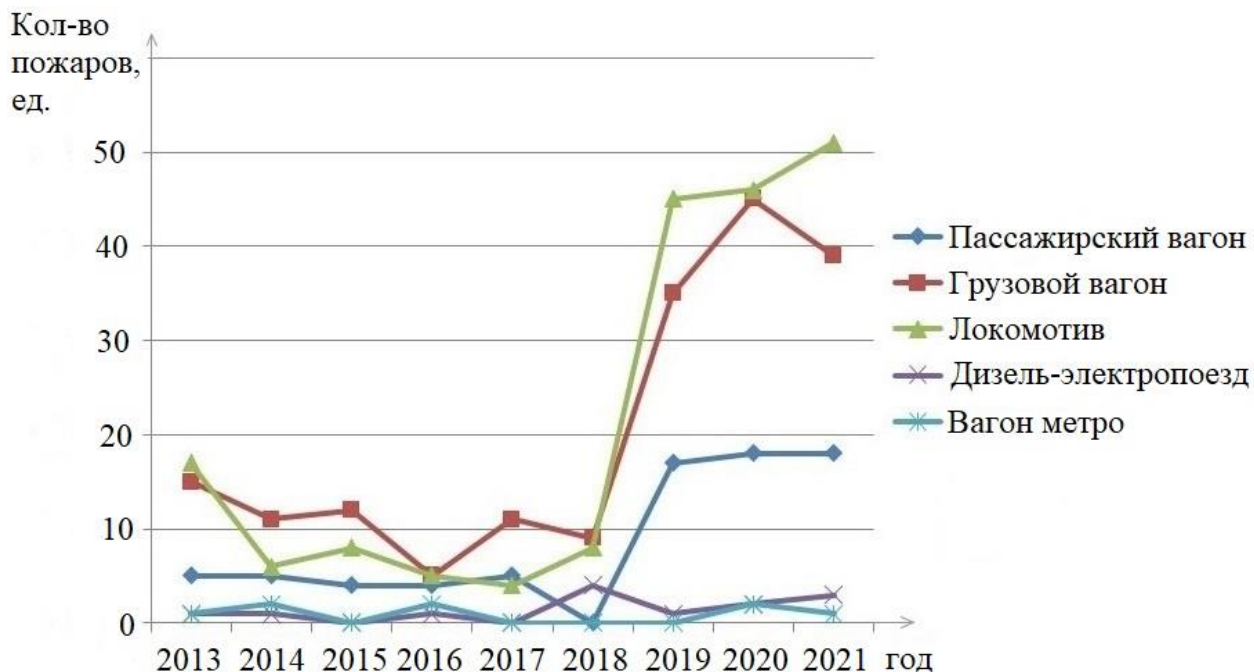


Рисунок 1.4 – Динамика развития пожаров по видам транспортных средств

Количество единиц пожаров на железнодорожном подвижном составе, произошедшими в 2019-2021 гг. представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Количество пожаров в период с 2019 по 2021 год

Вид транспортного средства	Количество пожаров, ед.			Всего, ед.
	2019	2020	2021	
Вагон метро	0	2	1	3
Локомотив	45	46	51	142
Дизель-электropоезд	1	2	3	6
Пассажирский вагон	17	18	18	53
Грузовой вагон	35	45	39	119
Железнодорожные передвижные спецмашины	10	9	6	25
Передвижные машинные станции	4	4	7	15
Итого:	112	126	125	363

Согласно, статистики основными причинами пожаров на подвижном составе железнодорожного транспорта являются неосторожное обращение с

огнем и электрооборудованием (30–50 % случаев), неисправности и нарушение правил эксплуатации электрооборудования (30–40 %), технические неисправности тепловозов и электровозов (10–15 %) (рисунок 1.5) [4-10].

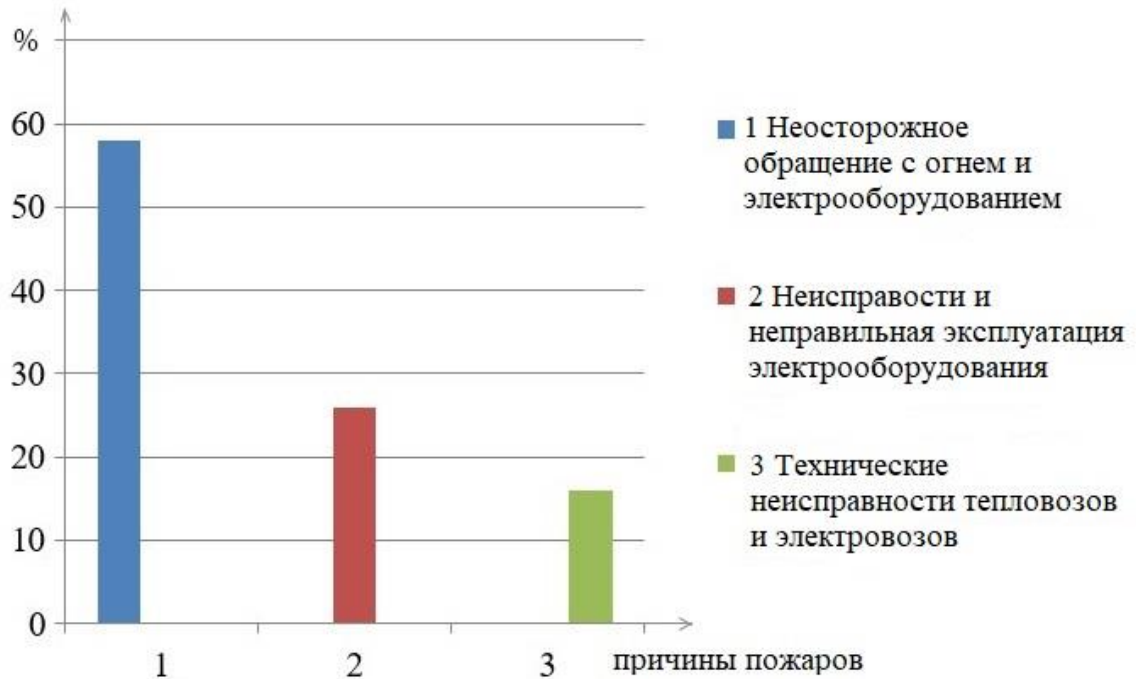


Рисунок 1.5 – Доля пожаров на подвижном составе в зависимости от причин их возникновения

Статистика ФГБУ ВНИИПО МЧС России, международные данные установили, что основной причиной 80 % пожаров вызванных неисправностями электрооборудования, является дуговой пробой (искрение) [6-10].

Безопасная эксплуатация подвижного состава во многом зависит от технического состояния электрооборудования, электроустановок и электроприборов, установленных на подвижном составе.

1.2 Обзор конструктивных особенностей электрооборудования пассажирского вагона

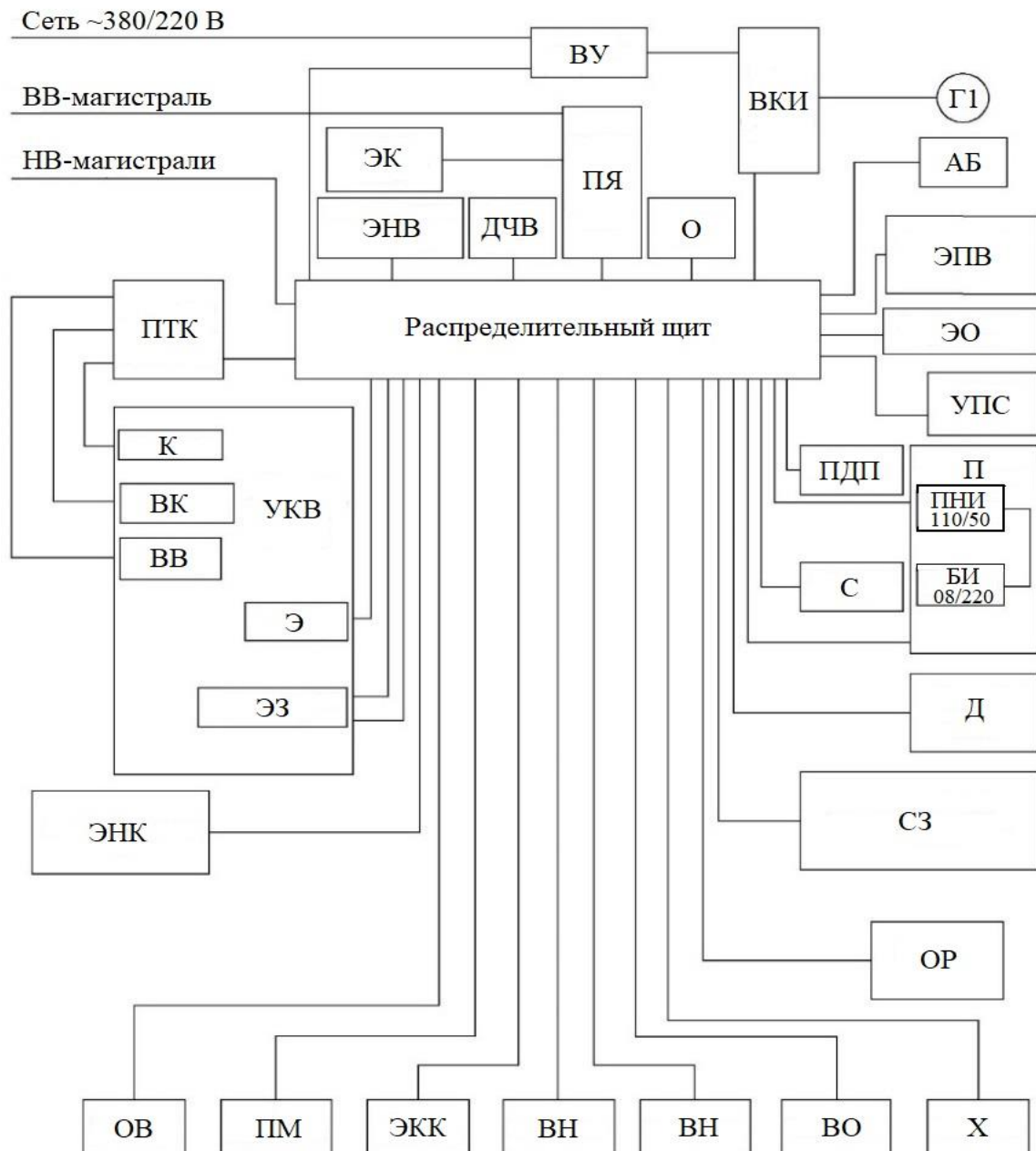
1.2.1 Анализ систем электроснабжения и электрооборудования пассажирского вагона подвижного состава

К основным системам, обеспечивающих функционирование вагонного электрооборудования и требующих непрерывного контроля с целью обеспечения пожарной безопасности относятся [11-14]:

- источники питания потребителей пассажирского вагона;
- вагонная электрическая сеть, подвагонные низковольтная и высоковольтная магистрали, электрические провода и кабели;
- распределительный щит пассажирского вагона;
- статический преобразователь.

Для обеспечения питания потребителей пассажирского вагона подвижного состава применяются подвагонный генератор и аккумуляторная батарея, обеспечивающие напряжение сети 50/110 В, высоковольтная подвагонная магистраль 3000 В, подключаемая к вагону через коммутационную розетку и обеспечивающее питание потребителей 3000 В и 110/220 В через высоковольтный статический преобразователь напряжения, низковольтная подвагонная магистраль напряжением 50 В [13-16]. Генератор или аккумулятор осуществляет питание распределительного щита (РЩ), затем осуществляется питание потребителей (рисунок 1.6).

Потребителями источников питания вагона подвижного состава являются внутривагонное оборудование (рисунок 1.7) и подвагонное оборудование (рисунок 1.8).



АБ – аккумуляторная батарея; ВВ – вентилятор вагонный; ВК – вентилятор конденсатора; ВН – водонагреватель; ВО – водоохладитель; ВУ – вводное устройство; ВКИ – выпрямитель и коммутатор источников питания; Г1 – подвагонный генератор; Д – датчики температуры на крышке котла; ДЧВ – датчик частоты вращения; К – компрессор; О – ограничитель; ОВ – обеззараживатель воды; ОР – освещение розетки; П – преобразователи напряжения; ПДП – пульт дистанционного пуска; ПМ – печь микроволновая; ПТК – преобразователь трехканальный кондиционера; ПЯ – подвагонный ящик с высоковольтным оборудованием; С – сигнальные фонари; СЗ – сигнализация звонковая; УКВ – установка кондиционирования воздуха; УПС – установка пожарной сигнализации; Х – холодильник; Э – электрокалориферы; ЭЗ – электродвигатели заслонок; ЭК – электронагреватели котла; ЭО – электродвигатель отопления; ЭКК – электрокипятильник; ЭНВ – электродвигатель насоса вентилятора; ЭНК – электронагреватели в купе; ЭПВ – электродвигатель перекачки воды

Рисунок 1.6 – Структурная схема электроснабжения пассажирского вагона



Рисунок 1.7 – Классификация внутривагонных потребителей пассажирского вагона

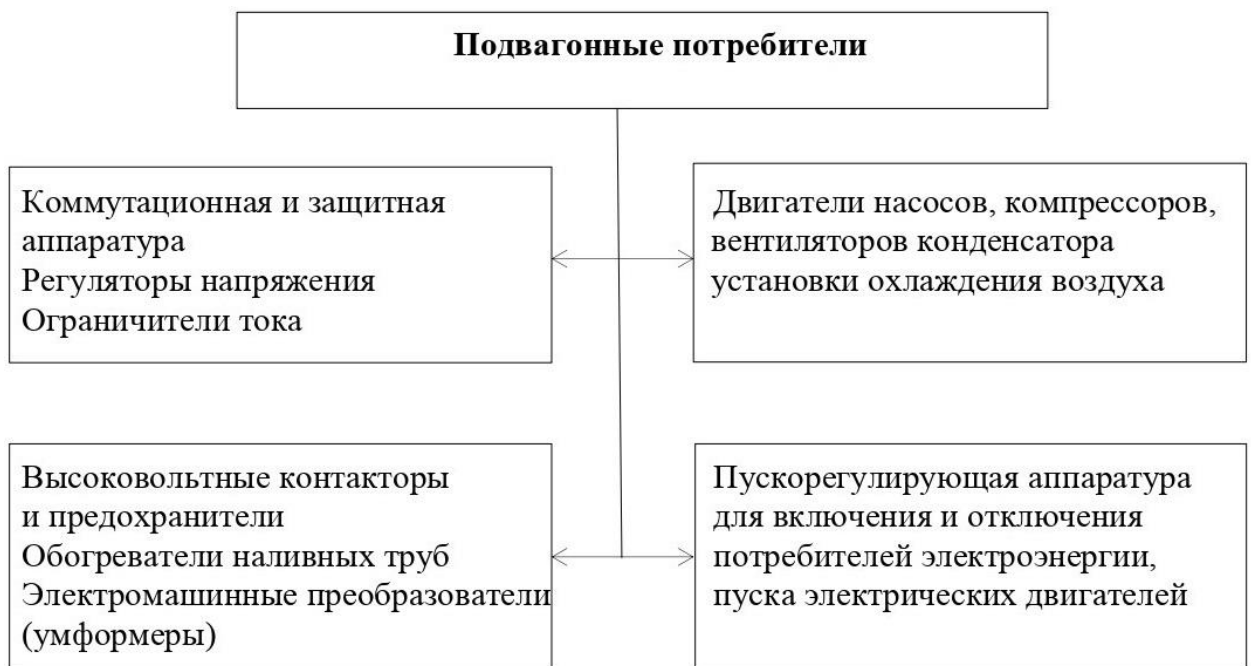


Рисунок 1.8 – Классификация подвагонных потребителей пассажирского вагона

Питание климатической установки обеспечивается низковольтным статическим преобразователем. Питание комбинированного котла осуществляется от высоковольтной поездной магистрали. Электрические печи расположены на полу в пассажирских помещениях, коридоре, служебном отделении и туалетах.

Низковольтные электрообогреватели для дополнительного отопления установлены под окнами пассажирских купе, дополнительные низковольтные обогревательные элементы для подогрева воздуха, поступающего в систему вентиляции, имеются также и в климатической установке.

Розетки на 220 В для подключения бытовой электроники в пассажирских купе, розетки на 5 В с разъёмом RS-232 для подключения к внутренней локальной телекоммуникационной сети расположены в купе вагонов. Пульт управления системами, расположен в служебном отделении [16-19].

Питание внутри вагона потребителей пассажирского вагона осуществляется через двухпроводную систему передачи электрической энергии от подвагонного генератора и аккумуляторной батареи к РЩ и через аппараты защиты далее к потребителям. Слабым местом системы является перегрев мест электрических соединений из-за не надежного электрического контакта между отдельными участками электрической сети (рисунок 1.9).

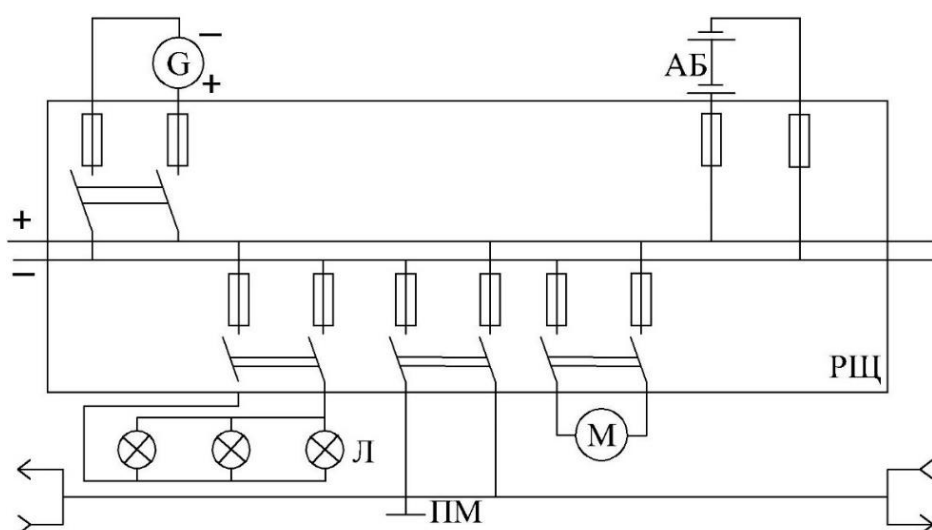
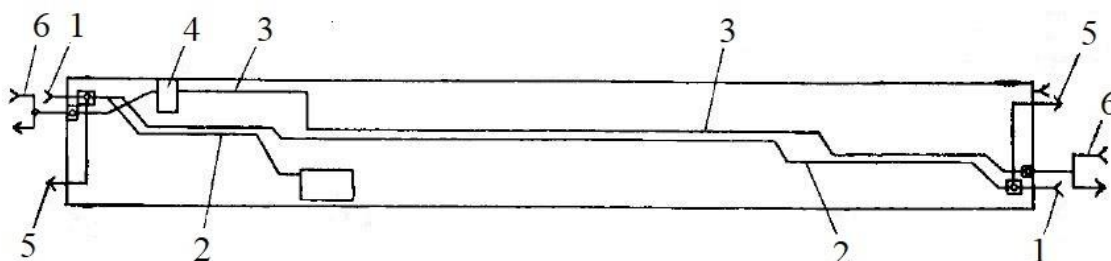


Рисунок 1.9 - Внутри-вагонная двухпроводная система передачи электроэнергии пассажирского вагона

В настоящее время все пассажирские вагоны оборудуются низковольтной и высоковольтной подвагонными магистралями. На рисунке 1.10 приведена схема расположения низковольтной и высоковольтной магистралей пассажирского вагона.



1 – розетка; 2 – высоковольтная подвагонная магистраль; 3 – низковольтная подвагонная магистраль; 4 – главный распределительный щит; 5 – штепсель; 6 – двойной штепсельный разъем

Рисунок 1.10 – Схема расположения подвагонных магистралей

Низковольтная подвагонная магистраль проложена в стальной трубе под кузовом вагона и подключена к главному распределительному щиту вагона. В начале и конце вагона низковольтная магистраль подключена к двойному штепсельному разъему. Высоковольтная подвагонная магистраль служит для питания высоковольтных потребителей электроэнергии вагона от контактной сети через пантограф электровоза или иного централизованного источника. Высоковольтная магистраль проложена в стальной трубе и по концам вагона заканчивается штепселем и розеткой [16-20].

Питание между вагонами осуществляется через межвагонную питающую магистраль (подвагонную) выполненную по однопроводной схеме. При подаче электрической энергии от РЩ по межвагонной магистрали к соседнему вагону минусовая цепь вагонной сети соединяется с корпусом вагона, в этом месте в результате не надёжного контакта возможен перегрев элементов сети.

Высоковольтное питание отопления пассажирского вагона от локомотива осуществляется по однопроводной магистрали напряжением 3000 В. Обратным проводом являются корпус вагона и рельсы (рисунок 1.11).

Разводка проводов по электронагревательным элементам внутри вагона выполнена по двухпроводной схеме. Электробезопасность обеспечивается

замыканием всех высоковольтных цепей (за исключением магистрали) вагона на корпус.

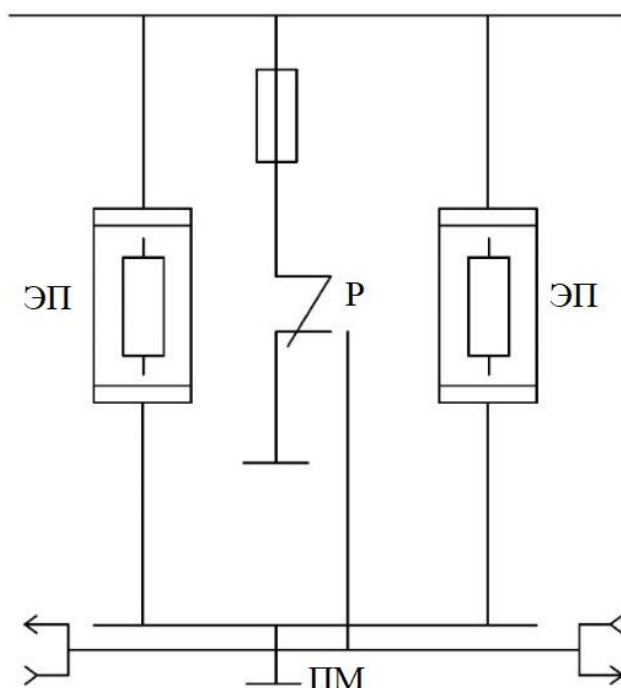


Рисунок 1.11 - Межвагонная однопроводная магистраль напряжением 3000 В

Однако при такой схеме возникает возможность появления не надежного электрического контакта между отдельными частями корпуса вагона и прохождения тока через роликовые буксы (применять шунты, скользящие контакты и пр.) [16-20].

Короткое замыкание в электропроводке и электроприборах из-за повреждения изоляции, ослабление контактов, отсутствие дополнительной изоляции в местах крепления проводов и приборов к металлическим частям, отсутствие изоляционных втулок в местах выхода проводов из металлических труб и клеммных коробок, а также в местах прохода через отверстия в металлических листах, попадание влаги на электропроводку в местах ввода проводов внутрь вагона представляют пожарную опасность в пассажирском вагоне. Неисправности проводов при выходе их из электротехнических труб или металлорукавов, а также соединение проводов пайкой или скруткой, подключение к системе электроснабжения бытовых электроприборов, мощность которых выше установленной электросхемой вагона или не предусмотренных схемой вагона, слабой затяжка контактных соединений, так же приводят к чрезмерному их

нагреву. Перегрузка электрической сети при установке электрооборудования (кофеварок, весов и т.д.) не предусмотренного конструкцией и модернизацией вагона так же является причиной возникновения пожара [16-20].

Для обеспечения электроснабжения потребителей подвижного состава применяются провода, шнуры и кабели. Кабельные коммуникации имеют значительную протяженность и высокую концентрацию горючих изоляционных материалов, что существенно повышает риск возникновения пожароопасных состояний (ПОС), приводящей к пожару. По статистике 60 % пожаров, происшедших при эксплуатации электрооборудования, приходятся на кабельные изделия [16-20].

Кабели, провода и шнуры системы электроснабжения подвижного состава применяются для фиксированного монтажа, монтажа с ограниченной подвижностью внутри вагона, под вагоном и на рамах тележек в цепях освещения, сигнализации, радиосети, телефона, силовых, управления; с вводом в вагон длиной не более 3 метров для подключения к пультам, аппаратам; для присоединения к подвижным токоприемникам и меж-вагонных соединений; для монтажа цепей управления статических полупроводниковых преобразователей; для выполнения гибких заземляющих и шунтирующих перемычек в системах заземления и электроснабжения вагонов однофазным переменным или постоянным током.

Провода и кабели прокладывают в металлических коробах, трубах и металлорукавах с подкладкой из негорючих материалов, жгутами непосредственно в пульте управления, подвагонных ящиках и нишах распределительных щитов.

Несмотря на то, что в последние годы требования к пожаробезопасности кабелей стали более высокими и применяются современные полимерные материалы, из которых изготавливаются оболочки и изоляция жил, электрические кабели в результате нарушения правил прокладки проводов, особенно при выходе их из труб или металлорукавов, а также соединения проводов пайкой или скруткой в непредусмотренных местах, неплотного соединения проводов с

устройствами и аппаратами, пониженного сопротивления изоляции, являются одной из основных причин возникновения ПОС [19-23].

Одним из основных узлов пассажирского вагона является распределительный щит. В нём размещаются приборы и устройства управления, регулирования, защиты и сигнализации. Конструктивно РЩ выполнен в виде металлического шкафа из четырёх секций с откидными или съёмными панелями и дверцами, расположенными с передней и задней стороны, во внутренних отделениях на разных плоскостях монтируются регуляторы, контакторы, предохранители и другие аппараты, к которым не нужен постоянный доступ. РЩ устанавливается в служебном купе проводника. Через РЩ осуществляется распределение питания между потребителями, контроль и проверка режимов функционирования цепей электрооборудования, управление режимами работы потребителей [19-23].

Ко всем элементам РЩ подводятся и подсоединяются провода с изоляционными втулками через соответствующие зажимы. Для обеспечения безопасности все металлические части РЩ соединяются электрически с корпусом вагона.

Электрические соединения между распределительным шкафом и потребителями вагона обеспечиваются соединительными планками с болтовыми зажимами.

Основными факторами возникновения ПОС в РЩ являются:

- наличие на щитах, токоведущих частях, приборах, аппаратуре, наружных поверхностях приборов, аппаратов и конструктивных элементах, кабелях и кабельных соединениях посторонних предметов, пыли, влаги, масла и топлива;
- не надежные контактные и крепежные соединения приборов и аппаратов защиты;
- не исправность, присутствие недопустимой вибрации и шума при работе автоматических выключателей, коммутационных аппаратов, приборов и устройств;
- не исправность механизмов включения коммутационных аппаратов, автоматических выключателей, пакетных выключателей и переключателей;

- наличие плавких вставок (элементов) в предохранителях не соответствующих штатной номенклатуре;
- установка сигнальных ламп в патронах не до упора;
- использование не поверенных электроизмерительных приборов;
- отсутствие защитных заземлений корпусов аппаратуры, приборов и оболочек кабелей;
- низкое сопротивление изоляции;
- не исправность жил кабелей, подключенных к распределительным устройствам;
- не надежные контактные и крепежные электрические соединения между распределительным шкафом и потребителями вагона на соединительных планках с болтовыми зажимами.

Короткое замыкание в электроприборах РЩ из-за повреждения изоляции, ослабление контактов, неисправность приборов защиты, применение нетиповых предохранителей и автоматических выключателей, нарушение порядка отключения потребителей электроэнергии при обнаружении неисправности электрооборудования вагона представляют пожарную опасность в пассажирском вагоне [11-16].

Наличие в РЩ аппаратов токовой защиты без проверки на соответствие номинальным данным плавких вставок предохранителей и без испытания автоматических выключателей и магнитных пускателей, перегрузка проводов при завышенных номиналах или при нетиповых плавких вставках предохранителей и неисправном состоянии автоматических выключателей или магнитных пускателей, наличие в защищаемой цепи предохранителей с прогоревшими фибровыми корпусами или без наполнителя, неисправности дугогасящих устройств коммутационных аппаратов, приводящих к выбросу пламени, нарушения и пониженное сопротивление изоляции электрических цепей потребителей и систем электроснабжения, в том числе и источников питания, перенапряжение, возникающее при отказах регуляторов напряжения и неисправной защите приводит к возникновению пожара.

Места ввода кабелей и проводов в РЩ являются пожароопасными участками для распространения горения. Аппараты и устройства электрической защиты могут нагреваться свыше допустимых температур при нормальной работе, при перегрузке или при коротком замыкании в электрической сети.

В пультах управления электрооборудованием вагонов уязвимыми местами являются состояния контактных соединений, жгутов с проводами и выводов электрических аппаратов, не соответствие плавких вставок предохранителей номинальному току защищаемой цепи, оговоренному в технической документации или в электрической схеме вагона, не работоспособность пакетных переключателей, тумблеров и автоматических выключателей, не исправные аппараты регулирования, защиты, регулировочные резисторы [19-21].

Наличие в пультах управления электрооборудованием вагонов слабо затянутых или имеющих повышенный нагрев контактов, надрывов изоляции и обрыва проводов электрических аппаратов, несоответствие номиналу плавких вставок предохранителей являются причиной возникновения короткого замыкания или искрения, с последующим возгоранием изоляции.

Контакты, применяемые в электрооборудовании вагонов, так же являются уязвимым звеном в системе энергообеспечения. При малом нажатии контакты перегреваются, при чрезмерном нажатии образуются механические повреждения контактов. При размыкании контактов коммутационного аппарата, осуществляющего отключение электрической цепи в нормальном или аварийном режиме, возникает электрическая дуга, которая может привести к обгоранию и разрушению контактов [19-21].

Для соединения проводов высоковольтной камеры и кабины с РЩ, подсоединения блока пуска дизеля, подключения блока промежуточных реле, связи аппаратов в высоковольтной камере, подключения вспомогательного пульта, подключения электрических аппаратов и полупроводниковых блоков (контроллера, регулятора напряжения, панели резисторов указателя неисправностей, скоростемера и др.) используются штепсельные соединения. В месте контактного соединения при прохождении тока выделяется тепло,

перегреваются и подплавляются контакты, что значительно снижает надёжность функционирования.

В подвагонном высоковольтном ящике размещается аппаратура системы отопления вагона: разъединитель, высоковольтные предохранители и контакторы. В ходе эксплуатации могут быть повреждены контакты реле минимального уровня воды, обрыв или замыкание спирали на корпус, обрыв в зоне соединения спирали с обратным проводом, замыкание соединительного кабеля между нагревательными элементами на корпус, пробой изоляции.

Наиболее уязвимыми элементами РЩ являются: крепление аппаратов, снижении изоляции цепей, клемная рейка с разъёмами электронных блоков и проводов, сопротивление изоляции между клеммами и корпусом.

Повышенное напряжение, которое может возникнуть вследствие неисправности регулятора напряжения генератора, при обрыве цепи аккумуляторной батареи и других аварийных режимах [19-22].

Для преобразования высоковольтного напряжения, поступающего из подвагонной магистрали, в напряжение питания потребителей вагона используется статический преобразователь напряжения [21-22]. Конструкция выполнена в виде двух подвагонных ящиков, крепящихся к раме вагона, в одном из которых размещена высоковольтная часть, а во втором - низковольтная. Все устройство состоит из сборочных единиц в блочно-модульном исполнении, масса каждой из которых не превышает 10 кг. Соединение высоковольтной и низковольтной частей устройства осуществляется электрическим кабелем. Если не обеспечивается интенсивный отвод тепла от нагреваемых элементов, то есть риск пробоя высокого напряжения. Уязвимыми пожароопасными узлами преобразователя являются блок контакторов и предохранителей, места включения кабельной системы.

Блок электроснабжения пассажирских вагонов преобразует напряжение, поступающее из поездной магистрали в напряжение для питания потребителей вагона и напряжение для зарядки батареи [21-22].

Неисправности в подвагонном электрооборудовании приводят к возникновению пожаров в пассажирском вагоне. К таким неисправностям относятся: короткозамкнутые аккумуляторы в аккумуляторной батарее, пониженный уровень электролита в аккумуляторах, пониженная емкость аккумуляторной батареи, пониженное сопротивление изоляции аккумуляторной батареи, повышенный зарядный ток аккумуляторной батареи по причине неисправности блока управления зарядом или ограничителя тока батареи или генератора, неудовлетворительное состояние контактных соединений, выводов батареи; засоренность вентиляционных дефлекторов аккумуляторных боксов, неисправная работа генератора (короткозамкнутые витки обмоток, износ электрических щёток и коллектора), ослабление контакта в пинцетах ножевых предохранителей аккумуляторной батареи и несоответствие номинала их плавких вставок; несоответствие плавких вставок и предохранителей, установленных в подвагонном высоковольтном ящике, ветхое состояние высоковольтных и низковольтных проводов или наличие на них поврежденной изоляции, наличие больших переходных и неплотных соединений проводов с аппаратами и приборами, наличие нагаров и копоти на контакторах, реле и других контактных аппаратов, отсутствие дугогасительных камер или неправильная их установка [16-23].

1.2.2 Обзор пожароопасных узлов и причин возгораний электрооборудования пассажирского вагона

Обзор конструктивных особенностей системы обеспечения электропитанием пассажирского вагона, анализ функционирования систем и узлов пассажирского подвижного состава в 2022 году показал, что наиболее пожароопасными узлами электрооборудования пассажирского вагона явились системы высоковольтного отопления, оборудование шкафов и пультов

управления, электрические сети для подключения бытовых устройств 220 В, силовые, низковольтные и вспомогательные цепи [24-30].

Основными причинами возникновения пожаров в пассажирских поездах железнодорожного транспорта явились неисправность электрооборудования, нарушение правил эксплуатации бытовых приборов и устройств защиты электрических сетей, короткое замыкание электропроводки, замыкание в сетевом оборудовании, технические неисправности, нарушение правил технической эксплуатации и выбора аппаратов защиты электрических сетей, нарушение правил обращения с электрооборудованием и правил перевозок (рисунок 1.12) [27-32].

Основными причинами выхода из строя данных систем явились (рисунок 1.13):

- система высоковольтного отопления: пробой изоляции высоковольтной магистрали, неисправность высоковольтной розетки, неисправность высоковольтной магистрали, неисправность штепсельного высоковольтного соединения между вагонами;

- шкафы и пульты управления пассажирского вагона: возгорание проводов в шкафах и пультах управления, неисправность переключателей высоковольтного отопления;

- электрические сети для подключения бытовых устройств 220 В, силовые, низковольтные и цепи управления, вспомогательные цепи: искрение в месте плохого электрического контакта, неисправность розеток 220 В, применение бытовых устройств с несогласованной нагрузкой, нагрев проводников, перегрузка электрической сети в вагоне или секциях, повреждения изоляции [27-32].

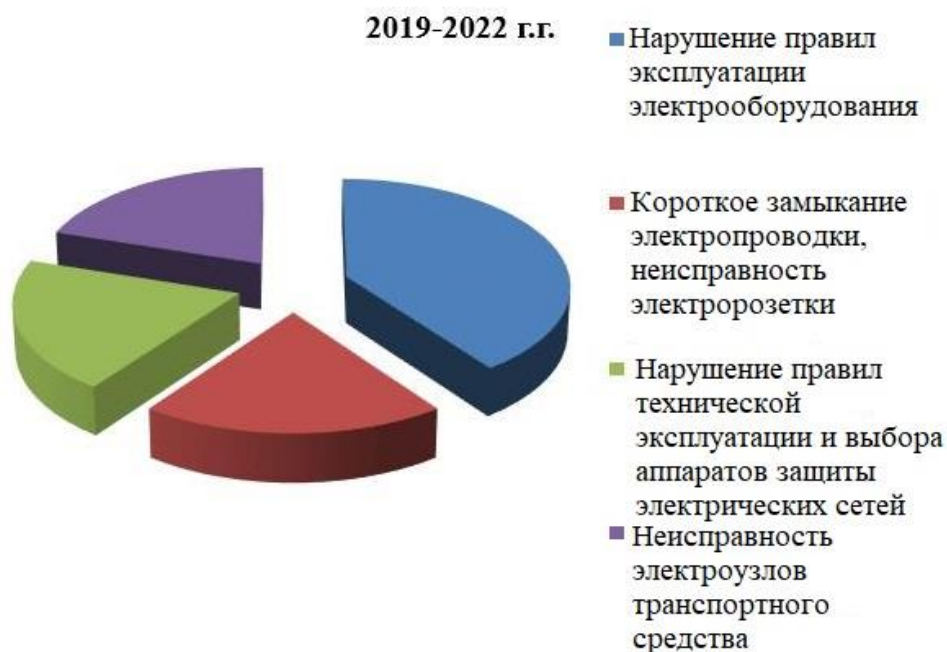


Рисунок 1.12 – Доля пожаров на подвижном пассажирском составе в зависимости от причин их возникновения в период с 2019 по 2022 год

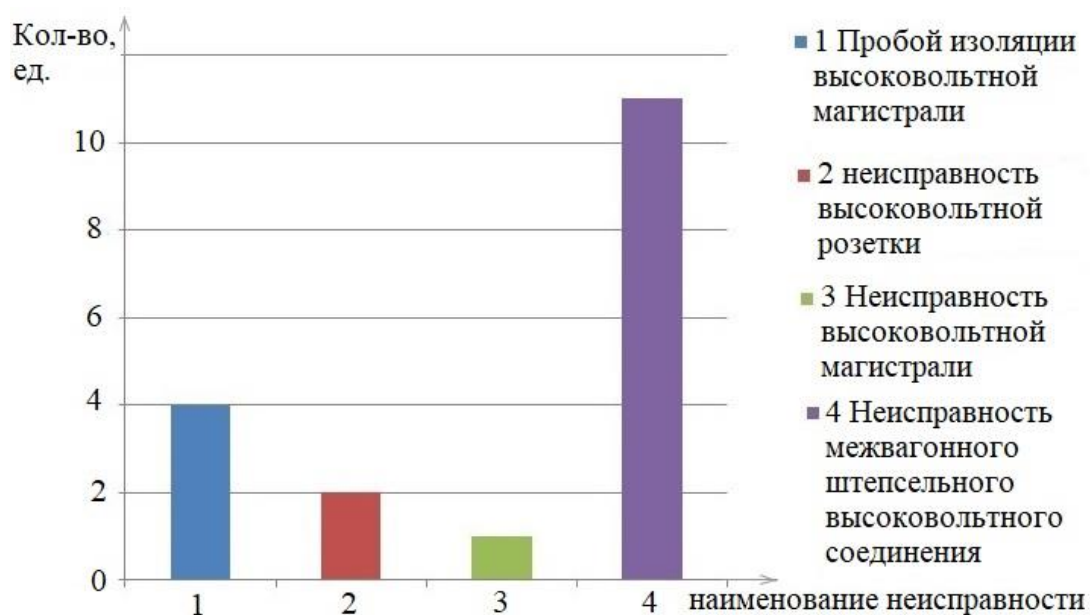


Рисунок 1.13 – Количество неисправностей в системе высоковольтного отопления

Основными причинами возгорания электропроводки являются:

- нагрев проводников (локальный или на протяженном участке);
- перегрузка электрической сети в вагоне или секциях;
- утечка тока по загрязнениям, пыли, металлическим напылениям и т.д.;
- утечка тока с неизолированных участков цепи;

- горение электрической дуги на каком-либо участке цепи, вызванное током короткого замыкания;
- искрение в месте плохого электрического контакта (в соединениях, электророзетках, изношенных или устаревшего образца, на клеммах электроприборов и аппаратов) [24-32].

1.3 Обзор и исследование методов обнаружения, диагностики, контроля и предупреждения пожароопасных состояний в элементах электрических сетей и электрооборудования

В работах, относящихся к пожароопасности в электрических сетях, много внимания уделяется методам, способам и устройствам предупреждения пожаров, возникающих из-за искрения в электропроводке при неисправностях в электрических сетях или электроустановках. Короткие замыкания являются одной из самых распространенных причин возникновения аварийных ситуаций в электрических сетях, а особую опасность представляют короткие замыкания, сопровождающиеся открытой электрической дугой [32-39]. В настоящее время известны методы и способы контроля, предупреждения и регистрации электрической дуги, построенные на следующих принципах:

- изменение параметров электрической сети (мониторинг измеренных параметров значений величин тока, напряжения и сопротивления);
- повышение температуры или давления в месте возникновения электрической дуги или шкафа распределительного устройства;
- регистрация оптического излучения световых вспышек, вызванных появлением электрической дуги.

Способы идентификации электрической дуги [34-39]:

- контроль основных параметров и характеристик электрической цепи при дуговом коротком замыкании: амплитуды тока, напряжения; спектрального состава тока, напряжения; вольт - амперной характеристики; сопротивления;

- контроль основных параметров физических процессов, сопровождающих электрическую дугу: температуры; давления, электрической проводимости (степени ионизации газов), оптического излучения.

Наибольшее распространение получил контроль параметров амплитуды тока или напряжения. В простейшем случае эту функцию выполняют устройства защиты и автоматики. Они всегда имеют некоторую выдержку времени, устанавливаемую, чтобы дать возможность сработать раньше другим аналогичным защитам, находящимся ближе к месту повреждения [34-39]. К недостаткам данных систем относится то, что признаки, по которым определяется наличие дугового короткого замыкания, могут наблюдаться не только при внутренних, но и при внешних коротких замыканиях, а также при некоторых эксплуатационных режимах работы, они не обладают достаточной селективностью и быстродействием [36-39].

Основным принципом создания эффективной системы дуговой защиты, широко применяемым на практике, является ускорение действия устройства защиты и автоматики при помощи систем обнаружения, основанных на контроле параметров явлений, сопутствующих электрической дуге.

Методы обнаружения факта возникновения электрической дуги:

- обнаружение факта возникновения электрической дуги по двум факторам электрической дуги - аварийное возрастание электрического тока и световую вспышку, и выдачи оперативного сигнала на отключение токоведущих цепей, на которых возникла дуга. Обеспечивается охват за счет прокладки световода;

- регистрация возрастания давления воздуха внутри шкафа в момент возникновения дуги датчиками электрической дуги. Возрастание давления в указанном датчике приводит к механическому перемещению специальной заслонки, замыкающей контакты датчика, что обуславливает выработку его выходного сигнала, по которому происходит отключение контролируемой силовой цепи;

- измерение токов в фазах кабеля с помощью датчиков электрической дуги в контролируемой высоковольтной цепи в момент возникновения дуги и сравнение

с первой эталонной величиной. Если значения токов, хотя бы в одной из фаз, больше первой эталонной величины, датчик вырабатывает выходной сигнал, управляющий отключением выключателя контролируемого кабеля. Дополнительно измеряются токи нулевой последовательности вблизи выводов выключателя и вблизи кабельной воронки со стороны кабеля и вычисляется разность между ними, которая сравнивается со второй эталонной величиной. Если эта разность больше второй эталонной величины, датчик также вырабатывает выходной сигнал на отключение выключателя кабеля [37-39].

В 1997 году зарубежными учеными предложен метод определения превышения температуры в электропроводке жилого или офисного помещения, основанный на передаче датчиком измерения температуры сигнала и выдачи команды устройствам пожаротушения согласно данным, содержащим информацию о наименовании, номере помещения и соединительной коробке. Данный способ не обеспечивает непрерывный контроль любой точки электрической сети или электроустановки, так как датчик температуры реагирует на уже, состоявшийся нагрев места неисправности и не предупреждает об этом заранее.

В работах [41-44] отечественных учёных Королёва И.С., Королёва А.И., Новиковой Е.И. в 2005 году приведён способ предупреждения пожаров, возникающих из-за искрения в электропроводке при неисправностях в электрических сетях или электроустановках. Он заключается в том, что измеряется электрический ток контролируемого участка, сравнивается величина накопленного сигнала с заданным значением, соответствующим степени пожароопасности и формируются команда на отключение контролируемого участка. Основным недостатком данного способа является низкая достоверность в определении уровня пожарной опасности при внешних воздействиях, происходящих во внешней цепи, таких как случайное изменение внешнего напряжения сети, вызванное процессами искрения. Это не позволяет отличить процесс искрения, возникающий во внутренней электрической цепи, от процесса искрения, возникающего во внешней силовой цепи и достоверно сформировать

предупреждающий сигнал или команду на отключение, адекватный реальной пожароопасной ситуации во внутренней цепи [41-44]. А также в 2015 году - способ измерения электрического тока в разветвленной контролируемой электрической сети, измерение тока короткого замыкания, тока перегрузки, тока утечки, величины отклонения напряжения сети от требуемых значений, определение ширины искрового промежутка, образованного в месте нарушения целостности электрической цепи, измерение и расчет величины тока искрения с учетом влияния шунтирующего тока [42]. Данный метод не обеспечивает определение места искрения в контролируемой электрической сети, это приводит к необходимости отключения всей разветвленной контролируемой электрической сети. Кроме этого не обеспечивается высокая достоверность идентификации полученных результатов анализа с процессом искрения из-за воздействия на нее широкого спектра помех в емкой и разветвленной электрической сети [42].

Отечественными учёными Кривовым Ю.Н., Тонким Л.В., Царёвым А.Б. в 2009 году изложен способ [45] измерения электрического тока контролируемого участка нагрузки и преобразовании аналоговое значение измеренного тока нагрузки и напряжения внешней сети по каждой фазе в цифровые значения, в результате получают и накапливают числовые значения коэффициента шума по каждой фазе [45], сравнивают величину накопленного значения коэффициента шума с заданными значениями, и в зависимости от величины накопленного сигнала формируют команду на отключение контролируемого участка, числовые значения коэффициентов шума по каждой фазе сохраняют в запоминающем устройстве [45]. К основным недостаткам данного метода относятся: определение наличие искрения в цепи и измерение интервала времени искрения; не предусматривается сопряжение с другими подсистемами пожарно-охранной сигнализации и интегрирование в интегральную систему безопасности объекта; не предусматривается передача данных на диспетчерский пункт Пользователя [45].

Российским учёным Бурмака А.А. в 2013 году предложен метод диагностики и мониторинга состояния пожароопасности электрических сетей

энергоснабжения объектов [46]. Сигналы с аналоговых, дискретных и цифровых датчиков, как текущая информация о состоянии электрических сетей, питающих конечных потребителей контролируемого объекта, поступают параллельно соответственно на входы АЦП, дискретного модуля-преобразователя и модуля цифрового ввода [46]. Если риски пожароопасности отсутствуют (т.е. протечки тока в сети нет: потребительный ток и напряжение в сети в норме, искрение отсутствует, температура проводной части и соединителей и температура окружающей среды в норме, задымление, огонь отсутствуют, состав воздуха в норме и т.д.), то с заданным интервалом опрашиваются датчики, накапливается оперативный массив данных по каждому из них и ведется непрерывный анализ текущей информации; если выявлена тенденция, к возникновению и развитию нештатной ситуации, то определяется приоритетная, совокупность наиболее информативных датчиков, которые начинают опрашиваться чаще других, а также принимается решение и формируется команда на отключение электропитания конечных потребителей и обесточивает проводную сеть, одновременно формируя команду тревоги в визуальной и звуковой форме. Сравнительный анализ показывает, что данный способ отличается введением дополнительных элементов, соединенных между собой и управляемых контроллером, что позволяет существенно расширить функциональные возможности устройства за счет увеличения числа контролируемых параметров объектов, обработки текущих данных с целью раннего прогнозирования пожароопасности электрических сетей из-за различных видов неисправностей, а также - за счет возможности сопряжения с внешней интегрированной системой мониторинга. Данный метод может быть использован при создании систем мониторинга, электрических систем энергоснабжения различных объектов с ранним распознаванием формирования нестабильных ситуаций и принятия решений [46].

Задачи автоматизированного предупреждения пожара от искрения в электрических сетях или электроустановках были раскрыты в работах Мкртумова А.С., Немцова А.Н., Немцова Ф.Н. в 2014 и 2018 годах [47-48]. Метод обнаружения и защиты от искрения в защищаемой сети включает измерение

сигналов напряжения и тока в защищаемой цепи в каждом полупериоде напряжения, на основании измеренных отклонений напряжения и тока определяют наличие единичного искрового разряда в каждом полупериоде напряжения, накапливают информацию о единичных искровых разрядах в течение заданного промежутка времени и сохраняют ее в виде параметра искрения. По достижении параметром искрения заданного значения регистрируют искрение и вырабатывают сигнал на отключение защищаемой цепи от сети. При этом измерение напряжения и тока включает измерение тока в высокочастотной области, измерение тока в среднечастотной области, измерение напряжения в низкочастотной области и измерение напряжения в среднечастотной области [47].

Способ контроля двух потенциально опасных участков разветвленной электрической сети [49]. К каждой замкнутой электрической цепи параллельно подключаются входы модулей измерения искрения. При нарушении целостности одной из электрических цепей, например, участка 1 соответствующим его модулем измеряется величина напряжения искрения и/или его тока. К недостатку данного технического решения относится усложнение конструкции кабеля или электрического жгута, при разработке которого требуется введение дополнительного провода, требующего, в свою очередь, контроля его подсоединения к защищаемой цепи, а также ухудшающий весовые, объемные и стоимостные характеристики объекта, использующего данный кабель (жгут). Кроме этого существенно усложняется электромонтажная схема контролируемой электрической сети, в целом, а, значит, понижается надежность функционирования контролируемой ЭС и ее готовность к применению при восстановлении поврежденной электрической цепи [49].

В работах [50] учёных Гладышева А.И., Королёва И.С. рассмотрен способ определения места контролируемого участка с искрящей электрической цепью [50]. По совпадению результатов измерения ВЧ-сигналов с датчиков только одного участка из всего их множества делается вывод о выбранном адресе контролируемого участка с искрящей электрической цепью и о соответствии

анализируемых высокочастотных сигналов на датчиках процессу искрения [50]. Разделение контролируемой электрической сети на контролируемые ее участки приводит к увеличению уровня достоверности проводимых измерений и расчетов. Преимущество способа заключается в том, что он содержит в себе операции, формирующие адрес контролируемого участка с искрящей цепью. Одновременно эффективно подавляются воздействия помех при отсутствии данного искрения, исключающие формирование опасных ложных команд и донесений [50].

Основными недостатками вышеперечисленных методов [37-50] являются:

- устройства реагируют на уже состоявшийся нагрев места неисправности и не предупреждается об этом заранее, не обеспечивается непрерывный контроль любой точки электрической сети или электроустановки;
- низкая достоверность в определении уровня пожарной опасности при внешних воздействиях, происходящих во внешней цепи, таких как случайное изменение внешнего напряжения сети, вызванное процессами искрения;
- не обеспечивается высокая достоверность идентификации полученных результатов анализа с процессом искрения из-за воздействия на нее широкого спектра помех в емкой и разветвленной электрической сети;
- усложнение конструкции кабеля или электрического жгута, при разработке которого требуется введение дополнительного провода, требующего, в свою очередь, контроля его подсоединения к защищаемой цепи;
- отсутствие возможности осуществлять адресное отключение электрической цепи, что приводит к отключению всей контролируемой электрической сети и тем самым кроме этой опасной цепи отключает нормально функционирующие электрические цепи с работающими потребителями;
- не позволяют добиться абсолютно надёжной идентификации процесса искрения в ёмкой и разветвлённой электрической сети, в которой при этом постоянно присутствует широкий спектр помех;
- не позволяют обнаружить изменение величины переходного сопротивления до опасного значения и сформировать сигнал пожарной опасности

или команду на автоматическое отключение электрической сети (электроустановки) [40-50].

Методам обнаружения возникновения электрической дуги на основе применения волоконно-оптических технологий посвящены работы таких учёных, как Казачкова Ю.П., Демьянович М.А., Евреева А.И., Пименова А.В., Казакова С.В., Чубрика Н.А., Васина Е.Н. [51-55]. Метод обнаружения возникновения электрической дуги совмещенным датчиком обеспечивает обнаружение факта возникновения электрической дуги в системах релейной дуговой защиты комплектного распределительного устройства (КРУ). Совмещенный датчик электрической дуги состоит из волоконного световода со светопроницаемой оболочкой, фотоприемника (ФП), оптического затвора Фарадея [51-55]. Сигнал на выходе датчика отсутствует. Возникновение электрической дуги сопровождается мощной световой вспышкой, свет от которой падает на боковую поверхность световода и индуцирует в его светопроводящей сердцевине оптический сигнал, распространяющийся по световоду к концу. Также возникновение электрической дуги сопровождается аварийным возрастанием тока в 5-10 раз, превышающим номинальное значение в контролируемой токопроводящей шине, это приводит к возрастанию магнитного поля вокруг токопроводящей шины, с которой магнитосвязан оптический затвор Фарадея, что приводит к его открытию, и оптический сигнал с конца световода, проходя через затвор, попадает в оптический вход ФП, где, при превышении оптическим сигналом заданного уровня, формируется выходной электрический сигнал, который с выхода ФП поступает в дуговую релейную защиту [51-55].

Метод обнаружения факта возникновения электрической дуги внутри шкафа КРУ на основе применения световода с оболочкой, в качестве чувствительного элемента которого используется одиночное полимерное оптическое волокно из полиметилметакрилата (ПММА) [51-55]. Возникновение и горение электрической дуги сопровождается интенсивным испусканием света, который падает на боковую поверхность световода и, пройдя через его светопроницаемую оболочку, захватывается светопроводящей сердцевиной. По

этой сердцевине свет от дуги попадает на фотоэлектронный преобразователь, где преобразуется в электрический аналог. Амплитуда электрического аналога сравнивается с пороговым уровнем срабатывания порогового устройства. При превышении этого уровня пороговое устройство срабатывает и выдает на своем выходе сигнал, по которому отключается высоковольтный выключатель силовой цепи контролируемых шкафов КРУ. Снятие напряжения с этих цепей прекращает горение электрической дуги.

Метод дуговой защиты высоковольтных переключателей КРУ на основе регистрации признаков электрической дуги различной физической природы [55].

Защита КРУ осуществляется применением датчика дуги, в котором осуществляется контроль оптического излучения и электромагнитного излучения радиочастотного (РЧ) диапазона частот на основе применения приемников соответственно оптического и радиочастотного электромагнитного излучения. Датчик, выполненный в виде единой конструкции, размещается в зоне расположения защищаемого оборудования. Возникновение электрической дуги в высоковольтной токоведущей сети (в кабеле) сопровождается появлением световой вспышки, индуцирующей оптическое излучение, а также появлением электромагнитного поля, индуцирующего электромагнитное импульсное излучение в радиочастотном диапазоне частот [55].

При появлении каждого из двух указанных видов излучений срабатывают детекторы, выходные сигналы которых усиливаются и преобразуются по амплитуде и длительности соответственно, а затем поступают на вход схемы совпадения. Выходной сигнал схемы совпадения, который вырабатывается только в случае поступления на его вход одновременно двух сигналов, формируемых двумя описанными выше каналами детектирования, поступает на вход исполнительного органа. Исполнительный орган вырабатывает выходной сигнал, управляющий отключением контролируемой датчиком цепи, в которой возникла дуга [55].

В работах Беленкова А., Швечикова, Елисеева А. рассматриваются методы дуговой защиты на основе применение систем дуговой защиты, реагирующих на

амплитуду тока (МТЗ) и оптическое излучение (оптический датчик) [56]. В элементах электрооборудования располагаются элементы, захватывающие оптическое излучение. ФП преобразует оптический сигнал в электрический и передает его на управляющее устройство. Время срабатывания современных оптических датчиков составляет от одной до нескольких десятков миллисекунд. Управляющее устройство также обрабатывает сигнал, пришедший с измерительных трансформаторов тока МТЗ. Типичное время формирования сигнала МТЗ составляет 30-50 миллисекунд. Если оба значения превышают пороговые, управляющее устройство определяет место возникновения дугового КЗ и формирует сигнал на срабатывание соответствующих выключателей, предотвращающих дальнейшее распространение электрической дуги.

Основными недостатками данных методов являются:

- возможность ложных срабатываний из-за внешнего короткого замыкания (при возникновении внешнего короткого замыкания происходит аварийное нарастание электрического тока, внешнее короткое замыкание приводит к электромагнитным наводкам), которые вызывают срабатывание фотоэлемента;
- низкое отношение сигнал/помеха по отношению к световым воздействиям искусственного и естественного происхождения;
- высокие потери передачи оптического сигнала, что делает возможным их применение только в линиях связи небольшой длины;
- малый диаметр и апертура, что затрудняет их согласование с приемопередающими модулями;
- однократность применения вследствие порчи датчика (перегорания световода или пережога изоляционного слоя светозащитного экрана электрической дугой);
- малый радиус контролируемой зоны из-за низкой чувствительности кварцевых волокон к внешнему облучающему излучению, что делает необходимым приближать световод к токоведущим частям;
- возможность ложного срабатывания датчиков от посторонних источников, индуцирующих сигнал той же природы, что и сигнал, контролируемый датчиком;

- низкая помехоустойчивость, обусловленная воздействием электромагнитных помех на линии связи, что приводит к необходимости отстройки от помех путем введения временных задержек, частотной фильтрации или увеличения уровней срабатывания реагирующих органов;
- датчик позволяет фиксировать только момент возникновения электрической дуги;
- из выходного сигнала датчика невозможно выделить мощность дуги и ее местоположение [56].

Исследования методов тепловизионной диагностики отражены в работах Назарова А.А., Пехотикова В.А., Грузинова О.И., Рябикова А.И. [57-61]. Тепловизионной диагностике элементов электропроводки подвергаются открытые участки электропроводки внутри помещений, которые выполнены незащищенными изолированными проводами, проложенными непосредственно по основаниям, на роликах, изоляторах, в пластмассовых коробах и трубах. Определяются участки электропроводки и осуществляется тепловизионная съемка отдельно для каждого участка, производится фокусировка тепловизора (термографа) с целью получения максимально информативного изображения тепловых полей [57-61]. Рекомендуемая дальность тепловизионного измерения: 0,4 - 3,0 метра. Перемещая тепловизор (термограф), производится обследование выбранного участка и определяется максимальная температура на обследуемом участке, производится тепловая съемка. Выполняются все действия для остальных обследуемых участков элементов электропроводки [57-61]. Метод тепловизионного контроля электрического оборудования через инфракрасные окна. Инфракрасное окно обеспечивает осмотр корпуса электрического оборудования внутри и проверку физического состояния компонентов сети. Обследованию подлежат кабельные соединения, соединения шины, изолятора или автоматического выключателя [57-61]. Инфракрасные окна обеспечивают для тепловизора прямой визуальный доступ к находящимся под напряжением электрическим компонентам без необходимости открывать корпус оборудования.

Специалист по термографии производит осмотр тепловизором внутренней части электрического оборудования через инфракрасное окно [57-61].

Основными недостатками тепловизионного метода контроля электрооборудования являются:

- отсутствие возможности непрерывного контроля и мониторинга состояния функционирования электрооборудования;
- отсутствие возможности автоматизированного контроля и мониторинга состояния функционирования электрооборудования;
- обследование функционирования только технически доступных элементов электрооборудования;
- обследование функционирования элементов электрооборудования в стационарном (неподвижном) исполнении;
- обнаружение уже свершившегося факта возгорания.

Вопросам обеспечения пожарной безопасности на железнодорожном транспорте посвящены работы учёных РУТ (МИИТ) Филиппова В.И., Петрова Г.И., Беспалько С.В., Пономарева В.М., Попова В.Г., Евсеева Д.Г., Плицыной О.В., ВНИИПО МЧС России Шебеко Ю.Н., Навценя В.Ю. [62-69]. В данных трудах большое внимание уделяется разработке методов и способов противопожарной защиты железнодорожных цистерн для перевозки опасных грузов. В рамках теоретических и экспериментальных исследований разработаны математические модели и программные средства основных сценариев аварийных ситуаций, модели и методики поведения железнодорожных цистерн со сжиженными углеводородными газами в очаге пламени, внедрены новые конструкторские решения и технические средства защиты на основе экспериментов и расчётов, разработаны предложения по формированию единой технической политики для обеспечения пожарной безопасности перевозки опасных грузов по железным дорогам России [62-66]. В работе [63] по результатам расчёта впервые были определены параметры предохранительного клапана с увеличенным диаметром сечения, испытаны на моделях и запущены в производство огнезащитные покрытия, обеспечивающие увеличение в 2,5-3,5 раза

времени безаварийного пребывания цистерны в очаге пожара. В работе [66] исследовано совместное влияние огнезащитного покрытия и предохранительного клапана на поведение сосудов со сжиженными углеводородными газами в очаге пламени, предложено и реализовано комбинирование действий огнезащитного покрытия и предохранительного клапана, в качестве огнезащитного состава предложен огнезащитный вспенивающийся СГК-1, рассмотрена необходимость переработки отдельных нормативных документов. Однако решения, приведённые в [62-69] применимы исключительно к семейству цистерн для перевозки опасных грузов, направлены на обеспечение пожаровзрывобезопасности цистерн в условиях огневого воздействия, то есть когда цистерна уже находится в очаге пожара и мало эффективны для применения в пассажирских поездах на этапе вскрытия начала возникновения пожароопасной ситуации.

Отечественными учёными Гаранжой И.В., Харламовым В.А. в 2009 году предложен метод диагностики электрооборудования пассажирских вагонов путем подключения переносного стенда диагностики цепей пассажирского вагона в разъемные соединения пультов управления вагонов [70]. Стенд диагностики цепей пассажирского вагона подключается с помощью соединительных жгутов в отдельности к разъемам силового электрооборудования вагона и его устройств управления непосредственно в самом вагоне, что позволяет производить оперативно диагностику в отдельности электрооборудования и его управления без извлечения проверяемых узлов из рабочих мест [70].

ЗАО «ЭЛСИЭЛ» реализован метод управления и диагностики вагонного оборудования на базе встроенного в электрооборудование пассажирского вагона контроллера ЗАО «ЭЛСИЭЛ». Контроллер обеспечивает диагностику неисправностей пассажирского вагона, однако не может конкретизировать место неисправности. Так, например, если блок регулирования и защиты генератора выдал ошибку, то это еще не значит, что неисправный генератор. В этом случае может быть неисправным не сам генератор, а блок регулирования и защиты. В этом случае внутренняя диагностика электрооборудования вагона не позволяет конкретизировать неисправность.

В работах [71] Никитина А.В., Сапрыкина В.В. предложен метод безотцепного обслуживания, контроля, диагностики и ремонта электрооборудования вагонов-термоцистерн для транспортирования расплавленных химических продуктов. Контроль и диагностика электрооборудования вагонов-термоцистерн для перевозки жидкой серы, осуществляются путем измерений с помощью мегомметра сопротивления электрической изоляции элементов в каждой из групп цепей вагона-термоцистерны и на основе сравнения полученных значений с допустимыми пороговыми значениями определяют исправность изоляции электрооборудования вагонов-термоцистерн [71]. При обслуживании электрооборудования вагонов-термоцистерн используется мобильный комплект устройств с аккумуляторным питанием, состоящий из переносного компьютера и переносного мегаомметра-мультиметра с безопасными уровнями контрольных напряжений, встроенной памятью результатов измерений и портом вывода результатов измерений на переносной компьютер, а также подменный фонд откалиброванных посредством калибратора температур термореле [71]. Эффективность способа заключается в автоматизации идентификации состояния вагона-термоцистерны и упрощении процедуры регистрации результатов, ведению статистической аналитики ремонтов и их прогнозированию, а также оптимизации складских запасов материалов и запасных частей [71].

Задачи контроля безопасности и связи пассажирского поезда на основе применения систем сигнализации и связи рассматриваются в работах учёных Ряховского В.И., Финка Ю.М., Коваленко В.Н., Осипенко А.В., Наумчука Г.Л., Розенберга Е.Н. [72-75]. Система обеспечивает передачу аварийных сигналов – ретрансляторов от систем аварийной сигнализации вагона путём формирования голосовых сообщений для передачи их проводнику вагона и начальнику поезда. В служебном купе проводников срабатывает пожарная сигнализация. Автоматическое устройство набирает номер носимого терминала проводника и начальника поезда и передает голосовое сообщение "Пожар и пятизначный номер вагона" [72-75]. Получив это сообщение, проводник проверяет вагон. По

носимому терминалу немедленно докладывает начальнику поезда об устранении причины, вызвавшей срабатывание пожарной сигнализации [72-75]. К недостаткам данных решений можно отнести сложность наладки системы и её функционирования, высокую вероятность частых отказов в работе, отсутствие защиты от сбоев в системе электропитания, приводящее к выходу из строя системы управления и безопасности пассажирского поезда [72-75].

Вопросы повышения надёжности работы системы контроля безопасности и связи пассажирского поезда отражены в работах Ишимова В.В., Карнаухова Р.Н., Подзорова П.В. в 2016 году [76]. Предложенная центральная управляющая система системы контроля безопасности и связи пассажирского поезда обеспечивает защиту от внештатной работы системы электропитания и оптимальное расположение составляющих её компонентов, однако система не решает задач раннего обнаружения возникновения пожароопасных состояний в элементах электрооборудования пассажирского поезда.

В работах Абрамова О.В., Марченкова А.В., Комкова Е.В., Рагузина К.А. уделяется внимание разработке систем оповещения об аварийной ситуации или возгорании и запуске средств пожаротушения многосекционного локомотива [77-81]. Система обеспечивает контроль неисправности линии и состояния пожарных извещателей, запуск средств пожаротушения, автоматическое обнаружение очага пожара в контролируемых помещениях локомотива и своевременное оповещение локомотивной бригады, то есть срабатывает уже по факту возникновения пожароопасного состояния.

Общими основными недостатками вышеперечисленных методов [62-82] являются:

- отсутствие возможности автоматического дистанционного контроля состояния транспортного средства;
- наличие только одного пульта управления и диагностики, выполненного в виде носимого варианта начальника поезда, большого количества узлов коммутации и отсутствия автоматического контроля за состоянием вагона;

- используются опасные для персонала уровни контрольных напряжений; при оснащении участка технического обслуживания вагонов-термоцистерн диагностическими стендами, размещаемыми на стационарных постах контроля, требуется подвод электроснабжения большой мощности;

- существует необходимость многократного маневрирования составом из обслуживаемых вагонов-термоцистерн для подачи каждого из них в зону досягаемости подключения кабелей от стационарных пунктов контроля;

- при наличии в схеме электрооборудования вагона-термоцистерны неисправностей в виде короткозамкнутых цепей на некоторое время возникает аварийный токовый режим для питающего электрооборудования, а также разъемов и цепей электрооборудования вагона-термоцистерны, что не лучшим способом сказывается на остаточном ресурсе их работы;

- существует проблема низкой точности и большого времени калибровки термореле в составе вагона-термоцистерны;

- не обеспечивается диагностика электрооборудования непосредственно на пассажирском вагоне;

- не определяется место неисправности пассажирского вагона.

В настоящее время для раннего обнаружения возгораний в электрических сетях и электрооборудовании активно применяются оптические устройства. Принцип работы данных устройств основан на регистрации оптического излучения вспышки электрической дуги и формировании команды на своевременное отключение повреждённого участка сети. Сегодня основное внимание уделяется разработке оптических систем защиты от дугового короткого замыкания, сопровождающегося открытой электрической дугой. Однако гораздо менее мощные искровые разряды, не приводящие непосредственно к короткому замыканию, также создают опасность пожаров, которая особенно значительна при наличии в воздухе горючих смесей - попадании в него паров или мелкодисперсных частиц горючих веществ [56-57]. Причины образования воздушных горючих смесей в пассажирских вагонах могут быть весьма разнообразными, и обусловлены условиями эксплуатации вагонов, а также

нарушениями правил пожаробезопасности персоналом и пассажирами. Наряду с дуговыми разрядами, особую опасность для возникновения пожароопасных состояний в электрических сетях представляют менее мощные искровые разряды, излучение которых в отличие от дуговых разрядов происходит на фоне аддитивных внешних оптических помех в виде паразитной засветки от искусственного или естественно освещения. Для обнаружения оптических вспышек искровых разрядов на фоне помехи предлагается использовать метод преобразования светового потока вспышки искры в электрический сигнал с последующей пороговой обработкой сигнала со следящим порогом [56-57]. Для реализации данного метода предлагается оптическое устройство, в состав которого включены фотоприёмник, интеграторы, пороговое устройство, устройство сравнения и сумматор. Для обнаружения оптической вспышки разряда на фоне помехи используется двухканальная схема следящего интегрирования выходного сигнала фотоприёмника, пропорционального падающему световому потоку. Для проверки работоспособности предложенного устройства разработаны модели обнаружения сигналов искровых разрядов, проведено моделирование разработанных алгоритмов и получены результаты, подтверждающие их работоспособность. Предложенный вариант оптического устройства рекомендуется применять совместно с оптическим волокном в технических системах пассажирского подвижного состава для решения задач раннего прогнозирования возникновения аварийных ситуаций, сведения к минимуму причинение ущерба [56-57].

Выше перечисленные способы и методы реализованы в устройствах, представленных в работах [83-92] и в Приложении А.

1.4 Сущность предлагаемого подхода

На подвижном составе железнодорожного пассажирского транспорта пожары представляют особую опасность, поскольку даже относительно

небольшие из них могут распространяться на крупные объекты инфраструктуры, приводить к значительным сбоям в графике движения поездов, высокой вероятности гибели или причинения вреда здоровью людей.

Для снижения ущерба от пожаров предпринимаются различные меры. Так, на стадии конструирования и производства они предусматривают обеспечение требуемого номинального уровня пожаробезопасности при отсутствии конструктивных ошибок и производственного брака, а также обеспечение правильной эксплуатации объектов в пределах допустимых условий. На стадии эксплуатации - это меры, направленные на предупреждение пожаров, основанные на использовании диагностики и мониторинга ПОС объектов, на мероприятия по ликвидации пожаров при их возникновении.

Согласно статистики основными причинами пожаров на подвижном составе железнодорожного пассажирского транспорта являются неосторожное обращение с огнем и электрооборудованием (30–50 % случаев), технические неисправности тепловозов и электровозов (30–40 %), неисправности и неправильная эксплуатация электрооборудования (10–15 %) [1-10].

С точки зрения вероятности возникновения пожаров и наносимого ущерба особенностями пассажирских вагонов являются большая роль человеческого фактора и быстрое развитие пожаров после возгорания. К возникновению пожаров, связанных с электрооборудованием, в частности, могут приводить:

- работа под нагрузкой силовой и осветительной сетей при наличии неисправного электрооборудования;
- работа электрооборудования без присмотра и контроля;
- самостоятельный и, как следствие, неквалифицированный ремонт электрооборудования;
- включение электронагревательных и других приборов и устройств, не предусмотренных электрической схемой вагона;
- хранение посторонних предметов в нишах с электроаппаратурой, размещение легковоспламеняющихся предметов и материалов вблизи приборов отопления, электросветильников и других приборов, и устройств;

- эксплуатация электрооборудования с замыканием и утечкой тока на корпус вагона.

Важнейшей составляющей обеспечения пожарной безопасности пассажирских вагонов являются системы автоматики, которые дают возможность обнаруживать и ликвидировать пожары на ранних стадиях независимо от первоначальной причины. Для предотвращения возгораний, связанных с электрооборудованием вагонов, также дополнительно используют мониторинг пожароопасных состояний, который позволяет заблаговременно принимать предупредительные меры [11-92].

Проведенный анализ причин пожаров на подвижном составе железных дорог показал, что большинство из них возникают из-за искрения в элементах электрооборудования вагона, а существующие средства сигнализации и пожаротушения срабатывают по факту возникновения ПОС. Поиски причины занимают время на перегоне, а это приводит к нарушению графика движения поездов. Для обеспечения высокой надежности подвижного состава, сокращения времени поиска неисправностей и безопасной его работы необходимо проводить непрерывный контроль и диагностику пожароопасности элементов электрооборудования вагона поезда, как в пути следования, так и во время стоянок. Представленный анализ более 20 существующих методов и средств показал, что предложенные изобретения не эксплуатируются на подвижном составе железных дорог. Применяемая технология диагностики пожароопасности элементов электрооборудования вагона поезда приводит к значительной погрешности и как следствие к уже состоявшемуся факту возгорания, требует участия оператора для проверки параметров электрической сети.

На основе проведенного анализа необходимо совершенствовать технологию диагностики элементов электрооборудования вагона поезда. Основываясь на вышеизложенном, сформулированы дальнейшие задачи, решения которых осуществились в ходе выполнения настоящей диссертационной работы:

- предложить математическую модель обнаружения начала возникновения искрового разряда в элементах электрооборудования вагона поезда на осе

применения оптических технологий, в частности волоконно-оптического датчика обнаружения по признакам оптического излучения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн;

- разработать алгоритм и программно-технический комплекс (устройство) для диагностики и защиты от искрения (искровых разрядов) элементов электрооборудования вагона поезда с учетом существующих средств обнаружения, регистрации и преобразования оптического излучения (вспышек), образующегося в результате искрения с учетом существующей питающей системы поезда;

- предложить метод и способ диагностики в элементах электрооборудования вагона поезда, позволяющие оперативно анализировать и диагностировать состояние электросети и электрооборудования поезда на стоянках и на ходу движения;

- провести лабораторные и поездные экспериментальные исследования предложенных методов, способов и средств диагностики элементов электрооборудования вагона поезда.

1.5 Выводы по разделу 1

1 Рассмотрены основные причины возникновения пожаров на подвижном составе РЖД. Установлены наиболее уязвимые элементы электрооборудования пассажирского вагона подвижного состава. Проведён анализ возможностей существующих систем и устройств оценки, мониторинга, обнаружения и тушения пожаров, в том числе на пассажирском вагоне подвижного состава, а также применяемых в данных устройствах датчиков. Установлено, что наиболее опасной и распространённой причиной возгораний является искрение, образовавшееся от дугового разряда. Проанализированы существующие методы и способы оценки и мониторинга возникновения дугового разряда, в том числе на подвижном составе. Определено, что существующие методы и способы контроля

и диагностики дугового разряда не обеспечивают своевременную диагностику ПОС на раннем этапе её начала, особенно в пассажирском вагоне подвижного состава. Установлено, что использования известных моделей, приводит к появлению множественных вариантов сценария развития ПОС. Анализ существующих вариантов требует значительных программных и аппаратных ресурсов, не позволяет проводить раннюю диагностику и определить сценарий с максимальным риском. Установлено, что причиной возгорания также являются искровые разряды, которые не менее опасны, однако наряду с дуговыми разрядами мало заметны на фоне сопровождающих процесс возгорания помех.

2 Проведённый анализ существующих методов и устройств контроля, сигнализации и защиты электрических сетей и электрооборудования пассажирских вагонов подвижного состава показывает, что они не в полной мере обеспечивают заданную эффективность и безопасность, не решают задачи снижения риска пожароопасных состояний.

3 Требуется разработка современного метода контроля, мониторинга и диагностики пожароопасных состояний электрических сетей, применение данного метода позволит принимать предупредительные меры до возникновения возгораний в пассажирских вагонах.

4 Использование методов контроля и вскрытия начала возникновения искровых разрядов в элементах электрооборудования электрических сетей пассажирского вагона подвижного состава на основе применения оптических технологий - волоконно-оптического датчика представляется наиболее рациональным и перспективным подходом к решению задачи предупреждения ПОС в электрических сетях, так как их применение позволяет осуществить раннюю диагностику пожароопасных ситуаций независимо от внутреннего и внешнего состояния среды.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Значительная часть пожаров, возникающих в пассажирских вагонах, вызвана различного рода неисправностями электрических сетей. Такие неисправности могут приводить к электрическому пробое изоляции или воздушных промежутков между элементами цепи, находящимися под напряжением, и возгоранию прилегающих материалов и сред. Электрический пробой характеризуется внезапным образованием сильно ионизированного канала с низким сопротивлением, которое может в процессе пробоя уменьшиться до величины, соответствующей короткому замыканию. Особенно опасно развитие после пробоя мощных дуговых разрядов, с большой вероятностью вызывающих пожары и повреждения электрооборудования. В связи с этим в работах, исследующих пожароопасность в электрических сетях, много внимания уделяется обнаружению дуговых разрядов и защите от них. Однако гораздо менее мощные искровые разряды, не приводящие непосредственно к короткому замыканию, также создают опасность пожаров, особенно при наличии в воздухе горючих смесей — при попадании в него паров или мелкодисперсных частиц горючих веществ. Причины образования таких воздушных горючих смесей весьма разнообразны и определяются условиями эксплуатации вагонов, а также нарушением правил пожаробезопасности со стороны персонала и пассажиров [93-94].

Раздел 2 посвящен разработке методов оценки и мониторинга пожароопасности электрических дуговых и искровых разрядов в электрических сетях пассажирских вагонов с помощью волоконно-оптических датчиков.

В системе мониторинга пожароопасных состояний и возгораний электрооборудования пассажирских вагонов предлагается использовать признаки,

формируемые по оптическим излучениям, которые могут появляться и усиливаться в критических точках элементов электрооборудования при приближении к состоянию возгорания и самом возгорании. К таким излучениям относятся тепловые излучения и оптические излучения электрических разрядов (коронный, искровой, дуговой) [93-94].

Для ряда практических применений (в частности электрических сетей пассажирских вагонов) важным требованием является непрерывность контроля проводов по всей длине, включая труднодоступные места внутри объектов. Датчик, отвечающий указанному требованию, может быть выполнен, например, в виде оптического волокна, вплетенного в многопроволочную жилу провода, с расположенными на выходном конце волокна ФП и устройством обработки фотоэлектрического сигнала. Оптическое волокно осуществляет съём теплового излучения по всей длине токопроводящей жилы и его доставку на ФП. Пространственная зона чувствительности датчика является протяженной и распределена по длине провода.

2.1 Метод и модель обнаружения оптического излучения (оптической вспышки) искрового разряда по интенсивности излучения в видимом диапазоне длин волн на фоне нестационарных оптических помех

В настоящее время для раннего обнаружения возгораний в электрических сетях и электрооборудовании большое внимание уделяется разработке и применению волоконно-оптических систем защиты от дугового разряда.

Существующие волоконно-оптические датчики (оптические системы) без проблем обнаруживают оптические вспышки дуговых разрядов на фоне паразитной засветки от искусственного или естественного освещения в отличии от искровых разрядов. Световой поток вспышки маломощного искрового разряда распространяется на фоне аддитивных внешних оптических помех.

Для обнаружения оптической вспышки искрового разряда на фоне помех предлагается использовать метод двухканального интегрирования сигнала со следящим порогом [95-104].

Предлагаемый метод позволяет решить задачу обнаружения и оценки пожароопасности маломощных искровых разрядов в электрических сетях пассажирских вагонов на фоне нестационарных оптических помех от искусственного или естественного освещения с помощью волоконно-оптических датчиков в видимом диапазоне длин волн [95-104].

Метод обнаружения оптического излучения (оптической вспышки) искрового разряда по интенсивности излучения в видимом диапазоне длин волн на фоне нестационарных оптических помех [95-104] включает в себя следующие этапы:

- передача с помощью оптического волокна оптического излучения (оптических вспышек) на фотодетектор;
- преобразование значений параметров оптического излучения в электрический сигнал;
- двухканальная пороговая обработка выходного сигнала фотодетектора интеграторами со следящим порогом на фоне нестационарных оптических помех от искусственного или естественного освещения;
- формирование значения энергии вспышек, способных вызвать возгорание;
- формирование текущего значения суммарной энергии всех обнаруженных излучений;
- обработка значений энергии вспышек;
- формирование описания текущей пожароопасной ситуации;
- оценка состояния пожароопасной ситуации на основе обработки значений для принятия решений.

Обработка светового потока вспышки искры на фоне внешних нестационарных оптических помех от искусственного или естественного освещения осуществляется по двухканальной схеме следящего интегрирования выходного сигнала фотодетектора [95-104].

Схема волоконно-оптического устройства представлена на рисунке 2.1. Данный вариант волоконно-оптического устройства рекомендуется использовать совместно с оптическим волокном в технических системах подвижного состава для решения задач раннего мониторинга и прогнозирования возникновения пожароопасных ситуаций, сведения к минимуму причинение ущерба. Для обработки оптической вспышки разряда в элементах электрических сетей электрооборудования подвижного состава предлагается использовать обработку выходного сигнала фотодетектора со следящим порогом. Для реализации данного способа предлагается волоконно-оптическое устройство, в состав которого входят фотодетектор, два модуля интегрирования, компаратор, устройство сравнения и сумматор [95-104].

Интегратор 1 (I_1) и интегратор 2 (I_2) реализуют скользящее интегрирование выходного сигнала фотодетектора (ФД). Компаратор (К) пропускает импульсы, превышающие порог. Устройство сравнения (С) формирует на выходе (Выход 1) значения энергии вспышек $e_i \geq e_{min}$, способных вызвать возгорание. Сумматор (Σ) формирует на выходе (Выход 2) текущее значение суммарной энергии всех обнаруженных вспышек $E = \sum_i e_i$. Далее значения e_i , E обрабатываются устройством для принятия решений [100-109].

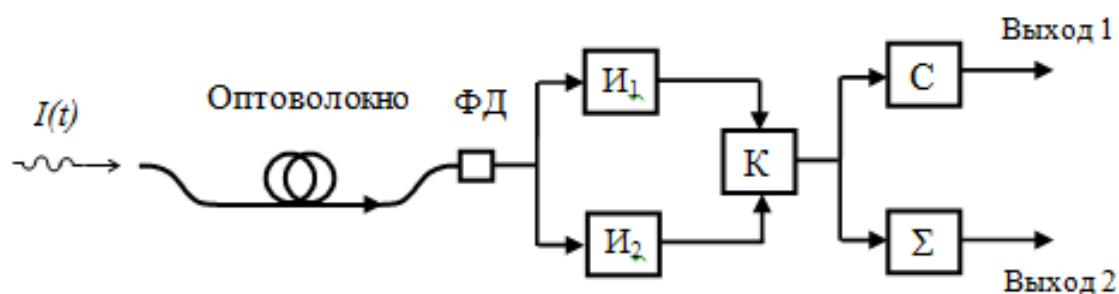


Рисунок 2.1 - Схема волоконно-оптического устройства

Данный вариант волоконно-оптического устройства целесообразно использовать совместно с оптическим волокном в технических системах подвижного состава для решения задач раннего мониторинга и прогнозирования возникновения пожароопасных ситуаций, сведения к минимуму причинение ущерба [95-104].

Новизна предлагаемого метода определяется этапом двухканальной обработки выходного сигнала оптической вспышки искрового разряда фотопреобразователя и пороговой обработкой выходного сигнала интеграторами со следящим порогом на фоне нестационарных оптических помех от искусственного или естественного освещения. Такие системы предпочтительнее использовать при обнаружении локальных повреждений электропроводки.

Модель оценки степени пожароопасности искровых разрядов в элементах электрооборудования пассажирского вагона [95-104].

Способность электрической искры к зажиганию горючих смесей (инициированию самоподдерживающейся реакции горения) согласно наиболее распространенной тепловой модели определяется общим количеством выделенного при разряде тепла q [28, 37-40]:

$$q = \int_0^{\tau_p} i^2(t)R(t)dt, \quad (2.1)$$

где τ_p – длительность разряда;

$i(t)$ - ток канала во время разряда;

$R(t)$ - сопротивление канала во время разряда.

Температура внутри искрового канала может достигать очень высоких значений (нескольких десятков тысяч градусов), однако из-за малой длительности искры (от единиц до десятков микросекунд) зажигание горючих смесей зависит от степени разогрева канала в момент разряда и динамики последующего рассеивания тепла из разогретой области. Для зажигания необходимо, чтобы в течение характерного времени τ_Γ температура в области искрового канала $T(t)$ превышала некоторую минимальную температуру горения T_Γ [95-104]. Типичные значения характерного времени составляют $\tau_\Gamma = 100 - 1000$ мкс, что много больше типичной длительности искрового разряда $\tau_p = 1 - 10$ мкс. Поэтому зажигающая способность искры слабо зависит от зависимостей тока $i(t)$ и сопротивления $R(t)$ в процессе разряда, а определяется при прочих равных условиях общим количеством выделенного при разряде тепла q . Если оно недостаточно велико, то за время τ_Γ разогретая разрядом область успевает

охладиться до температуры ниже T_f и горение не возникает. Соответственно, существует некоторая минимальная величина выделенной при искровом разряде тепловой энергии – энергии зажигания q_{min} , при превышении которой смесь загорается. В обычных условиях для большинства углеводородно-воздушных смесей $q_{min} = 0,2 - 0,4$ мДж, для аэродисперсных систем $q_{min} = 5 - 20$ мДж.

Кроме опасности зажигания постоянное или систематическое искрение в области контактирующих поверхностей вызывает изменение их электрических свойств, что в конечном итоге может быть причиной нарушений работы элементов электрических сетей, приводящих, в частности, к возрастанию контактных сопротивлений и, соответственно, недопустимо высокому повышению температуры вблизи контактов с прогрессирующим со временем разрушением изоляции [95-104].

Таким образом, степень пожароопасности искровых разрядов в каком-либо элементе электрооборудования следует оценивать по величине тепловыделения q единичного разряда и суммарному тепловыделению Q многократных разрядов за определенный интервал времени (например, за время эксплуатации или между профилактиками). Значение q характеризует зажигательную способность однократной искры, а значение Q – степень накапливающихся в процессе эксплуатации повреждений контактирующих поверхностей искровыми разрядами.

Определение тепловыделения искровых разрядов на основе выражения (2.1) является затруднительным из-за трудности регистрации электрических характеристик искры $i(t)$, $R(t)$. В связи с этим представляется перспективным использованием оптических датчиков, регистрирующих энергию световой вспышки искровых разрядов [95-104]. Будем предполагать, что известна (например, найдена путем калибровки) функциональная связь между тепловыделением искрового разряда и энергией сопутствующей ему световой вспышки, которая в простейшем случае имеет линейный вид. Тогда искровые

разряды, способные вызвать возгорание, характеризуются энергией оптической вспышки

$$e \geq e_{min} = \zeta q_{min} , \quad (2.2)$$

где ζ – коэффициент связи, найденный при калибровке.

Световая вспышка описывается зависимостью от времени светового потока $I(t)$, зарегистрировав который можно найти энергию вспышки и оценить

$$e = \int_0^{\tau_p} I(t) dt , \quad (2.3)$$

зажигающую способность разряда.

Модель преобразования потока оптического излучения в электрический сигнал на выходе фотодетектора.

Фотодетектор оптического датчика преобразует в электрический сигнал, падающий на него световой поток $I(t) \geq 0$ вспышки искры, принимаемый на фоне нестационарных оптических помех $n(t) \geq 0$ от искусственного или естественно освещения. Фотодетектор состоит из фотоприёмника и фотоусилителя [96-105].

Фотоприёмник реагирует на мощность оптического излучения, падающего на светочувствительную площадку. Рассматривается прием некогерентного оптического излучения и линейная модель фотоприёмника, в которой его выходной сигнал описывается выражением:

$$s_{fd}(t) = \mu_{fd} \cdot \int_{t'} P(t') h_{fd}(t - t') dt' , \quad (2.4)$$

где $P(t)$ – мощность оптического излучения, падающего на фотоприёмник;

$h_{fd}(t)$ – импульсная характеристика фотоприёмника;

μ_{fd} – чувствительность фотоприёмника.

В выражении (2.4), а также далее в аналогичных выражениях интегрирование по указанным переменным производится в бесконечных пределах.

Для учета зависимости выходных сигналов фотоприёмника от спектрального состава падающего света используется выражение:

$$s_{fd}(t) = \int_{t'} h_{fd}(t - t') dt' \int_{\lambda} \mu_{fd}(\lambda) S(t', \lambda) d\lambda, \quad (2.5)$$

где $S(t', \lambda)$ – спектральная плотность мощности оптического излучения, падающего на фотоприёмник;

$\mu_{fd}(\lambda)$ – спектральная чувствительность фотоприёмника.

Спектральная чувствительность фотоприёмника представлена в виде двух сомножителей:

$$\mu_{fd}(\lambda) = \mu_{fd0} V_{fd}(\lambda), \quad (2.6)$$

где μ_{fd0} – значение спектральной чувствительности фотоприёмника в максимуме; $V_{fd}(\lambda)$ – функция спектральной чувствительности фотоприёмника, равная 1 в максимуме.

Фотоусилитель, работающий в линейном режиме, характеризуется импульсной характеристикой $h_{fa}(t)$. Его выходной сигнал, определяется выражением:

$$s_{fr}(t) = \int_{t'} s_{fd}(t') h_{fa}(t - t') dt', \quad (2.7)$$

Импульсная характеристика фотодетектора, состоящего из фотоприёмника и фотоусилителя, определяется выражением:

$$h_{fr}(t) = \mu_{fd} \int_{t'} h_{fa}(t') h_{fd}(t - t') dt', \quad (2.8)$$

а с учетом спектральной чувствительности фотоприёмника:

$$h_{fr}(t, \lambda) = \mu_{fd}(\lambda) \int_{t'} h_{fa}(t') h_{fd}(t - t') dt'. \quad (2.9)$$

При использовании $h_{fr}(t, \lambda)$ выходной сигнал фотодетектора, состоящего из спектрально чувствительного фотоприёмника и фотоусилителя, равен:

$$s_{fr}(t) = \int_{t'} \int_{\lambda} h_{fr}(t - t', \lambda) S(t', \lambda) d\lambda dt'. \quad (2.10)$$

Выражения (2.4 – 2.10) описывают преобразование потока оптического излучения в электрический сигнал на выходе фотодетектора без учета и с учетом зависимости его чувствительности от длины волны [95-104].

Возможности обнаружения слабых оптических сигналов определяются собственным шумом фотодетектора. Он складывается из собственных шумов фотоприёмника и фотоусилителя. Собственный шум фотоприёмника пренебрежимо мал по сравнению с собственным шумом фотоусилителя, приведенным к его входу. В рабочей полосе частот данный шум считается белым со спектральной плотностью мощности $N_{\text{ш}fa0}$. Комплексная передаточная функция $K_{fa}(\omega)$, фотоусилителя связана фурье-преобразованием с импульсной характеристикой $h_{fa}(t)$:

$$K_{fa}(\omega) = \int_t h_{fa}(t) e^{-j\omega t} dt . \quad (2.11)$$

Спектральная плотность мощности шума на выходе фотоусилителя (и фотодетектора в целом) составит

$$N_{\text{ш}fa}(\omega) = N_{fa0} A_{fa}^2(\omega) , \quad (2.12)$$

где $A_{fa}(\omega) = |K_{fa}(\omega)|$ – амплитудно-частотная характеристика фотоусилителя, а средняя мощность шума

$$P_{\text{ш}fa} = P_{\text{ш}fr} = \int_{\omega} N_{\text{ш}fa}(\omega) d\omega . \quad (2.13)$$

В силу центральной предельной теоремы данный шум является гауссовским. Его математическое ожидание равно нулю, а среднеквадратическое отклонение

$$\sigma_{\text{ш}fr} = \sqrt{P_{\text{ш}fr}} . \quad (2.14)$$

Корреляционная функция шума на выходе ФП

$$B_{fr}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{\omega} N_{fa0} A_{fa}^2(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega . \quad (2.15)$$

Выражения (2.11 – 2.15) описывают свойства собственного шума ФП, определяемого собственным шумом фотоусилителя.

Модель пороговой обработки выходного сигнала интеграторами со следящим порогом.

Для борьбы с нестационарной оптической помехой предложено использовать двухканальную пороговую обработку выходного сигнала фотодетектора интеграторами со следящим порогом.

Если известны τ_{Pmax} - максимальная длительность оптических вспышек разрядов и τ_{Π} - характерное время изменения помехи, причем помеха является нестационарной $\tau_{\Pi} \gg \tau_{Pmax}$, то используем два канала интегрирования выходного сигнала ФП с временами интегрирования τ_1 и τ_2 , выбранных из условий

$$\begin{cases} \tau_1 = \tau_{Pmax} \\ \tau_1 \ll \tau_2 \ll \tau_{\Pi} \end{cases} , \quad (2.16)$$

Выходные сигналы 1-го и 2-го каналов определяются выражениями

$$s_{\tau_1}(t) = \int_{t-0.5\tau_1}^{t+0.5\tau_1} [I(t') + n(t')] dt' , \quad (2.17)$$

$$s_{\tau_2}(t) = \int_{t-0.5\tau_2}^{t+0.5\tau_2} [I(t') + n(t')] dt' , \quad (2.18)$$

Их разность, взятая в виде

$$s(t) = s_{\tau_1}(t) - \frac{\tau_1}{\tau_2} s_{\tau_2}(t) , \quad (2.19)$$

для квазистационарной помехи может быть представлена как

$$s(t) = s_I(t) + s_{\Pi}(t) , \quad (2.20)$$

где

$$s_I(t) = \int_{t-0.5\tau_1}^{t+0.5\tau_1} I(t') dt' - \frac{\tau_1}{\tau_2} \int_{t-0.5\tau_2}^{t+0.5\tau_2} I(t') dt' , \quad (2.21)$$

$$s_{\Pi}(t) = \int_{t-0.5\tau_1}^{t+0.5\tau_1} n(t') dt' - \frac{\tau_1}{\tau_2} \int_{t-0.5\tau_2}^{t+0.5\tau_2} n(t') dt' . \quad (2.22)$$

Сигнальная составляющая $s_I(t)$ с учетом выражения (2.20) и условий (2.16) достигает максимально значения

$$s_{I\max} = e - \frac{\tau_1}{\tau_2} e \approx e, \quad (2.23)$$

а помеховая составляющая $s_{II}(t)$ значительно уменьшается и равна нулю при изменении помехи $n(t)$ по линейному закону.

Для обнаружения оптической вспышки разряда и оценки ее энергии на фоне нестационарных оптических помех используется пороговая обработка выходного сигнала 1-го интегратора $s_{\tau_1}(t)$ со следящим порогом, формируемым на основе выходного сигнала 2-го интегратора $s_{\tau_2}(t)$:

$$\Pi(t) = s_{\tau_2}(t) + \delta, \quad (2.24)$$

где δ - постоянная составляющая следящего порога, выбираемая исходя из заданной вероятности ложных обнаружений оптических вспышек.

Энергия оптической вспышки, требуемая для оценки зажигательной способности разряда, определяется как максимум сигнала (2.20) при обнаружении вспышки. Разряды, обладающие зажигательной способностью, характеризуются энергией $e \geq e_{\min}$. Накапливающиеся из-за разрядов повреждения характеризуются суммарной энергией всех обнаруженных вспышек $E = \sum_i e_i$, i – порядковый номер вспышки [95-104].

2.2 Метод и модель определения текущей температуры в контролируемой области электропроводки на основе анализа спектра теплового излучения инфракрасного диапазона длин волн

Сегодня основное внимание уделяется разработке оптических систем защиты от дугового короткого замыкания, сопровождающегося открытой электрической дугой. Однако, наряду с дуговыми разрядами, особую опасность для возникновения пожароопасных состояний в электрических сетях представляют менее мощные искровые разряды, кроме того такие системы

предпочтительнее использовать при обнаружении локальных повреждений электропроводки. Для обнаружения повреждений электропроводки по всей длине провода в труднодоступных местах внутри конструкций пассажирских вагонов предлагается использовать метод на основе анализа спектра теплового излучения провода в двух (или более) спектральных каналах, формируемых волоконными брэгговскими решетками [105-114].

Суть метода заключается в регистрации изменения формы спектра теплового излучения в зависимости от температуры.

Метод позволяет осуществить контроль пожароопасных состояний электрических сетей по тепловому излучению в инфракрасном диапазоне длин волн из мест повреждения проводов, сопровождающихся повышенным тепловыделением.

Таким образом, решается задача контроля пожароопасности электрических сетей пассажирских вагонов с помощью волоконно-оптического устройства по тепловому излучению проводов [105-114].

Метод включает в себя следующие этапы:

- передача теплового оптического излучения (описывается зависимостью от времени спектральной плотности мощности) электропроводки с помощью оптического волокна, находящегося с ней в оптическом контакте;
- анализ спектра теплового излучения провода в двух (или более) спектральных каналах, формируемых волоконными брэгговскими решетками;
- формирование отсчётов спектральной плотности мощности на выбранных для анализа длинах волн в виде выходных сигналов ФП спектральных и интегрального каналов;
- оценка мощности теплового излучения участка провода;
- определение текущей температуры в контрольной области электропроводки;
- оценка текущего уровня опасности возгорания в контрольной области электропроводки.

Важным требованием безопасности функционирования электрических сетей пассажирских вагонов является непрерывность контроля проводов по всей длине, включая труднодоступные места внутри объектов. Датчик, отвечающий указанному требованию, может быть выполнен, например, в виде оптического волокна, вплетенного в многопроволочную жилу провода, с расположенными на выходном конце волокна ФП и устройством обработки фотоэлектрического сигнала. Оптическое волокно осуществляет съем теплового излучения по всей длине токопроводящей жилы и его доставку на ФП. Пространственная зона чувствительности датчика является протяженной и распределена по длине провода. Повышение температуры токопроводящей жилы в местах повреждений проводов обуславливает увеличение мощности теплового излучения и смещение его спектра в коротковолновую область, что потенциально может использоваться для формирования признаков обнаружения повреждений и оценки пожароопасных состояний электропроводки [105-114].

При прохождении тока выделяемое в проводах тепло рассеивается вдоль жилы и через слой изоляции в окружающее пространство. Если повреждения отсутствуют, то устанавливается некоторое относительно равномерное распределение температуры вдоль токопроводящей жилы. Типичное значение температуры в рабочем режиме может составлять примерно до 60 – 80 °С в зависимости от величины протекающего тока и температуры окружающей среды. В рабочем режиме спектр собственного теплового излучения токопроводящей жилы находится в инфракрасном диапазоне с максимумом вблизи длины волны 10 мкм.

Возникающее по каким-либо причинам повреждение проводов сначала имеет локальный характер и не вызывает немедленного возгорания. Проводящий канал, образовавшийся в окружающей жилу изоляции, постепенно все более обугливается и разрастается под действием токов утечки. В таком «угольном мостике» в какой-то момент времени возникает тлеющий разряд, а через некоторое время - электрическая дуга, которая может привести к возгоранию. Обнаружение повреждений проводов на ранних стадиях, предшествующих

электрической дуге, позволит заблаговременно выявлять пожароопасные состояния электропроводки и снижать риск возникновения пожаров [105-114].

Контроль температуры электропроводки для раннего выявления повреждений может осуществляться с помощью инфракрасных пирометров или тепловизоров, что, однако, требует оптической доступности контролируемых участков электрических сетей. Предлагаемый метод на основе волоконно-оптического датчика не требует такой доступности и пригоден для осуществления непрерывного контроля состояния электрических проводов в труднодоступных местах внутри конструкций технических объектов пассажирского вагона подвижного состава [105-114].

Предполагается, что система с таким датчиком сможет определять текущую температуру в контрольной области, наличие в ней электрических разрядов, их тип, длительность и мощность. Предполагается, что найденные характеристики позволят оценивать текущий уровень опасности возгорания и обнаруживать возгорание в случае его возникновения.

Для реализации данного метода предлагается вариант волоконно-оптического устройства, построенного по трёхканальной схеме с двумя спектральными каналами и одним интегральным, в состав которого включены отрезки оптического волокна с двумя брэгговскими решетками, двумя фотоприёмниками, двумя оптическими циркуляторами, устройством обработки и сравнения данных и обеспечивающего на основании математических расчётов, определение коэффициента отношения мощностей теплового излучения в спектральных каналах для выработки решения о начале процесса возгорания [105-114].

Схема волоконно-оптического устройства представлена на рисунке 2.2.

Для обнаружения локальных повреждений электропроводки в электрических сетях вагонов пассажирского состава предлагается использовать регистрацию теплового излучения провода в двух спектральных каналах на основе применения волоконных брэгговских решеток.

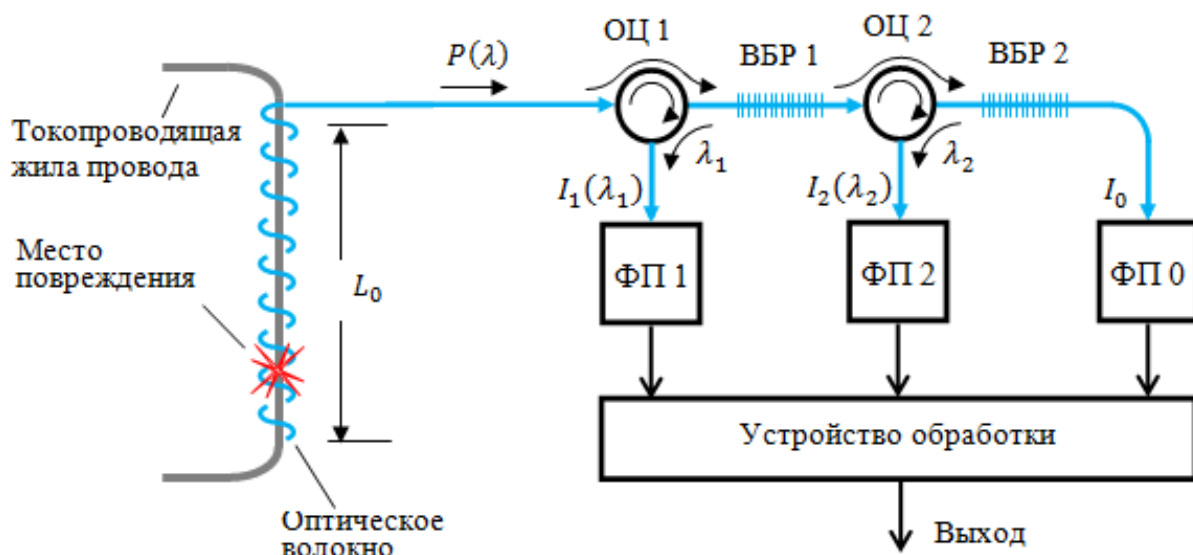


Рисунок 2.2 - Схема волоконно-оптического устройства

Оптическое волокно встроено в контролируемый провод вдоль всей его длины. Собранное тепловое излучение со спектральной плотностью мощности ($P(\lambda)$) направляется на оптические циркуляторы (ОЦ 1), (ОЦ 2) и отрезки оптического волокна с волоконными брэгговскими решетками (ВБР 1), (ВБР 2). ВБР являются спектрально-селективными отражательными фильтрами, что требует применения оптических циркуляторов для вывода оптического излучения спектральных каналов. Электрические сигналы интегрального и двух спектральных каналов формируются ФП (ФП 0, 1, 2). Устройство обработки находит коэффициент μ - мощностей теплового излучения на двух длинах волн λ_1 , λ_2 и с учетом полной мощности теплового излучения – оценку максимальной температуры в области пожароопасных повреждений проводов [105-114].

На рисунке 2.3 представлено относительное изменение спектральной светимости абсолютно черного тела (2.30) при изменении температуры от 25 до 250 °С. Видно, что наиболее существенно спектральная светимость возрастает в коротковолновой части спектра в диапазоне 1 – 5 мкм.

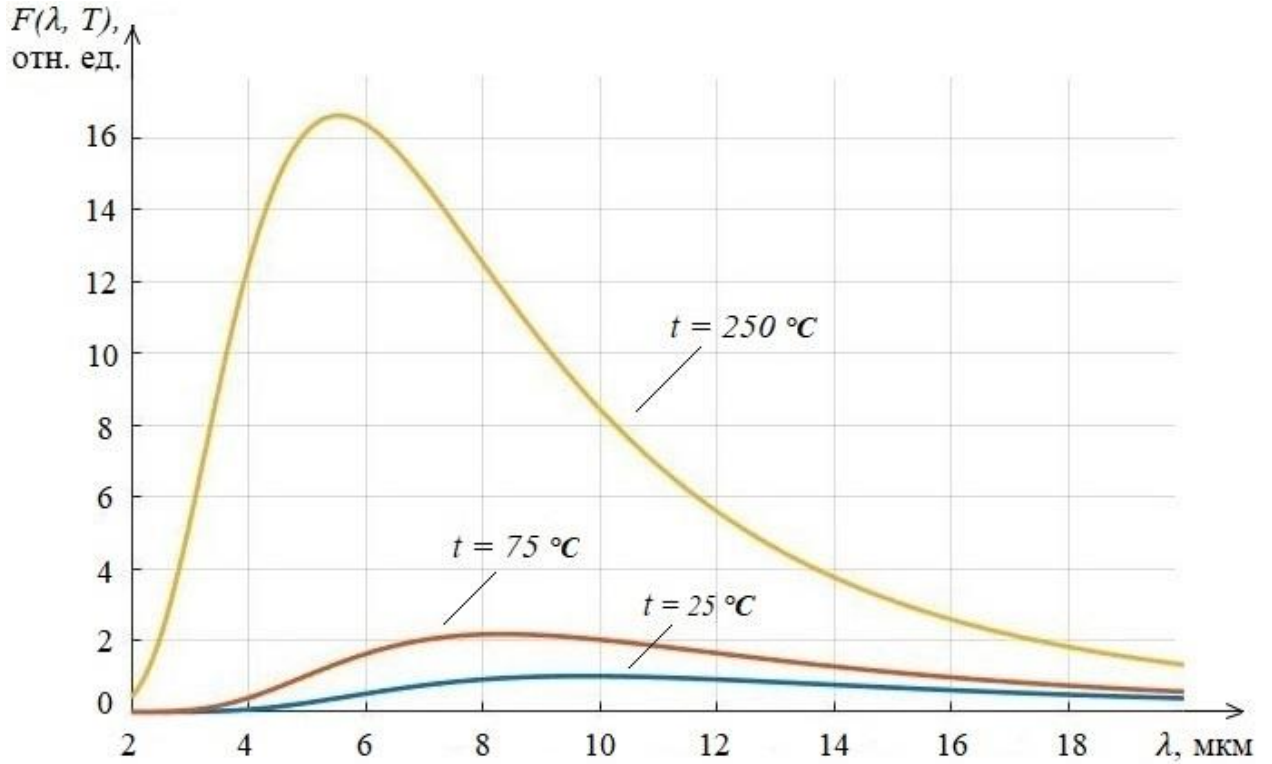


Рисунок 2.3 - Относительное изменение спектральной светимости абсолютно черного тела при изменении температуры от 25 до 250 °C

Модель устройства, функционирующего в соответствии с предложенным методом.

Тепловое излучение, собранное оптоволоком, регистрируется в двух спектральных каналах в диапазонах длин волн $(\lambda_1, \lambda_1 + \Delta\lambda_1)$ и $(\lambda_2, \lambda_2 + \Delta\lambda_2)$.

Отношение мощностей излучения в спектральных каналах составит

$$\mu = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_2 + \Delta\lambda_2} \int_0^{L_0} F[\lambda, T(x)] \varepsilon[\lambda, T(x)] dx d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_1 + \Delta\lambda_1} \int_0^{L_0} F[\lambda, T(x)] \varepsilon[\lambda, T(x)] dx d\lambda}. \quad (2.25)$$

Ширины спектральных каналов $\Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2$ относительно невелики и в их пределах зависимостями спектральных светимости $F(\lambda, T)$ и степени черноты $\varepsilon(\lambda, T)$ от длины волны λ можно пренебречь. В рассматриваемом диапазоне температур спектральная степень черноты слабо зависит от температуры. С учётом этого μ :

$$\mu = \frac{\varepsilon(\lambda_2, T_0) \Delta\lambda_2 \int_0^{L_0} F[\lambda_2, T(x)] dx}{\varepsilon(\lambda_1, T_0) \Delta\lambda_1 \int_0^{L_0} F[\lambda_1, T(x)] dx}, \quad (2.26)$$

Для случая одиночного локального повреждения примем следующую модель распределения температуры вдоль провода длиной L_0 электрической сети. Пусть в рабочем режиме температура токопроводящей жилы провода одинакова вдоль ее длины и равна T_0 . Локальное повреждение будем рассматривать как «горячую» точку с тепловыделением, обусловленным током утечки. Температура T_m в точке повреждения максимальна и спадает из-за рассеивания тепла вдоль провода по мере удаления от нее на характерной длине спада температуры $\Delta L \ll L_0$. Значение температуры T_m может рассматриваться как показатель пожароопасности повреждения провода. При однородности условий рассеивания мощности, выделяемой в точке повреждения, для установившегося стационарного теплового режима можно приближенно считать, что зависимость температуры жилы от координаты x имеет экспоненциальный вид:

$$T(x) = T_0 + \Delta T_m e^{\left(\frac{-|x-L|}{\Delta L}\right)}, \quad (2.27)$$

где $\Delta T_m = T_m - T_0$ – максимальное превышение температуры в области повреждения над рабочей температурой токопроводящей жилы.

В модели (2.26) предполагается, что точка повреждения находится достаточно далеко от концов провода $L \gg \Delta L$, $L_0 - L \gg \Delta L$ и краевые эффекты при распределении теплового потока можно не учитывать [105-114].

Модель распределение температуры при отсутствии повреждения и наличии локального повреждения.

Пусть при отсутствии повреждения в рабочем режиме устанавливается равномерное распределение температуры $T(x) = T_0$, где T_0 зависит от величины протекающего тока и температуры окружающей среды. Распределение температуры $T(x)$ при наличии локального повреждения описывается моделью $T(x) = T > T_0$ при $L < x < L + \Delta L$; $T(x) = T_0$ при остальных x , где L – координата начала участка с повышенной температурой T , ΔL – его длина.

Для случая одиночного локального повреждения принимается следующая модель распределения температуры вдоль провода длиной L_0 электрической сети. В рабочем режиме температура токопроводящей жилы провода одинакова вдоль

ее длины и равна T_0 . Локальное повреждение рассматривается как «горячая» точка с тепловыделением, обусловленным током утечки. Температура T_m в точке повреждения максимальна и спадает из-за рассеивания тепла вдоль провода по мере удаления от нее на характерной длине спада температуры $\Delta L \ll L_0$. Значение температуры T_m рассматривается как показатель пожароопасности повреждения провода. При однородности условий рассеивания мощности, выделяемой в точке повреждения, для установившегося стационарного теплового режима приближенно считается, что зависимость температуры жилы от координаты x имеет экспоненциальный вид:

$$T(x) = T_0 + \Delta T_m e^{\left(\frac{-|x-L|}{\Delta L}\right)}, \quad (2.28)$$

где $\Delta T_m = T_m - T_0$ – максимальное превышение температуры в области повреждения над рабочей температурой токопроводящей жилы.

В модели (2.27) точка повреждения находится достаточно далеко от концов провода $L \gg \Delta L$, $L_0 - L \gg \Delta L$ и краевые эффекты при распределении теплового потока не учитываются.

Предложена модель изменения мощности теплового излучения в коротковолновой части спектра [106-115].

Вдоль жилы провода имеется распределение температуры $T(x)$, где x – продольная координата, $0 \leq x \leq L_0$. Токопроводящая жила считается тонкой (поперечные размеры много меньше длины L_0), а распределение температуры в ее сечении однородным.

Элементарная площадка поверхности dS , находящаяся при температуре T , создает тепловое излучение со спектральной плотностью мощности

$$dP(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) F(\lambda, T) dS, \quad (2.29)$$

где λ – длина волны;

T – температура по шкале Кельвина, связанная с температурой t по шкале Цельсия соотношением $T = 273,16 + t$;

$F(\lambda, T)$ – спектральная светимость абсолютно черного тела;

$\varepsilon(\lambda, T)$ – спектральная степень черноты материала проводника.

Составной множитель $\varepsilon(\lambda, T) F(\lambda, T)$ в выражении (2.29) является спектральной светимостью материала токопроводящей жилы (обычно алюминий или медь).

Спектральная светимость абсолютно черного тела $F(\lambda, T)$ определяется выражением

$$F(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(-hc/k\lambda T)} - 1}, \quad (2.30)$$

где h – постоянная Планка,

c – скорость света;

k – постоянная Больцмана.

Спектральная степень черноты $\varepsilon(\lambda, T)$ для металлов имеет значения от 0,1 до 0,3 и возрастает с увеличением температуры и уменьшением длины волны.

Мощность теплового излучения, попадающего на ФП в спектральном диапазоне $(\lambda, \lambda + \Delta\lambda)$, равна

$$P = \chi b \int_{\lambda}^{\lambda + \Delta\lambda} \int_0^{L_0} F[\lambda, T(x)] \varepsilon[\lambda, T(x)] dx d\lambda, \quad (2.31)$$

где χ – безразмерный коэффициент связи, характеризующий долю излучения жилы, попадающего на ФП;

b – коэффициент с размерностью длины, по смыслу соответствующий поперечному размеру области контакта жилы с оптическим волокном.

Найдем величину увеличения полной мощности теплового излучения, попадающего на ФП, при появлении локального повреждения провода. Для этого в выражении (3.31) проводим интегрирование по всем длинам волн при заданных распределениях температур $T(x)$ и спектральной степени черноты $\varepsilon(\lambda, T)$. Однако из-за отсутствия полных данных о поведении $\varepsilon(\lambda, T)$ для материалов токопроводящих жил в требуемых диапазонах длин волн и температур используем приближенную оценку на основе формулы для светимости абсолютно черного тела $F(T) = \sigma T^4$, σ – постоянная Стефана-Больцмана [105-114].

При отсутствии повреждения в рабочем режиме устанавливается равномерное распределение температуры $T(x) = T_0$, где T_0 зависит от величины протекающего тока и температуры окружающей среды. Распределение температуры $T(x)$ при наличии локального повреждения описывается моделью $T(x) = T > T_0$ при $L < x < L + \Delta L$; $T(x) = T_0$ при остальных x , где L – координата начала участка с повышенной температурой T , ΔL – его длина. При предположении о слабой зависимости спектральной степени черноты материала $\varepsilon(\lambda, T)$ токопроводящей жилы от длины волны и температуры полная мощность теплового излучения провода без и при наличии повреждения составляет $P_0 = \chi b \varepsilon \sigma T_0^4 L_0$ и $P = \chi b \varepsilon \sigma [T_0^4 (L_0 - \Delta L) + T^4 \Delta L]$ соответственно, а относительное увеличение

$$\nu = \frac{P}{P_0} = 1 + \left[\left(\frac{T}{T_0} \right)^4 - 1 \right] \frac{\Delta L}{L_0} . \quad (2.32)$$

Диапазоны длин волн спектральных каналов следует выбрать таким образом, чтобы по изменению величины μ можно было обнаружить появление «горячего» участка провода вблизи места повреждения.

Отличие предлагаемого метода и устройства от известных заключается в обнаружении повреждённых участков электропроводки путём анализа спектра теплового излучения провода в двух (или более) спектральных каналах, формируемых волоконными брэгговскими решетками и формировании отсчётов спектральной плотности мощности на выбранных для анализа длинах волн в виде выходных сигналов ФП спектральных и интегрального каналов.

Предложенный вариант представляется перспективным использовать в технических системах пассажирского подвижного состава для решения задачи раннего прогнозирования возникновения возгораний электропроводки. Такие системы предпочтительнее использовать при обнаружении повреждений электропроводки по всей длине провода [105-114].

2.3 Выводы по разделу 2

1 Используемые в эксплуатационной работе ОАО «РЖД» методы, способы и средства диагностики пожароопасных состояний в элементах электросети пассажирского вагона не позволяют полностью исключить и выявить пожароопасное состояние на ранней стадии его развития.

2 Выполнена разработка методов и моделей мониторинга пожарной безопасности элементов электрических сетей, включающих этапы обнаружения оптических вспышек искрового разряда в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн по признакам относящихся к ненаблюдаемым параметрам электрической сети и отличающихся возможностью учета и анализа тенденций развития пожароопасных состояний. Разработанные методы базируются на моделях мониторинга противопожарной ситуации по признакам в оптическом диапазоне длин волн на основе применения волоконно-оптических технологий.

3 Новизна моделей обнаружения (оценки и мониторинга) пожароопасных состояний в элементах электрооборудования пассажирского вагона заключается в регистрации, преобразовании и обработке величин оптических вспышек искрового разряда в видимом диапазоне волн, а также регистрации и обработки величин сигналов оптического излучения в инфракрасном диапазоне волн, характеризующем процесс повышения рабочей температуры в месте возникновения разряда.

4 Предложенные методы и способы оценки и контроля пожароопасных состояний на основе применения волоконно-оптических датчиков для обнаружения оптического излучения по параметрам, регистрируемым в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн позволяют диагностировать возникновение искрения на ранней стадии.

3 СТРУКТУРНАЯ И ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

3.1 Обзор и выбор типов датчиков для получения достоверной текущей информации о степени пожароопасности электрических сетей пассажирского вагона

Анализ существующих методов, устройств и принципов измерения параметров электрических сетей определил перечень датчиков, обеспечивающих получение наиболее информативных признаков состояния пожароопасности электрических сетей и элементов подключения конечных потребителей [46, 53-56, 95-97, 104, 109, 113-114]. К таким датчикам относятся:

- датчики измерения параметров электрической сети (значений электрического тока, напряжения и сопротивления);
- датчики измерения температуры или давления;
- искровые датчики;
- волоконно-оптические датчики.

В качестве датчика для контроля температуры широко используются термосопротивления, обеспечивающие непрерывное измерение температуры различных рабочих, в том числе контактных и проводных сред, не агрессивных к материалу корпуса датчика. Принцип действия термосопротивления основан на свойстве проводника изменять электрическое сопротивление с изменением температуры окружающей среды.

Для получения информации о наличии искрения используются искровые датчики. В настоящее время применяют датчики, обнаруживающие искрение на очень ранней стадии, обнаруживают первый пиковый импульс искрения. Существует вид подключения искрового датчика, когда падение (или изменение)

тока обнаруживается с помощью контура, размещенного на токоведущих линиях питающей электросети [46, 53-56, 95-97, 104, 109, 113-114].

Тем не менее сами разработчики искровых датчиков считают необходимым проводить дальнейшие исследования в этой области с целью создания датчиков с более высокими чувствительностью, разрешением и достоверностью [52, 59-62, 100-102, 109, 113, 118].

В настоящее время датчики обеспечивают измерения:

- переменного напряжения и тока, активной, реактивной и полной мощности, $\cos\phi$, $\tan\phi$, ϕ , частоты, активной, реактивной и полной энергии, средней активной мощности за 15-минутный интервал;
- среднего напряжения за 10-минутный интервал;
- частоты за 10 секундный интервал [46, 53-56, 95-97, 104, 109, 113-114].

Основные недостатки датчиков обнаружения электрической дуги:

- расположение антенного датчика и температурного термодатчика вблизи места короткого замыкания;
- реакция клапанного датчика на последствия дуги, а не на саму дугу;
- риск ложных срабатываний оптических датчиков (для части датчиков), но есть преимущество - высокое быстродействие.

Применение волоконно-оптического датчика для обнаружения оптического излучения вспышки электрической дуги на сегодняшний день является одним из наиболее эффективных и перспективных решений.

Современные оптические датчики различаются по способу установки [46, 53-56, 95-97, 104, 109, 113-114]. Полупроводниковый фотодатчик устанавливается непосредственно в элементах электрооборудования, например, в шкафу. Недостатком такой конструкции является то, что электронные компоненты и линии связи располагаются в рабочей зоне, а значит, подвержены воздействиям сильных электромагнитных помех. Для устранения этих нежелательных воздействий целесообразно применять волоконно-оптический датчик (ВОД), который состоит из пассивного элемента, осуществляющего захват оптического излучения и оптоэлектронной части, которая выводится за пределы. Передача

сигнала от собирающего элемента к ФП происходит по оптическому волокну, которое не подвержено влиянию электромагнитных помех. Захват оптического излучения выполняется при помощи устройства на основе линзы или же отрезка оптического волокна в прозрачной оболочке. Фотодатчики и линзовые ВОД называют также точечными датчиками, поскольку они регистрируют оптическое излучение в ограниченном телесном угле. ВОД на основе собирающего волокна реализуют захват излучения поверхностью волокна по всей его длине, поэтому называются линейными датчиками [46, 53-56, 95-97, 104, 109, 113-114]. Один линейный датчик может быть установлен сразу в нескольких элементах электрооборудования или шкафах. В некоторых случаях используются оба подхода. Сравнение основных параметров точечного и линейного датчиков приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Основные параметры точечного и линейного датчиков

Сравниваемый параметр	Линейный датчик	Точечный датчик
Риск затенения	нет	есть
Чувствительность	ниже, чем у точечного	высокая
Возможность работы с несколькими отсеками	есть	нет
Точность определения места возникновения электрической дуги	низкая	высокая

Основные требования к применению ВОД:

- выбор типа ВОД. Целесообразно использовать оба типа датчиков;
- выбор собирающего элемента ВОД (используется волокно с большим диаметром сердцевины пластиковое (POF) или HCS-волокно);
- расположение собирающих элементов (необходимо обеспечить контроль всех частей элементов электрооборудования, в которых возможно возникновение дугового КЗ;
- выбор ФП (спектральная характеристика используемого ФП должна перекрывать спектр излучения вспышки, ФП также должен иметь достаточную пороговую чувствительность;

- диагностика работоспособности; (применение тестового сигнала, периодически посылаемого к ФП от передатчика, специально устанавливаемого в датчик) [46, 53-56, 95-97, 104, 109, 113-114];

- настройка пороговых значений, (устройство должно уметь отличать сигнал, вызываемый электрической дугой, от тестового сигнала и излучения других источников света);

- быстродействие (время срабатывания защиты от дугового замыкания складывается из времени срабатывания устройств обнаружения и времени срабатывания выключателя, важную роль играет собственное время срабатывания оптического датчика).

Поэтому вопрос проектирования новых систем и модернизации существующих остается актуальным. Создание систем защиты от электрической дуги, включающих волоконно-оптические датчики на основе компонентов Avago, на данный момент представляется одним из наиболее эффективных решений [46, 53-56, 95-97, 104, 109, 113-114].

Регистрирование оптического излучения электрической дуги позволяет повысить быстродействие любой системы защиты. Оптическое излучение идеально подходит для систем обнаружения электрической дуги, потому что распространяется с очень большой скоростью. Благодаря этому уменьшается общее время срабатывания системы. Кроме того, оптическое излучение не восприимчиво к сильному электромагнитному излучению, которое характерно для мест, в которых устанавливается система.

Основными недостатками существующих волоконно-оптических датчиков являются:

- регистрируется мощный дуговой разряд и не обеспечивается обнаружение маломощных искровых разрядов на фоне внешних помех;
- определяется уже состоявшийся факт возгорания;
- нет раннего прогнозирования начала возникновения пожароопасного состояния участка электрооборудования;
- используется импортная элементная база.

3.2 Разработка функциональной схемы системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов

Система оценки пожароопасных состояний в критически важных элементах электрооборудования пассажирских вагонов (искровых и микро-дуговых разрядов, точек повышенного нагрева изоляции) функционально объединяет в себе средства передачи, преобразования, интегрирования, обработки оптических и тепловых излучений электрических разрядов, пороговое устройство, устройство сравнения уровней сигналов, оптические фильтры, средства диагностики и тестового контроля работоспособности оптических систем, средства сбора и обработки цифровых данных, отображения, программные средства, базы данных и знаний, формирования рекомендаций для принятия решения оператором и выдаче команд исполнительным устройствам.

Система оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей (СОЗЭС) ПВ предназначена для анализа процессов, сопровождающих электрические разряды: регистрации оптического и теплового излучений электрических разрядов видимого и инфракрасного диапазонов длин волн, определения мощности сигнала, контроля параметров сигналов и оценки текущего уровня опасности возгорания в элементах электрических сетей пассажирских вагонов [104, 113-114].

Функциональная схема СОЗЭС определяется назначением технических средств и особенностями её функционирования, а также требованиями по измерению характеристик электрических разрядов в электропроводке ПВ.

В соответствии с построенной вербальной моделью функционирования СОЗЭС состоит из трёх основных этапов:

- передача оптического и теплового излучений электропроводки ПВ оптическим датчиком или оптическим волокном, передача сигнала от оптического датчика по оптоволокну к фотодетектору;
- обнаружение оптического излучения по интенсивности в видимом

диапазоне (преобразование оптического излучения в электрический сигнал, определение порогового значения сигнала, определение уровня паразитных помех, определение значений импульсов, соответствующих обнаруженным оптическим вспышкам и линейно зависящим от мощности оптического излучения), обнаружение теплового излучения электропроводки по спектральному составу в инфракрасном диапазоне длин волн, тестирование работоспособности оптических устройств;

- определение места возникновения электрического разряда, формирование управляющего сигнала исполнительному устройству, расчёт значений сигналов, соответствующих значениям энергии оптического излучения.

В состав СОЗЭС входят [105, 109, 114-115]:

- подсистема обнаружение оптических излучений искровых разрядов по их интенсивности в видимом диапазоне длин волн;
- подсистема обнаружение тепловых излучений электрических разрядов по спектральному составу в инфракрасном диапазоне длин волн;
- подсистема сбора, обработки и отображения.

Обобщённая функциональная схема СОЗЭС, обеспечивающего работу в соответствии с вышеизложенным представлена на рисунке 3.1.

Подсистема обнаружение оптических излучений искровых разрядов по интенсивности в видимом диапазоне длин волн функционально решает следующие задачи:

- передача светового потока $I(t)$;
- преобразование светового потока $I(t) \geq 0$ вспышки искры в электрический сигнал, принимаемый на фоне нестационарных оптических помех $n(t) \geq 0$ от искусственного или естественно освещения;
- интегрирование выходного сигнала;
- пороговая обработка выходного сигнала 1-го интегратора $s_{\tau 1}(t)$ со следящим порогом, формируемым на основе выходного сигнала 2-го интегратора $s_{\tau 2}(t)$:

$\Pi(t) = s_{\tau 2}(t) + \delta$, где δ - постоянная составляющая следящего порога, выбираемая исходя из заданной вероятности ложных обнаружений оптических вспышек;

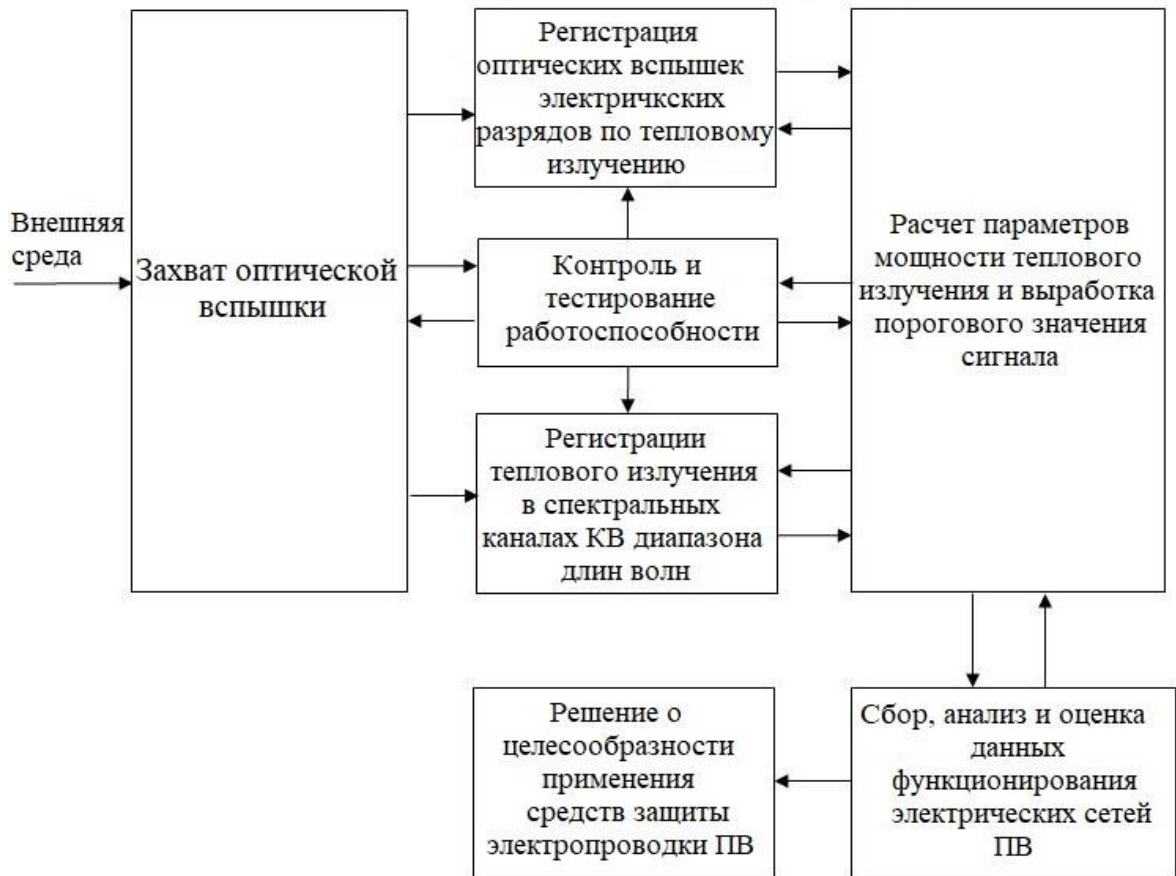


Рисунок 3.1 — Обобщённая функциональная схема СОЗЭС

- определение максимума сигнала при обнаружении вспышки (энергии оптической вспышки e);
- оценка зажигательной способности разряда $e \geq e_{min}$.
- оценка суммарной энергией всех обнаруженных вспышек $E = \sum_i e_i$, i – порядковый номер вспышки.

Функциональная схема составной части СОЗЭС, обеспечивающей работу в соответствии с вышеизложенным представлена на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2 — Функциональная схема составной части СОЗЭС, обеспечивающего обнаружение по интенсивности в видимом диапазоне оптического излучения

Подсистема обнаружение тепловых излучений электрических разрядов по спектральному составу в инфракрасном диапазоне длин волн функционально решает следующие задачи:

- передача теплового излучения со спектральной плотностью мощности $P(\lambda)$;
- регистрация теплового излучения, собранного оптоволоконном, в двух спектральных каналах в диапазонах длин волн $(\lambda_1, \lambda_1 + \Delta\lambda_1)$ и $(\lambda_2, \lambda_2 + \Delta\lambda_2)$;
- преобразование светового потока двух спектральных $I_1(\lambda_1)$, $I_2(\lambda_2)$ и интегрального I_0 каналов в электрические сигналы;
- расчёт отношения мощностей излучения в спектральных каналах μ ;

- сравнение измеренного значения μ с порогом $\mu_{\text{пор}}(t_0)$, зависящего от текущего значения рабочей температуры провода.

Алгоритм обнаружения заключается в выработке порога $\mu_{\text{пор}}(t_0)$, зависящего от текущего значения рабочей температуры провода, и сравнении измеренного значения μ с порогом. Функциональная схема составной части СОЗЭС, обеспечивающая обнаружение по спектральному составу в инфракрасном диапазоне, представлена на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 — Функциональная схема составной части СОЗЭС, обеспечивающего обнаружение оптического излучения по спектральному составу в инфракрасном диапазоне

Подсистема сбора, обработки и отображения функционально решает следующие задачи: определение места возникновения электрического разряда, формирование управляющего сигнала исполнительному устройству, расчёт значений сигналов, соответствующих значениям энергии оптического излучения [104, 113-114].

3.3 Разработка и обоснование структурной схемы системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов

В соответствии с методологией общей теории систем, структурная схема СОЗЭС включает в себя состав и связи между элементами и подсистемами, соответствующими выше изложенным функциям [104, 113-114].

Таким образом, в состав СОЗЭС входят:

- устройства обнаружения искрения в элементах электрооборудования (точечные и линейные волоконно-оптические датчики, оптоволокно со встроенными брэгговскими решётками);
- устройства регистрации и преобразования энергии оптического и теплового излучений в электрический сигнал;
- специальное программное обеспечение для определения характеристик и значений сигналов, соответствующих мощности теплового излучения, база данных;
- устройства хранения, обработки и отображения данных на базе компьютерных средств, а также выработки рекомендаций по эффективному использованию средств отключения питания электрооборудования и пожаротушения.

Обобщённая структурно-функциональная схема СОЗЭС представлена на рисунке 3.4.



Рисунок 3.4 — Обобщённая жилыструктурно-функциональная схема
СОЗЭС

Вариант структурной схемы СОЗЭС представлен на рисунке 3.5.

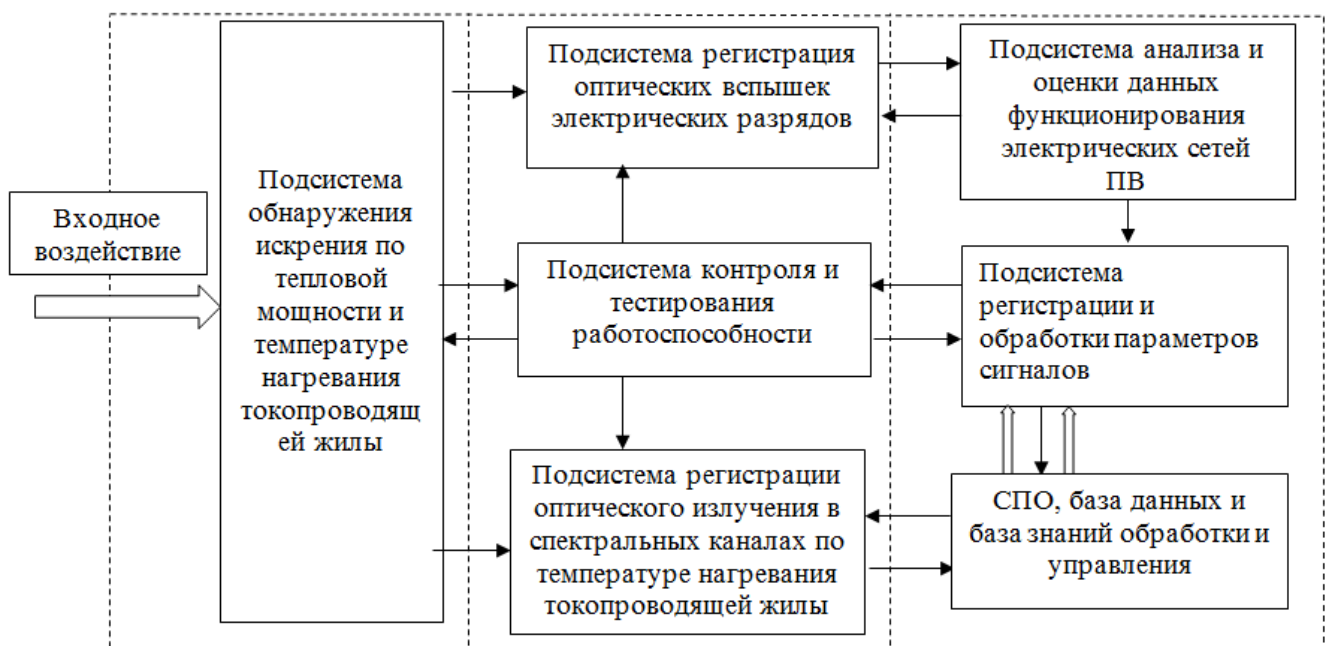


Рисунок 3.5 — Вариант структурной схемы СОЗЭС

Основной задачей СОЗЭС в критически важных элементах электрооборудования ПВ является обнаружение коронных, дуговых и искровых электрических разрядов на ранней стадии развития ПОС, мониторинг и контроль процесса развития ситуации, оценка текущего состояния и оповещение персонала о возникновении ПОС [104, 113-114].

Принцип работы данных устройств основан на регистрации оптического и теплового излучений вспышки электрической дуги и формировании команды на своевременное отключение повреждённого участка сети. Для обнаружения в электрических сетях пассажирских вагонов оптических вспышек искровых разрядов на фоне помех предлагается использовать метод преобразования светового потока вспышки искры в электрический сигнал с последующей пороговой обработкой сигнала со следящим порогом. Для реализации данного метода предлагается оптическое устройство, в состав которого включены фотоприёмник, оптический передатчик тестовых сигналов, пороговое устройство, устройство сравнения и сумматор. Для обнаружения оптической вспышки разряда на фоне помехи используется двухканальная схема следящего интегрирования выходного сигнала фотоприёмника, пропорционального падающему световому потоку.

В рабочем повседневном режиме оптический передатчик тестовых сигналов осуществляет опрос точечных и линейных датчиков в установленные интервалы времени для проверки контроля функционирования датчиков и диапазона настройки волоконных брэгговских решёток (ВБР) встроенных в оптоволокно. Точечные датчики размещены в местах установки розеток 220 В, линейные датчики встроены в провод электрических сетей пассажирского вагона вдоль всей его длины, в распределительных щитах (пульты управления) ПВ. В случае возникновения электрических разрядов в элементах электрооборудования, сопровождающихся яркими вспышками света, волоконно-оптический датчик (ВОД) захватывает оптическое излучение и передаёт на вход фотоприёмника (ФП). ФП собранный на микросхеме преобразует оптический сигнал в электрический, далее преобразованный сигнал поступает на интегратор₁ (И₁) и

интегратор₂ (I_2) для выполнения операции скользящего интегрирования. Пороговое устройство (Π) пропускает полезный сигнал и отсекает помехи. Устройство сравнения (C) формирует на выходе сигналы значения которых соответствуют значениям энергии вспышек, способных вызвать возгорание. Сумматор (Σ) формирует на выходе сигналы значения, которых соответствует значению суммарной энергии всех обнаруженных оптических вспышек. Сигналы с выходов C и Σ поступают в АЦП для преобразования аналогового сигнала в цифровой и дальнейшей обработки, сбора и учёта в базе данных ПЭВМ. СПО ПЭВМ обеспечивает обработку полученных данных для вывода на монитор и формирования звукового и текстового указания для принятия решения. Вариант структурной схемы подсистемы обнаружения по интенсивности в видимом диапазоне представлен на рисунке 3.6 [104, 113-114].

Вторым основным режимом работы СОЗЭС является режим обнаружения возгораний оболочки (изоляции) кабеля в результате нагревания токопроводящей жилы электропроводки и как следствие выделения тепловой энергии.

Для обнаружения пожароопасных состояний электрических сетей пассажирских вагонов предлагается использовать метод обнаружения возгораний по тепловому излучению инфракрасного диапазона. Для реализации данного метода обнаружения тепловой энергии предлагается оптическое устройство, в состав которого включены три ФП, два оптических циркулятора, оптическое волокно с двумя брэгговскими решетками, оптический передатчик тестовых сигналов. Для обнаружения теплового излучения используется трёхканальная схема с двумя спектральными каналами и одним интегральным [104, 113-114].

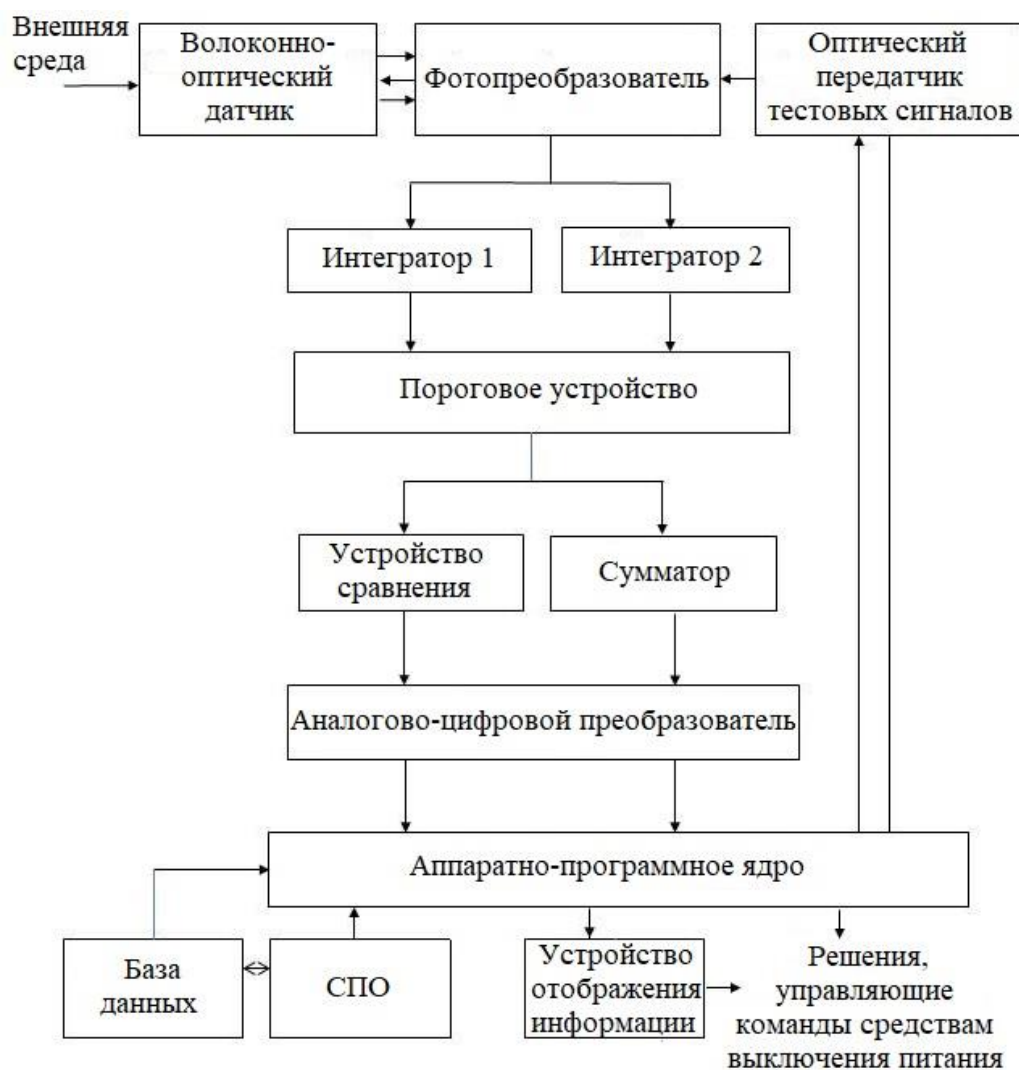


Рисунок 3.6 — Структурная схема подсистемы обнаружения по интенсивности в видимом диапазоне

В нормальном рабочем режиме функционирования линейный датчик СОЗЭС ПВ захватывает тепловое оптическое излучение, выделяемое токопроводящей жилой электропроводки, мощность которого соответствует текущему значению рабочей температуры провода. Тепловое оптическое излучение через оптические циркуляторы (ОЦ₁, ОЦ₂) поступает на фото преобразователи (ФП₁, ФП₂, ФП₀) и далее поступает в АЦП для преобразования электрических колебаний в цифровую форму. Устройство обработки (УО) (ПЭВМ) производит расчёт параметров сигналов, сохраняет параметры в БД и формирует указания о степени состояния электропроводки ПВ.

В случае локального повреждения кабеля и как следствие увеличения значения температуры в точке повреждения над рабочей температурой токопроводящей жилы собранное тепловое излучение направляется на оптические циркуляторы $ОЦ_1$, $ОЦ_2$ и волоконные брэгговские решётки ($ВБР_1$, $ВБР_2$). $ВБР_1$, $ВБР_2$ реализованы непосредственно в оптическом волокне и представляют собой спектральные избирательные фильтры, подобранные по диапазонам длин волн и обеспечивающие отражения в коротковолновой части спектра. Через $ОЦ_1$, $ОЦ_2$ оптическое излучение двух спектральных каналов выводится в $ФП_1$, $ФП_2$, излучение интегрального канала поступает на $ФП_0$. Электрические сигналы двух спектральных каналов и одного интегрального через АЦП в цифровом виде поступает на УО (ПЭВМ). УО обрабатывает выходные сигналы АЦП, вырабатывает порог $\mu_{пор}(t_0)$, зависящий от текущего значения рабочей температуры провода, и сравнивает измеренное значение μ с порогом, определяет текущую температуру в контролируемой области, наличие в ней электрических разрядов, их тип, длительность и мощность, наполняет БД, ведёт статистику принятых значений сигналов, оценивает текущий уровень опасности возгорания и формирует указания для принятия решения по устранению причин возгорания. Вариант структурной схемы подсистемы обнаружения по спектральному составу в видимом диапазоне представлен на рисунке 3.7 [104, 113-114].

Оптическое волокно датчика встроено в контролируемый провод вдоль всей его длины. Собранное тепловое излучение со спектральной плотностью мощности $P(\lambda)$ направляется на оптические циркуляторы и отрезки оптического волокна со сформированными внутри них волоконными брэгговскими решетками. ВБР являются спектрально-селективными отражательными фильтрами, что требует применения оптических циркуляторов для вывода оптического излучения спектральных каналов.

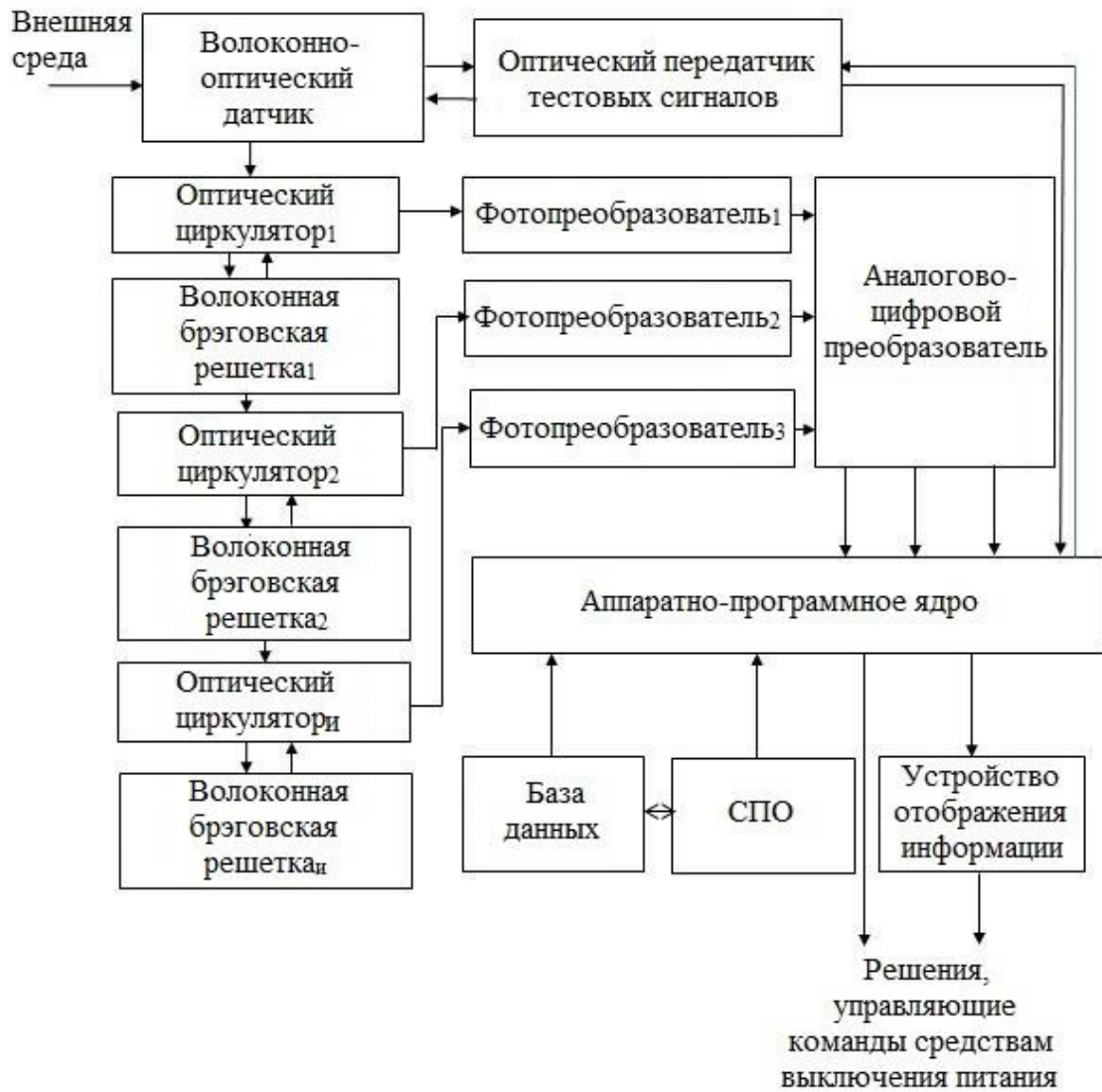


Рисунок 3.7 — Структурная схема подсистемы обнаружения по спектральному составу в инфракрасном диапазоне

Электрические сигналы интегрального и двух спектральных каналов формируются ФП. Устройство обработки производит обнаружение повреждений проводов и оценку показателей пожароопасного состояния.

3.4 Разработка алгоритмов функционирования системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов

Обобщённый алгоритм функционирования СОЗЭС в критически важных элементах электрических сетей пассажирских вагонов на основе волоконно-оптических датчиков [104, 113-114] представлен на рисунке 3.8.

Вариант обобщённого алгоритма функционирования подсистемы обнаружения по интенсивности в видимом диапазоне представлен на рисунке 3.9.

Интеграторы I_1 , I_2 выполняют преобразования

$$s_I(t) = \int_{t-0.5\tau_1}^{t+0.5\tau_1} I(t')dt' - \frac{\tau_1}{\tau_2} \int_{t-0.5\tau_2}^{t+0.5\tau_2} I(t')dt' , \quad (3.33)$$

$$s_{II}(t) = \int_{t-0.5\tau_1}^{t+0.5\tau_1} n(t')dt' - \frac{\tau_1}{\tau_2} \int_{t-0.5\tau_2}^{t+0.5\tau_2} n(t')dt' . \quad (3.34)$$

Пороговое устройство пропускает импульсы, превышающие порог

$$s_{I\max} = e - \frac{\tau_1}{\tau_2} e \approx e \quad (3.35)$$

Устройство сравнения формирует на выходе значения энергии вспышек $e_i \geq e_{\min}$, способных вызвать возгорание. Сумматор Σ формирует на выходе текущее значение суммарной энергии всех обнаруженных вспышек $E = \sum_i e_i$. Далее значения e_i , E обрабатываются устройством принятия решений.

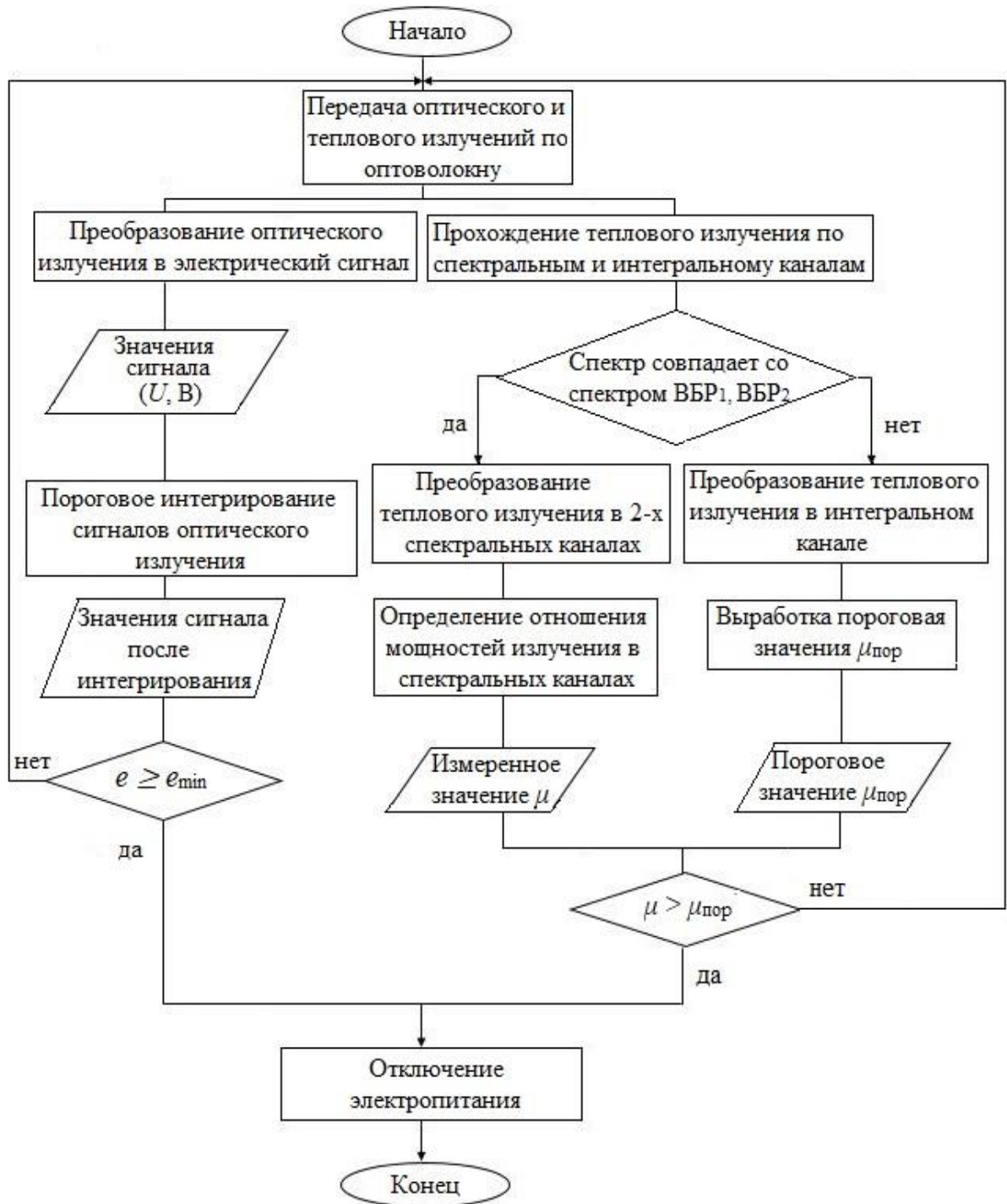


Рисунок 3.8 — Обобщённый алгоритм функционирования СОЗЭС в критически важных элементах электрических сетей пассажирских вагонов

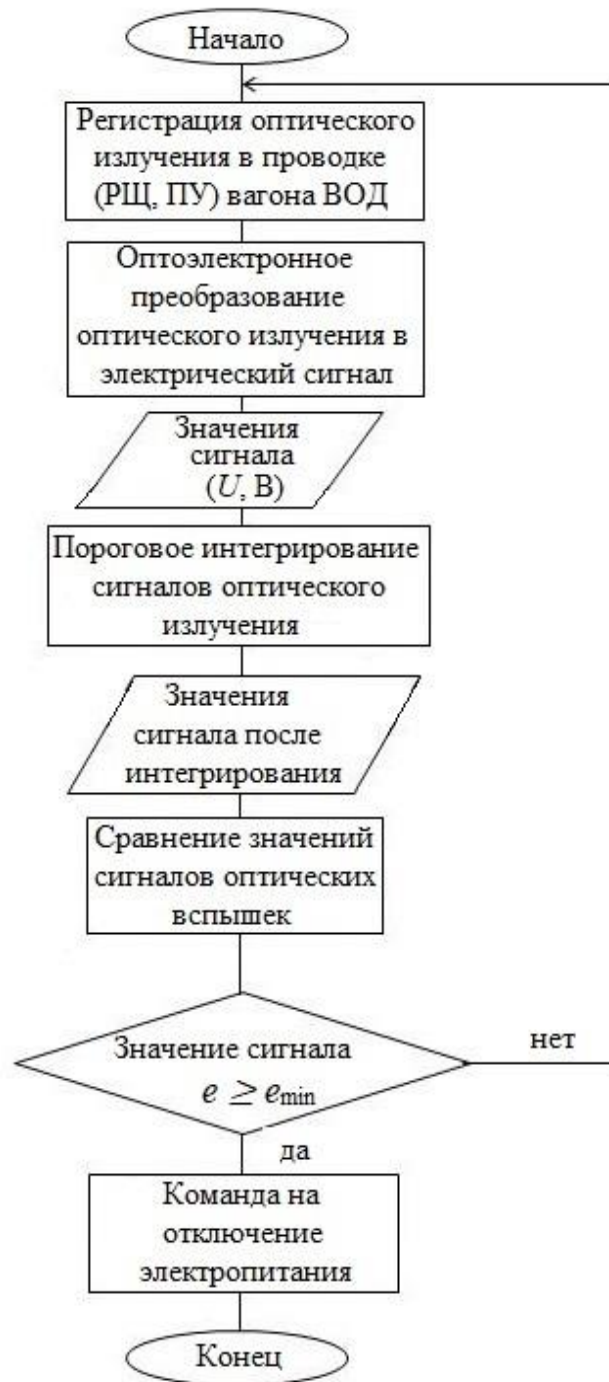


Рисунок 3.9 — Обобщённый алгоритм функционирования подсистемы обнаружения по интенсивности в видимом диапазоне

Вариант обобщённого алгоритма функционирования подсистемы обнаружения по спектральному составу в инфракрасном диапазоне длин волн представлен на рисунке 3.10 [104, 113-114].



Рисунок 3.10 — Обобщённый алгоритм функционирования подсистемы обнаружения по спектральному составу в инфракрасном диапазоне длин волн

Алгоритм обнаружения заключается в выработке порога $\mu_{пор}(t_0)$, зависящего от текущего значения рабочей температуры провода, и сравнении измеренного значения μ с порогом.

3.5 Разработка технического облика системы диагностики и раннего предупреждения пожароопасных состояний в вагонах пассажирского подвижного состава

В настоящее время пожары в вагонах на железных дорогах представляют угрозу жизни пассажиров и персонала поездной бригады, приводят к срыву расписания движения поездов, наносят материальный ущерб личному и общественному имуществу [104, 113-114].

Для предупреждения пожаров в пассажирских вагонах устанавливаются средства пожарной сигнализации и пожаротушения. Однако анализ современного состояния систем предупреждения о возникновении пожаров на пассажирском транспорте показал, что для эффективного решения задач обнаружения возгораний целесообразно к уже устанавливаемым в вагонах пассажирского подвижного состава средствам сигнализации и тушения пожаров дополнительно устанавливать средства диагностики контроля, обеспечивающих возможность должностным лицам своевременно принимать меры до возникновения возгораний [104, 113-114].

Основными причинами возникновения пожаров в пассажирских поездах железнодорожного транспорта явились неисправность электрооборудования, нарушение правил эксплуатации бытовых приборов и устройств защиты электрических сетей, короткое замыкание электропроводки, замыкание в сетевом оборудовании, технические неисправности, нарушение правил технической эксплуатации и выбора аппаратов защиты электрических сетей, нарушение правил обращения с электрооборудованием и правил перевозок [104, 113-114].

Для обнаружения и тушения возгораний в помещениях пассажирских вагонов подвижного состава применяются устройства контроля и пожарной сигнализации, средства тушения пожаров. Для обеспечения системы защиты электрооборудования вагона применяются средства автоматики: автоматические выключатели плавкие предохранители, обеспечивающие выключение

электрической сети и потребителей в случае изменения параметров сети [104, 113-114].

Принципиальным недостатком существующих устройств пожарной сигнализации и средств автоматики в пассажирских вагонах является то, что они реагируют по уже свершившемуся событию - возгоранию. Очевидно, что эффективность обеспечения пожаробезопасности значительно возрастет при дополнительном использовании систем диагностики и раннего предупреждения пожароопасных состояний пассажирских вагонов. Таким образом, является актуальным оснащение пассажирских вагонов системами диагностики и контроля состояния электрооборудования на основе измерения параметров, позволяющих обнаруживать и оценивать физические процессы, приводящие к возгоранию [104, 113-114].

Система диагностики и контроля пожароопасных состояний должна включать подсистему анализа данных датчиков температуры, напряжения и тока, волоконно-оптических датчиков в элементах электрооборудования, определения текущей частоты возгорания каждого элемента и вычисления общей вероятности возгорания вагона $P(t, \tau)$, связанной с текущим состоянием электрооборудования [104, 113-114, 118-118].

$$P(t, \tau) = 1 - e^{-\int_t^{t+\tau} \nu(t) dt} \quad (3.36)$$

где $P(t, \tau)$ - вероятность возгорания на интервале времени от t до $t+\tau$;

$\nu(t)$ - частота возникновения возгорания.

$$\nu(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^{K_q} \nu_{qk} [T_{qk}(t), U_{qk}(t), I_{qk}(t), F_{qk}(t)] , \quad (3.37)$$

где $\nu(t)$ - частота возгорания;

$q = 1, \dots, Q$ - порядковый номер типа элемента электрооборудования;

$k = 1, \dots, K_q$ - порядковый номер элемента электрооборудования в типе;

ν_{qk} - частота возгорания k -го элемента q -го типа в момент времени t ;

$T_{qk}(t)$ - температура q -го типа k -го элемента в одной или нескольких точках;

$U_{qk}(t)$ - значение напряжения в q -ом типе k -го элемента;

$I_{qk}(t)$ - значение силы тока в q -ом типе k -го элемента;

$F_{qk}(t)$ - значение мощности светового потока в q -ом типе k -го элемента.

Решение вышеперечисленных задач достигается на основе применения интеллектуальной системы диагностики и контроля ПОС электрических сетей энергоснабжения оборудования пассажирского вагона [108, 112, 117-118].

Для обнаружения в электрических сетях пассажирских вагонов оптических вспышек искровых разрядов на фоне помех предлагается подсистема обнаружения, в состав которой включены фотодетектор, оптический передатчик тестовых сигналов, пороговое устройство, устройство сравнения и сумматор. Для обнаружения оптической вспышки разряда на фоне помехи используется двухканальная схема следящего интегрирования выходного сигнала фотодетектора, пропорционального падающему световому потоку [104, 113-114, 116-118].

Для обнаружения возгораний оболочки (изоляции) кабеля в результате нагревания токопроводящей жилы электропроводки и как следствие выделения тепловой энергии предлагается подсистема, в состав которой включены три фотодетектора, два оптических циркулятора, оптическое волокно с двумя брэгговскими решетками, оптический передатчик тестовых сигналов. Для обнаружения теплового излучения используется трёхканальная схема с двумя спектральными каналами и одним интегральным.

Электроснабжение современных пассажирских вагонов осуществляется через автономную (от генераторов и аккумуляторных батарей), централизованную (от вагона-электростанции), централизованную с индивидуальным статистический преобразователем (от локомотива через поездную подвагонную магистраль), смешанную (от высоковольтной подвагонной магистрали и подвагонного генератора) системы, обеспечивающие номинальные напряжения в сети вагона 110 В; 380/220 В; 3000 В и 380/220 В; 3000 В и 110 В соответственно [104, 113-114, 116-118].

В настоящее время на пассажирских вагонах наиболее распространена смешанная система электроснабжения. При такой системе устройства электро-

отопления подключены к высоковольтной подвагонной магистрали, а остальные потребители питаются от подвагонного генератора [104, 113-114, 116-118].

Основными потребителями электроэнергии пассажирского вагона являются система освещения, устройства сигнализации и контроля безопасности, управления, электробытовые приборы, электрокипятильник, принудительная вентиляция, система кондиционирования, электрическое отопление. Мощность системы электроснабжения вагона составляет от 4,5 кВт до 50 кВт, напряжение от 50 В до 3000 В постоянного или переменного тока.

В современных пассажирских (купейных, плацкартных) вагонах система мониторинга за функционированием оборудования вагона осуществляется из служебного купе проводника визуально через монитор с touch-панелью, а управление, включение, выключение и контроль электрооборудования вагона осуществляется через распределительный щит, расположенный в помещении рядом со служебным купе. Централизованное управление и контроль всех систем вагонов осуществляется из купе с радиооборудованием пассажирского купейного штабного вагона, на сервер которого по локальной сети и через протоколы GSM поступает вся информация о состоянии элементов оборудования вагонов. Как правило, в состав пассажирских поездов дальнего следования включается один пассажирский купейный штабной вагон. В нём располагаются органы управления и интерфейсы поездных систем, рабочее место начальника поезда, а также купе с радиооборудованием [104, 113-114, 116-118].

На рисунке 3.11 представлена обобщённая структурно-функциональная схема системы диагностики и контроля ПОС электрических сетей энергоснабжения оборудования пассажирских (купейных, плацкартных) и пассажирского купейного штабного вагонов подвижного состава [104, 113-114].

Состав системы:

1 ВОД₁:

- оптический кабель (линейный датчик) – 1 шт.;
- точечный датчик – 1 шт.;
- фотопреобразователь – 1 шт.;

- интегратор – 2шт.;
- компаратор -1 шт.;
- пороговое устройство – 1 шт.;
- устройство сравнения -1 шт.;
- сумматор – 1 шт.

2 ВОД₂:

- оптический кабель (линейный датчик) – 1 шт.;
- точечный датчик – 1 шт.;
- фотопреобразователь – 3 шт.;
- волоконные брэгговские решётки (встроены в оптоволокно) – 3 шт.;
- оптический циркулятор – 3 шт.

3 Оптический передатчик тестовых сигналов – 2 шт.

4. Аналогово-цифровой преобразователь – 1шт.

5. Контроллер – 2 шт.;

6. ПЭВМ -1 шт.

7. Устройство отображения – 1 шт.

8. Модем – 1 шт.

9. Программное обеспечение:

- специально ПО – 1 комплект;
- база данных – 1 комплект.

Контроль параметров электрических сетей пассажирского вагона осуществляется волоконно-оптическими датчиками ВОД₁, ВОД₂,...,ВОД_n из состава подсистем обнаружения оптических и тепловых излучений (рисунки 3.4 и 3.11) Текущая информация с параметрами электрических сетей, питающих потребителей вагона, с аналоговых волоконно-оптических датчиков поступает на входы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). Управление АЦП осуществляется контроллером путём адресного опроса [104, 113-114].

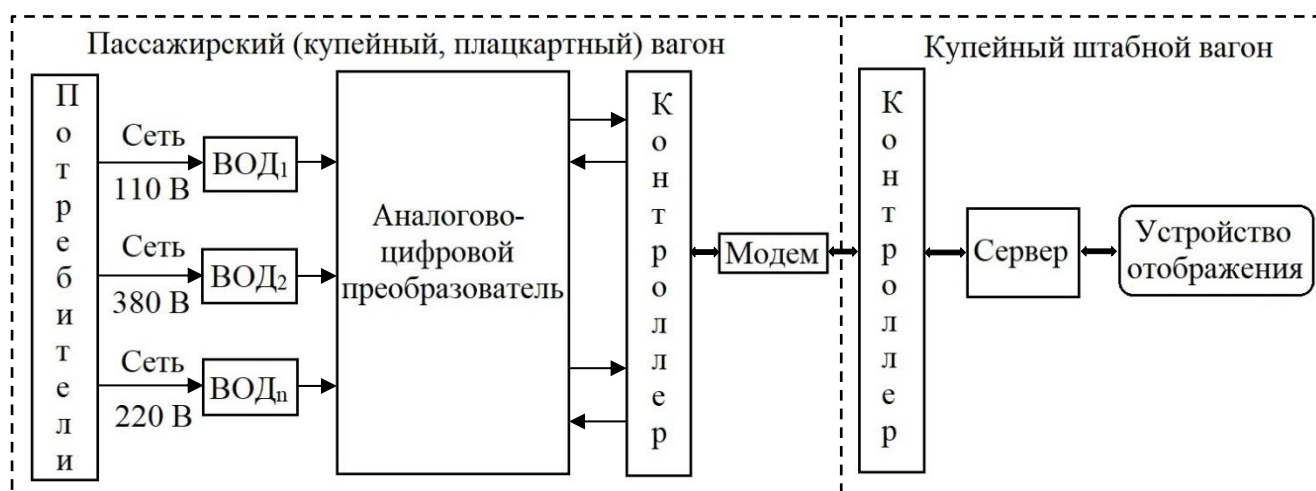


Рисунок 3.11 - Обобщённая структурно-функциональная схема системы диагностики и контроля ПОС электрических сетей энергоснабжения оборудования пассажирских (купейных, плацкартных) и пассажирского купейного штабного вагонов подвижного состава

Текущая информация от каждого ВОД в цифровом виде по шине данных поступает в контроллер пассажирского вагона. Контроллер анализирует и накапливает принятую информацию и формирует решение о продолжении наблюдения за состояниями электрических сетей, отсутствии рисков пожарной безопасности, накоплении текущих данных, передаче сжатой информации в контроллер пассажирского купейного штабного вагона. Если искрение в сети отсутствует, параметры оптического и теплового излучений в норме, температура проводной части и соединителей в норме, протечки тока в сети нет, то контроллер опрашивает датчики с заданным интервалом, накапливает оперативный массив данных по каждому из них и непрерывно анализирует текущую информацию. Таким образом риски ПОС сети пренебрежимо малы. В случае выявления риска возникновения и развития ПОС в первую очередь опрашиваются наиболее информативные датчики и принимается решение о передаче текущих данных в сжатом виде контроллеру штабного вагона с последующим накоплением и обработкой в базе данных сервера и формированием команд тревоги в визуальной и звуковой форме с одновременным отображением служебных команд на мониторе купе с радиооборудованием купейного штабного вагона [104, 113-114].

Обмен данными между контроллерами пассажирского (купейного, плацкартного) и купейного штабного вагонов осуществляется через управляющие

и сигнальные входа/выходы модемов локальной сети подвижного состава. Сигнальный выход контроллера штабного вагона соединен с сигнальным входом устройства обработки данных на базе сервера, первый сигнальный выход которого соединен со входом монитора радио-купе штабного вагона [104, 113-114].

Предложенная и обоснованная структура системы диагностики и контроля состояния электрооборудования пассажирских вагонов является концептуальной моделью, на основе формализации которой могут быть проведены дальнейшие оценки эффективности системы обеспечения пожаробезопасности вагонов пассажирского подвижного состава [105, 109, 114-115].

3.6 Выводы по разделу 3

1 С целью сокращения времени ранней диагностики возникновения риска пожароопасной ситуации в электрических сетях пассажирского вагона разработана структурная и функциональная организация системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов на основе волоконно-оптических датчиков, позволяющая сократить время обнаружения оптического и теплового излучений искрового разряда, определить участок провода возможного возгорания, отличающаяся двухуровневой двух и трёхканальной организацией обработки данных контролируемых параметров оптического и теплового излучений искровых и дуговых разрядов по их интенсивности и спектральному составу в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн соответственно.

2 Новизна структурно-функциональной организации системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей определяется тем, что в неё введены разработанные в диссертации волоконно-оптические устройства обнаружения искровых разрядов и волоконно-оптические устройства обнаружения теплового нагрева проводов обеспечивающие раннее обнаружение

пожароопасных состояний в критически важных элементах электрических сетей пассажирских вагонов. Модульная структура системы позволяет с минимальными затратами наращивать число волоконно-оптических датчиков, что расширяет эффективную область её применения. Количество устройств определяется количеством контролируемых элементов электрических сетей, в которых возможны искровые разряды и объёмом электрической проводки пассажирских вагонов.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УЗЛОВ И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНЫХ СОСТОЯНИЙ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ ПАССАЖИРСКИХ ВАГОНОВ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

4.1 Исследования функционирования системы методом численного эксперимента и результаты численных расчетов алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов по интенсивности в видимом диапазоне длин волн

Работоспособность предложенных алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов по оптическому излучению проверена на численной модели в среде Matlab [104].

Входные данные:

- временной интервал моделирования - 50 мс;
- моменты времени оптических вспышек разрядов - случайные с равномерным распределением на интервале моделирования;
- длительность вспышки - случайная с равномерным распределением на интервале 10...100 мкс;
- помеха имитировалась в виде осцилляций частотой 100 Гц, обусловленных искусственным освещением, с наложением полосового белого шума, обусловленного собственным шумом ФП;
- времена интегрирования - $\tau_1 = 0,1$ мс и $\tau_2 = 1$ мс;
- постоянная составляющая следящего порога $\delta = 0,06$.

Результаты моделирования, подтверждающие работоспособность рассмотренных алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов по оптическому излучению, представлены на рисунках 4.1, 4.2.

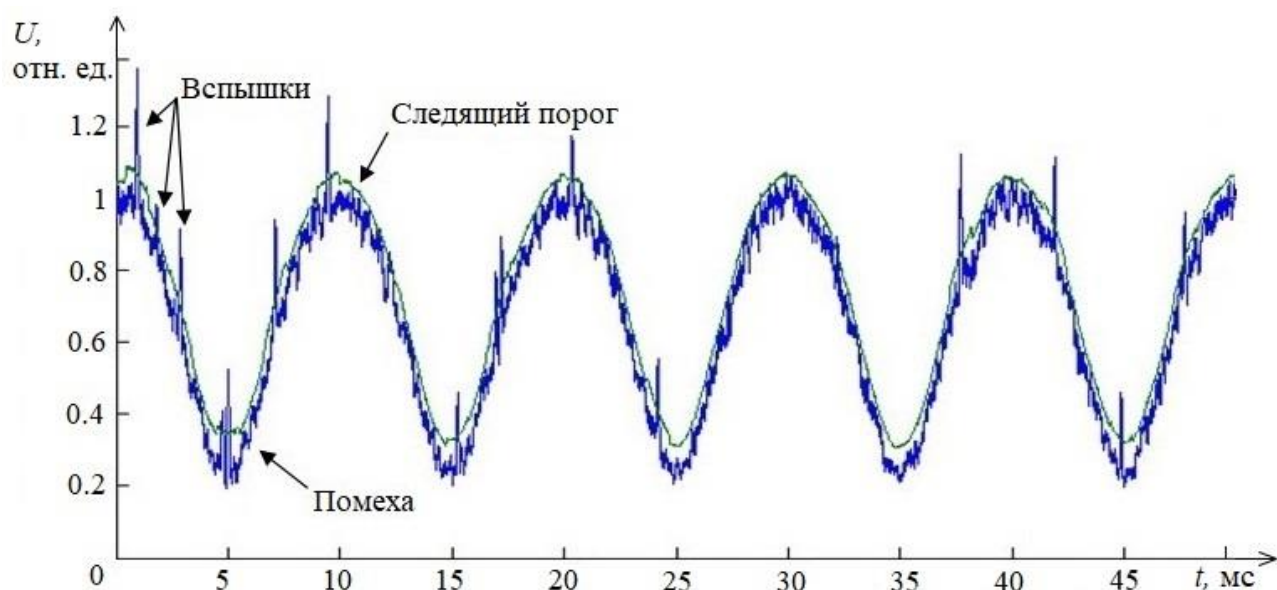


Рисунок 4.1 - Вид сигнала на выходе интегратора



Рисунок 4.2 - Вид сигнала после обработки

На рисунке 4.1 показана смесь сигнала и помехи на выходе 1-го интегратора и порог обнаружения, формируемый на основе выходного сигнала 2-го интегратора. На рисунке 4.2 показан конечный результат обработки, где импульсы соответствуют обнаруженным оптическим вспышкам разряда. По значениям максимумов импульсов производится обнаружение пожароопасных разрядов $e \geq e_{min}$.

4.2 Результаты численных расчетов оценки пожароопасности электропроводки по спектральному составу в инфракрасном диапазоне длин волн

Работоспособность предложенных алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности дуговых и искровых разрядов по тепловому излучению, результаты моделирования, подтверждающие работоспособность рассмотренных алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности электропроводки, представлены на рисунке 4.3 [113].

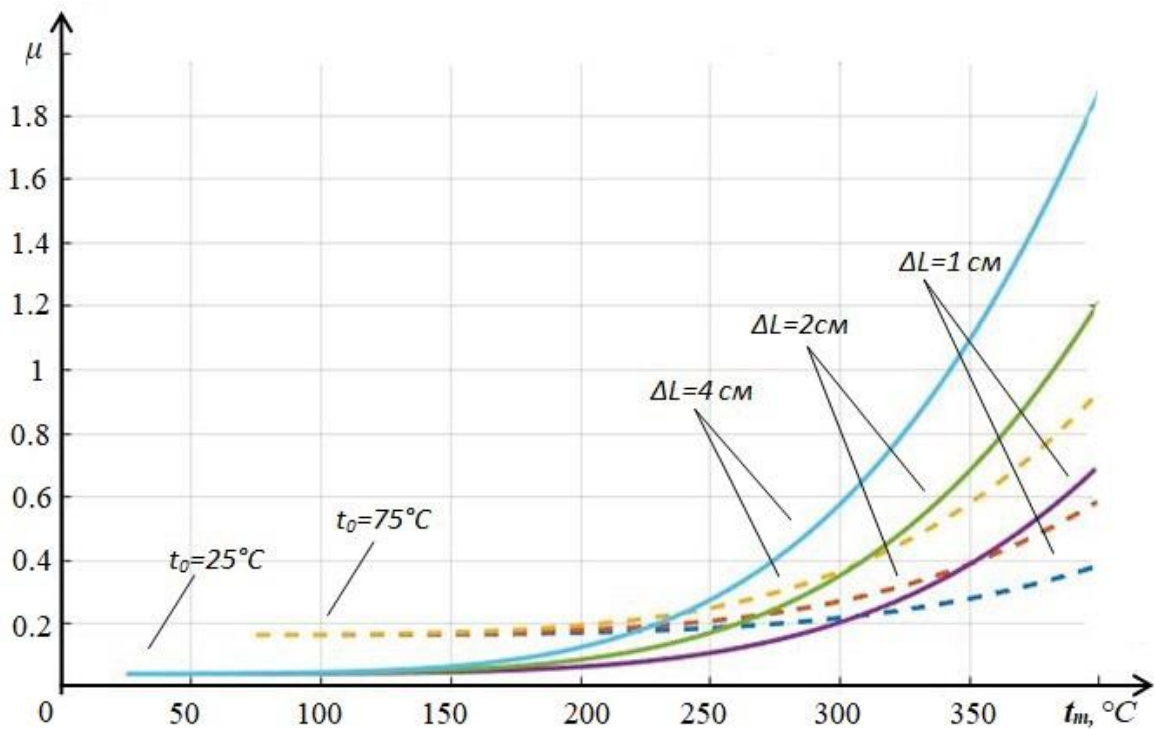


Рисунок 4.3 - Зависимости отношения мощностей теплового излучения в спектральных каналах от максимальной температуры на участке повреждения провода

На рисунке 4.3 показаны результаты численных расчетов зависимости μ от максимальной температуры в месте повреждения провода $t_m - 273,16\text{ K}$ для значений характерной длины $\Delta L = 1, 2, 4\text{ см}$ при рабочих температурах $t_0 = 25^\circ\text{C}$ (сплошные линии) и 75°C (пунктирные линии) для спектральных каналов

$\lambda_1 = 5$ мкм, $\Delta\lambda_1 = 0,01$ мкм, $\lambda_2 = 2,5$ мкм, $\Delta\lambda_2 = 0,2$ мкм. Диапазон рассматриваемых температур t_m выбран исходя из температуры воспламенения типичных электротехнических материалов, которая, например, составляет 350 – 500 °С для полихлорвинила, полиэтилена, полистирола, текстолита, резины. Зависимости на рисунке 4.3 подтверждают возможность обнаружения локальных повреждений электропроводки по изменениям в коротковолновой части спектра теплового излучения, собираемого оптическим волокном, при температуре в точке повреждения от 200 – 250 °С и выше. Алгоритм обнаружения заключается в выработке по общей мощности теплового излучения порога $\mu_{\text{пор}}(t_0)$, определяемого текущим значением рабочей температуры провода, и сравнении измеренного значения μ с порогом [113].

4.3 Описание программной реализации численной модели фотодетектора оптического излучения в электрический сигнал

Численная модель реализована в виде операций, сгруппированных соответственно блокам в схеме моделирования.

На рисунках 4.4 – 4.6 представлена реализация численной модели функционирования фотодетектора применительно к параметрам, указанным выше [104, 108, 114, 116-118].

1 Интервал дискретизации и времени моделирования

$Td0=0.01$; - интервал дискретизации по времени в мкс

$Tnb=10000$; - временной интервал моделирования в мкс

$t=0:Td0:Tnb$; - сетка по времени

$Nt=length(t)$; - кол-во элементов вектора t

2 Импульсная характеристика фотодетектора

$AhFDet=1$; $TauhFDet=0.2$;

$T1hFDet=0.3*TauhFDet$; $T2hFDet=4*TauhFDet$; $T3hFDet=0.7*TauhFDet$;


```

ThFDet=T1hFDet+T2hFDet+T3hFDet;
thFDet=0:Td0:ThFDet;
NhFDet=length(thFDet);
hFDet1=AhFDet*exp(-thFDet/TauhFDet);
figure; plot(thFDet,hFDet1);
for i=1:NhFDet
hFDet2(i)=fRectSin(thFDet(i),T1hFDet,T2hFDet,T3hFDet);
end;
figure; plot(thFDet,hFDet2);
hFDet=hFDet1.*hFDet2;
figure; plot(thFDet,hFDet);
ShFDet=sum(hFDet)*Td0;
hFDet=(1/ShFDet)*hFDet;
figure; plot(thFDet,hFDet);

```

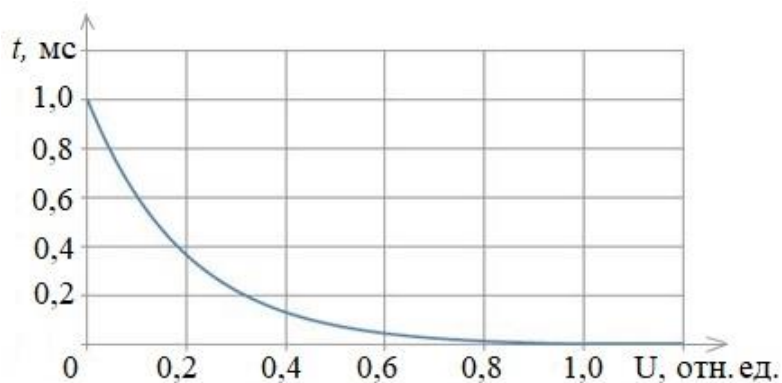


Рисунок 4.4 - Импульсная характеристика фотодетектора

3 Импульсная характеристика фотоусилителя

```

TauhFAmp=0.5*TauhFDet;
ThFAmp=2*TauhFAmp;
thFAmp=0:Td0:ThFAmp;
NhFAmp=length(thFAmp);
for i=1:NhFAmp
hFAmp(i)=fDltCos(thFAmp(i)-TauhFAmp,TauhFAmp);
end;

```

```
figure; plot(thFAmp,hFAmp);
```

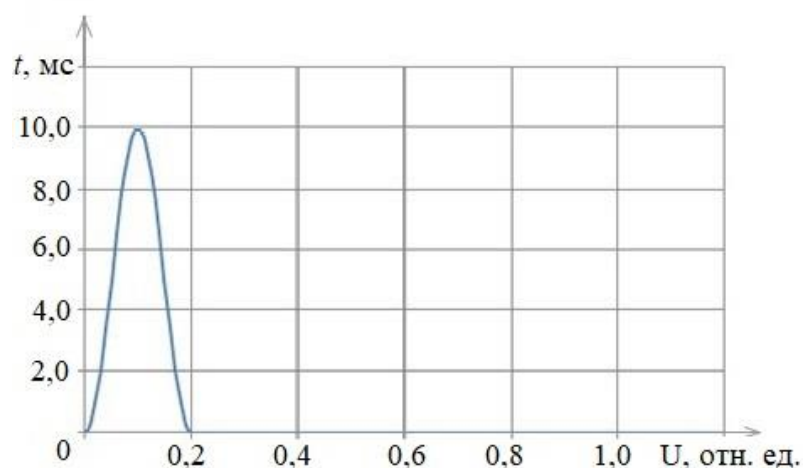


Рисунок 4.5 - Импульсная характеристика усилителя

4 Импульсная характеристика ФП

```
hFRec=Td0*conv(hFDet,hFAmp);
```

```
NhFRec=NhFDet+NhFAmp-1;
```

```
ThFRec=Td0*(NhFRec-1);
```

```
thFRec=0:Td0:ThFRec;
```

```
figure; plot(thFRec,hFRec);
```

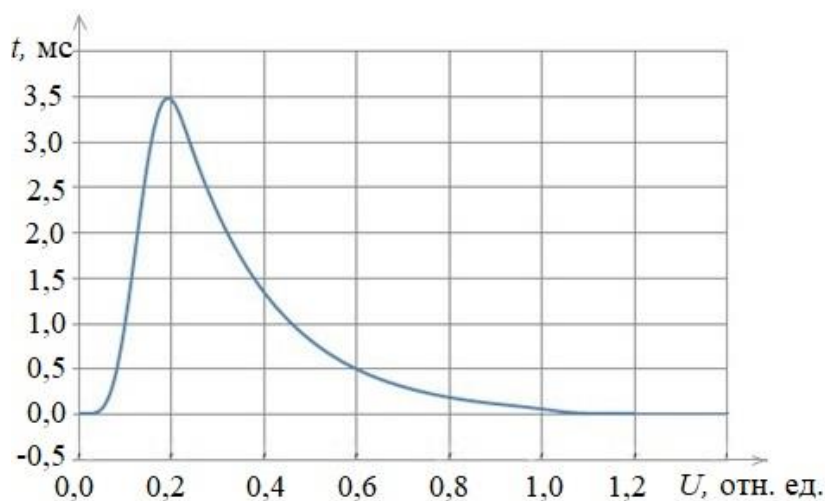


Рисунок 4.6 - Импульсная характеристика приемника

Значения полученные на рисунках 4.4 – 4.6 подтверждают работоспособность программы преобразования оптического излучения в электрический сигнал.

4.4 Методика оценки вероятности возникновения пожаров на основе мониторинга пожароопасных состояний электрооборудования пассажирских вагонов

Методика основана на мониторинге параметров, связанных с физическими процессами, ведущими к возгоранию и позволяет исключить из рассмотрения влияние человеческого фактора, как источника пожароопасности [105, 109, 117-118].

В простейших случаях частота и вероятность возгорания объекта $P(t, \tau)$ на интервале времени от t до $t + \tau$ могут вычисляются по формулам:

$$\nu = \sum_{n=1}^N \nu_n; \quad (4.38)$$

$$P(t, \tau) = 1 - e^{-\nu\tau}, \quad (4.39)$$

где ν_n — частота возгораний n -го элемента, $n = 1, \dots, N$.

Пусть q — порядковый номер типа элемента электрооборудования, $q = 1, \dots, Q$; k - порядковый номер элемента электрооборудования в типе, $k = 1, \dots, K_q$. Частота возгорания k -го элемента q -го типа в момент времени t рассматривается как функция его текущего состояния $\vec{S}_{qk}(t)$. Состояние элемента представлено как упорядоченный набор (вектор) параметров, тип которого определяется типом элемента. Динамика состояний элемента $\vec{S}_{qk}(t)$ зависит от внешних условий и воздействий, которые описываются вектором параметров $\vec{V}_{qk}(t)$. Таким образом, текущее состояние элемента рассматривается как $\vec{S}_{qk}(t) = \vec{S}_{qk}[t, \vec{V}_{qk}(t)]$, а частота возгорания как $\nu_{qk}(t) = \nu_{qk}[\vec{S}_{qk}[t, \vec{V}_{qk}(t)]]$. В выражении $\vec{S}_{qk}[t, \vec{V}_{qk}(t)]$ явная зависимость от времени t учитывает возможность изменения (эволюции) состояния элемента и вероятности возгорания, например, при фиксированных температуре и влажности окружающей среды [104, 108, 116-118].

На основе введенных обобщенных характеристик вероятность возгорания вагона $P(t, \tau)$, связанную с электрооборудованием, на интервале времени от t до $t + \tau$ вычисляется по формулам:

$$v(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^{K_q} v_{qk} [\vec{S}_{qk} [t, \vec{V}_{qk}(t)]] . \quad (4.40)$$

В системе мониторинга пожароопасных состояний значения v_{qk} находятся по текущим параметрам, характеризующих физические процессы, которые вызывают возгорание элементов электрооборудования. Исходными базовыми параметрами являются температура элемента в одной или нескольких точках $T(t)$, значения напряжения $U(t)$, силы тока $I(t)$, энергии оптической вспышки $E_{qk}(t)$, спектральной плотности мощности излучения $P_{qk}(\lambda, t)$. В этом случае

$$v(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^{K_q} v_{qk} [T_{qk}(t), U_{qk}(t), I_{qk}(t), E_{qk}(t), P_{qk}(\lambda, t)] . \quad (4.41)$$

Зависимости для напряжений $U_{qk}(t)$ и токов $I_{qk}(t)$ исходно рассматриваются как функции произвольного вида, описывающие, например, негармонические пульсации или хаотические импульсные процессы при наличии искрового разряда.

Зависимости $v = [T(t), U(t), I(t), E(t), P(\lambda, t)]$ определяются путем экспериментальных исследований для каждого из интересующих элементов электрооборудования вагона. Соответствующая система мониторинга пожароопасных состояний включает подсистему оценки пожароопасных состояний на основе анализа данных датчиков температуры, напряжения, тока и волоконно-оптических датчиков в элементах электрооборудования, определения текущей частоты возгорания каждого элемента и вычисления общей вероятности возгорания вагона $P(t, \tau)$, связанной с текущим состоянием электрооборудования [104, 108, 116-118].

$$P(t, \tau) = 1 - e^{-\int_t^{t+\tau} v(t) dt} . \quad (4.42)$$

Техническая система, оценивающая вероятность возгорания $P(t, \tau)$, рассматривается как основа системы оценки и мониторинга пожароопасных

состояний электрооборудования пассажирских вагонов, в которой исходными данными являются текущие параметры внешних условий и воздействий $\vec{V}_{qk}(t)$. По зависимостям $P(t, \tau)$ строятся классификатор состояний и система предупреждения о риске возгорания [104, 108, 116-118].

4.5 Численное моделирование функционирования системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрооборудования пассажирских вагонов

Далее рассматривается модельный пример системы мониторинга пожароопасных состояний электрооборудования вагона, состоящей из сосредоточенных и распределенных элементов (рисунок 4.7).

Пусть сосредоточенные элементы (к ним относятся, например, розетки и различного рода соединители) имеют относительно небольшие размеры, а их пожароопасность определяется наличием и мощностью искровых разрядов в местах электрических контактов. Распределенные элементы (к ним относятся, например, провода электропроводки) имеют значительные размеры, а их пожароопасность определяется наличием повреждений и температурой локального нагрева в местах повреждений электроизоляции [104, 108, 116-118].

Обнаружение искровых разрядов и измерение их энергии, являющейся исходным параметром для нахождения вероятности возгорания, производится датчиками по интенсивности оптических вспышек в видимом диапазоне спектра.

Обнаружение повреждений электроизоляции и измерение температуры в местах повреждений, являющейся исходным параметром для нахождения вероятности возгорания, производится датчиками по спектральному составу теплового излучения проводов в инфракрасном диапазоне спектра [104, 108, 116-118].

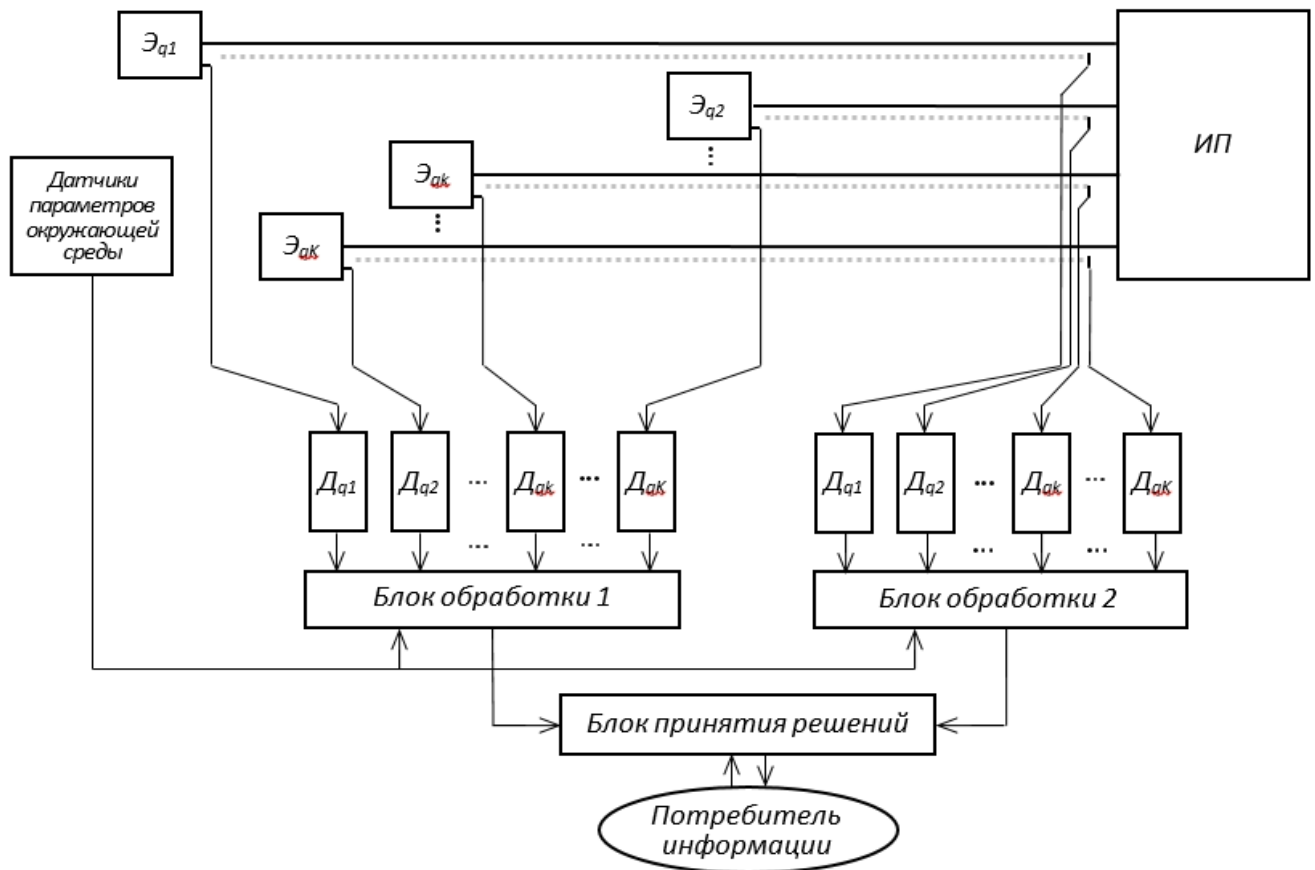


Рисунок – 4.7 Схема системы мониторинга пожароопасных состояний электрооборудования вагона

Принципы построения и функционирования датчиков искрения и датчиков повреждения электроизоляции описаны выше.

На основе предложенного общего подхода к оценке пожароопасных состояний и риска возгорания может быть предложены следующая методика и алгоритмы функционирования системы мониторинга, представленной на рисунке 4.7.

Будем считать, что вероятность возгорания из-за искрения и повреждений проводов зависят от характеристик (состояния) элементов и параметров окружающей воздушной среды. К ним следует отнести текущие температуру T , давление P и относительную влажность μ_V среды, а также концентрацию в ней пожароопасных компонентов μ_{Gi} (паров горючих веществ, аэрозолей, пыли), $i = 1 \dots n$ – номер горючей компоненты, входящей в список потенциально опасных.

Для расчета интенсивности возгорания из-за искровых разрядов в сосредоточенных элементах предлагается следующая обобщенная математическая модель.

Пусть e – энергия одиночного разряда, а вероятность возгорания из-за него p_e в окружающей среде с параметрами $T, P, \mu_V, \mu_{Gi}, i = 1 \dots n$. Из физических соображений следует, что вероятность возгорания p_e зависит от параметров окружающей среды в окружающей среде с параметрами $T, P, \mu_V, \mu_{Gi}, i = 1 \dots n$:

$$p_e = p_e(e, T, P, \mu_V, \mu_{G1}, \dots \mu_{Gn}). \quad (4.43)$$

Данная зависимость может быть найдена экспериментально при исследованиях элемента на пожаробезопасность.

Если в единицу времени произошло N_e разрядов с различной энергией, то в предположении статистической независимости возгораний от отдельных разрядов общая вероятность возгорания P_e может быть вычислена по соотношению:

$$P_e = 1 - \prod_{j=1}^{N_e} [1 - p_e(e_j, T, P, \mu_V, \mu_{G1}, \dots \mu_{Gn})]. \quad (4.44)$$

Частота возгораний ν_e является значением вероятности P_e , статистически усредненной по реализациям энергий разрядов e_j на единичных интервалах времени. Таким образом, при известной зависимости (4.43) и известном распределении вероятности энергии разряда $w(e)$ может быть получено выражение для частоты возгораний в виде:

$$\nu_e = \nu_e [M_{Ne} \cdot w(e), T, P, \mu_V, \mu_{G1}, \dots \mu_{Gn}], \quad (4.45)$$

где $w(e)$ – плотность вероятности энергии разрядов на единичном интервале времени.

M_{Ne} – математическое ожидание количества разрядов при искрении в единицу времени.

Если статистические характеристики разрядов и параметры внешней среды изменяются медленно, то зависимость частоты возгораний от времени можно записать в виде:

$$v_e(t) = v_e [M_{Ne}(t) \cdot w(e, t), T(t), P(t), \mu_V(t), \mu_{G1}(t), \dots \mu_{Gn}(t)] . \quad (4.46)$$

Найденное значение $v_e(t)$ характеризует вероятность возгорания из-за искровых разрядов в рассматриваемом сосредоточенном элементе электрооборудования.

Аналогичным образом вычисляются значения $v_T(t)$ для распределенных элементов, для которых исходным параметром для нахождений вероятности возгорания является температура в местах повреждений электроизоляции.

Электрооборудование вагона в общем случае может содержать сосредоточенные и распределенные элементы нескольких типов. Пусть q — порядковый номер типа элемента электрооборудования, $q = 1, \dots, Q$; k - порядковый номер элемента электрооборудования в типе, $k = 1, \dots, K_q$. При статистической модели независимости возгораний в элементах оборудования, которая наиболее часто рассматривается на практике, суммарная частота возгораний для текущего момента времени определяется соотношением

$$v_c(t) = \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^{K_q} v_{qk}(t) , \quad (4.47)$$

где $v_{qk}(t)$ находится как $v_e(t)$ для сосредоточенных элементов и как $v_T(t)$ для распределенных элементов.

Вероятность возгорания на интервале времени от t до $t + \tau$ вычисляется по формуле

$$P(t, \tau) = 1 - \exp \left[- \int_t^{t+\tau} v_c(t) dt \right] . \quad (4.48)$$

В схеме на рисунке 4.7 вычисление текущих частот возгораний $v_{qk}(t)$ каждого из элементов производится в блоках обработки 1,2 по выходным данным датчиков D с учетом текущих параметров окружающей среды. Вычисление суммарной частоты возгораний $v_c(t)$ и вероятностей возгораний $P(t, \tau)$ производится в блоке принятия решений. В наиболее простом варианте по

значениям $v_c(t)$ и $P(t, \tau)$ может быть произведена классификация пожароопасных состояний, например, по уровням «низкий», «средний», «высокий», «очень высокий» с выдачей предупреждений потребителю информации. Кроме того, потребитель информации может запросить данные по каждому из элементов электрооборудования для выявления наиболее опасных с точки зрения пожароопасности и принятия соответствующих мер. Обоснование алгоритмов и критериев классификации является отдельной задачей и в данной работе не рассматривалось [105, 109, 117-118].

При практической реализации изложенной выше методики значения частот возгораний $v_e(t)$ и $v_T(t)$ элементов электрооборудования целесообразно находить численно по текущим выходным данным датчиков искрения и температуры проводки на основе известных зависимостей $p_e(e_j, T, P, \mu_V, \mu_{G1}, \dots, \mu_{Gn})$ и $p_T(T_j, T, P, \mu_V, \mu_{G1}, \dots, \mu_{Gn})$. Методика численного нахождения частот возгорания рассмотрена далее на примере сосредоточенного элемента.

В теории надежности электронных компонентов влияние параметров окружающей среды принято оценивать в виде дополнительных поправок к частоте отказов в стандартных условиях [104, 108, 116-118]. Аналогично, вероятность возгорания от одного искрового разряда в некотором элементе электрооборудования можно приближенно представить в виде:

$$p_e = p_{e0} \cdot \left(1 + \Delta_{eT}(\delta T) + \Delta_{eP}(\delta P) + \Delta_{eV}(\delta \mu_V) + \sum_{i=1}^n \Delta_{eGi}(\delta \mu_{Gi}) \right), \quad (4.49)$$

где $p_{e0} = p_e(e, T_0, P_0, \mu_{V0}, \mu_{G01}, \dots, \mu_{G0n}) = p_{e0}(e)$ – вероятность возгорания из-за искрового разряда с энергией e при стандартных параметрах окружающей среды $T_0; P_0; \mu_{V0}; \mu_{G0i}, i = 1 \dots n$;

$\Delta_{e*}(\delta)$ – значения поправок как функций отклонений параметров окружающей среды от стандартных условий $\delta T = T - T_0$, $\delta P = P - P_0$, $\delta \mu_V = \mu_V - \mu_{V0}$, $\delta \mu_{Gi} = \mu_{Gi} - \mu_{G0i}, i = 1 \dots n$.

Зависимость $p_{e0}(e)$ и значения поправок на параметры окружающей среды $\Delta_{eT}(\delta T)$, $\Delta_{eP}(\delta P)$, $\Delta_{eV}(\delta \mu_V)$, $\Delta_{eGi}(\delta \mu_{Gi}), i = 1 \dots n$ должны быть найдены при

испытаниях элементов на пожаробезопасность. Далее считаем их, а также зависимости от времени t параметров окружающей среды $T(t)$, $P(t)$, $\mu_V(t)$, $\mu_{Gi}(t)$, $i = 1 \dots n$ известными.

Датчик искрения определяет на каждом интервале времени от t до $t + \Delta t$ значения e_j , $j=1\dots N_e$ обнаруженных искровых разрядов. Выборка e_j поступает в блок обработки, который вычисляет по формулам (4.44), (4.49) вероятность возгорания $P_e(t, \Delta t)$ на указанном временном интервале для текущих условий, а также соответствующую ей оценку частоты возгораний рассматриваемого элемента электрооборудования:

$$\nu_e(t) = \frac{P_e(t, \Delta t)}{\Delta t}. \quad (4.50)$$

Значение $\nu_e(t)$ передается в блок принятия решений для дальнейшей обработки и выдачи итоговых данных потребителю информации.

Далее рассмотрен пример реализации методики для одного элемента электрооборудования на имитационной модели, включающей имитацию случайных искровых разрядов и численный расчет текущей частоты возгораний $\nu_e(t)$ применительно к принятым зависимостям $p_{e0}(e)$, $\Delta_{eT}(\delta T)$, $\Delta_{eP}(\delta P)$, $\Delta_{eV}(\delta \mu_V)$, $\Delta_{eGi}(\delta \mu_{Gi})$, $i = 1 \dots 2$.

Для поправок $\Delta_{eT}(\delta T)$, $\Delta_{eP}(\delta P)$, $\Delta_{eV}(\delta \mu_V)$, которые не имеют порогового характера, примем линейные модели вида $y = ax + b$ с учетом их равенства нулю при стандартных условиях внешней среды.

Поправки $p_{e0}(e)$, $\Delta_{eGi}(\delta \mu_{Gi})$, которые имеют нелинейный пороговый характер, примем степенные модели вида $y = a(x - x_0)^n$ при $x \geq x_0$, $y = 0$ при $x < x_0$.

Плотность вероятности энергии разряда аппроксимируем нормальным законом с математическим ожиданием и дисперсией, зависящими от времени.

Поток событий в виде искровых разрядов аппроксимируем пуассоновским потоком со средним количеством событий ν_p в единицу времени, которое может варьироваться в зависимости от условий возникновения разрядов в интервале от

нуля до некоторой максимальной величины. Максимальное среднее количество разрядов примем равным произведению удвоенной частоты переменного тока в сети на длительность интервала времени наблюдения [104, 108, 116-118].

В Приложении Б представлен программный код MatLab имитационного моделирования случайных искровых разрядов в элементе электрооборудования, а численный расчет текущей частоты возгораний $\nu_e(t)$ для данного элемента представлен ниже.

Зависимости поправок на температуру, давление и влажность окружающей среды к вероятности возгорания от одиночного разряда фиксированной энергии представлены на рисунках 4.8, 4.9, 4.10. Они имеют линейный вид и пропорциональны отклонению параметров от параметров в стандартных условиях $T_0 = 298 \text{ K} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $P_0 = 760 \text{ мм рт. ст.}$, $\mu_{V0} = 75 \text{ \%}$.

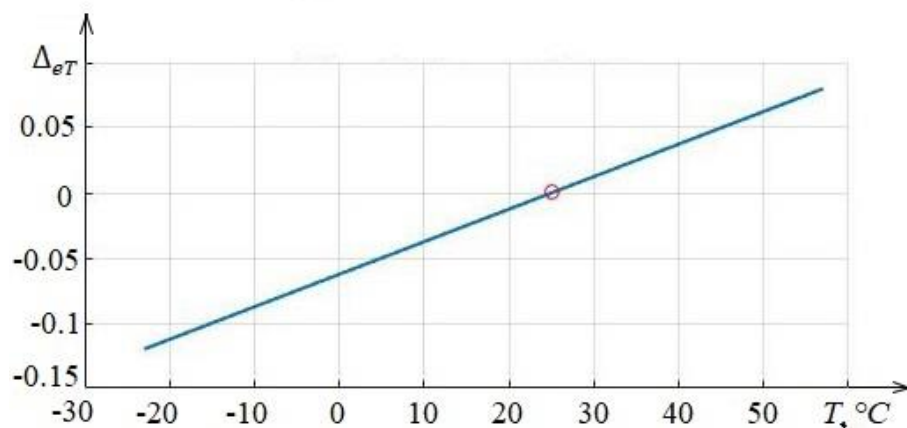


Рисунок – 4.8 Зависимость поправки на температуру окружающей среды к вероятности возгорания от одиночного разряда фиксированной энергии

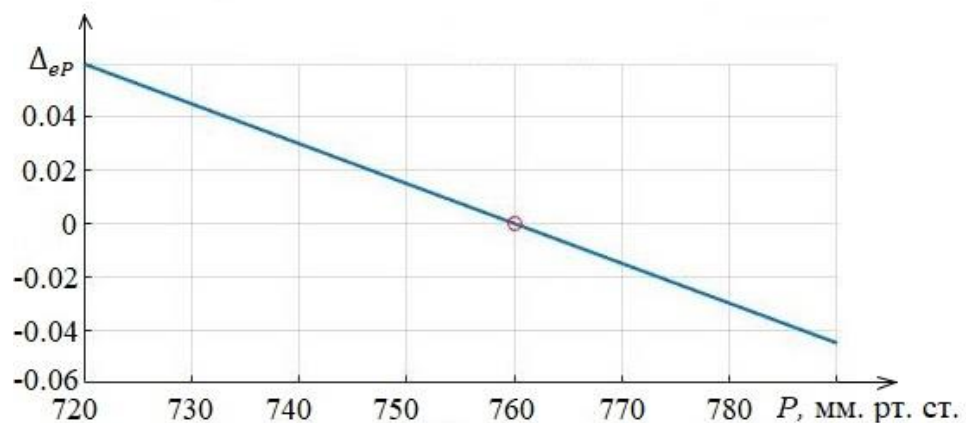


Рисунок – 4.9 Зависимость поправки на давление окружающей среды к вероятности возгорания от одиночного разряда фиксированной энергии

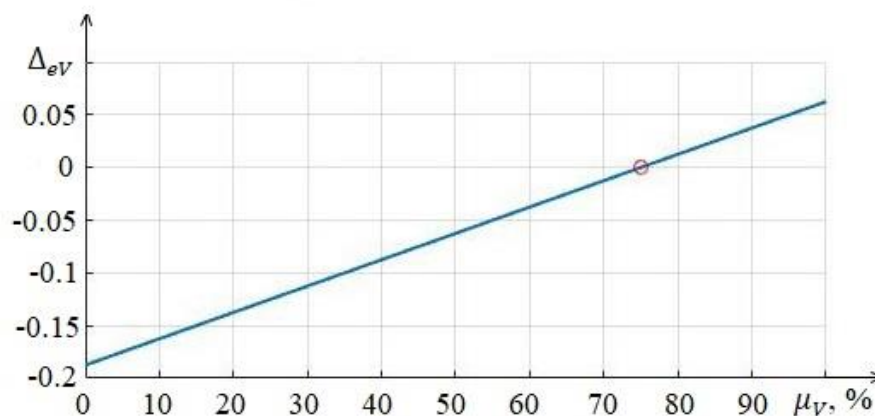


Рисунок – 4.10 Зависимость поправки на влажность окружающей среды к вероятности возгорания от одиночного разряда фиксированной энергии

Зависимости поправок на содержание горючих компонент в окружающей среде к вероятности возгорания от одиночного разряда фиксированной энергии представлены на рисунках 4.11, 4.12.

Рассматриваются две условных компоненты, одна из которых имеет умеренную пожароопасность, а другая - высокую. В качестве первой компоненты можно рассматривать пылевые частицы какого-либо горючего вещества, включая, в частности, бытовую пыль. В качестве второй компоненты можно рассматривать пары какой-либо легко воспламеняющейся жидкости или легко воспламеняющийся газ. Вероятность возгорания имеет порог по энергии разряда и быстро возрастает по нелинейному закону с ростом концентрации горючей компоненты [104, 108, 116-118].

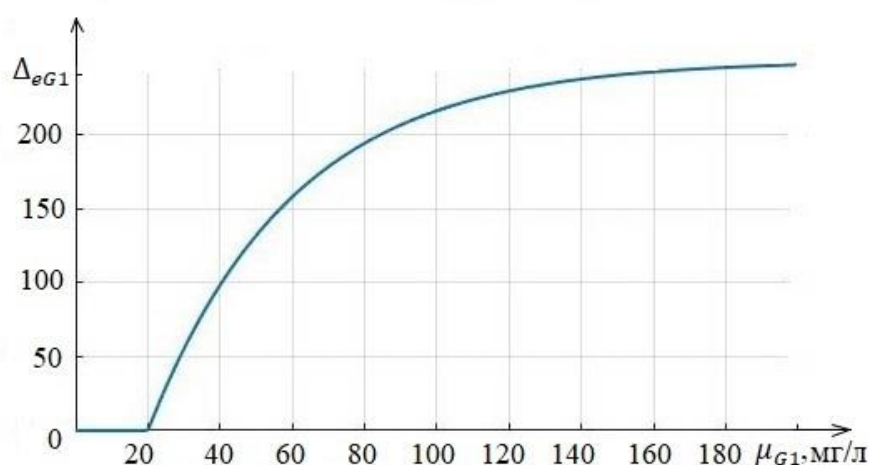


Рисунок – 4.11 Зависимость поправки на концентрацию первой горючей компоненты в окружающей среде к вероятности возгорания от одиночного разряда фиксированной энергии

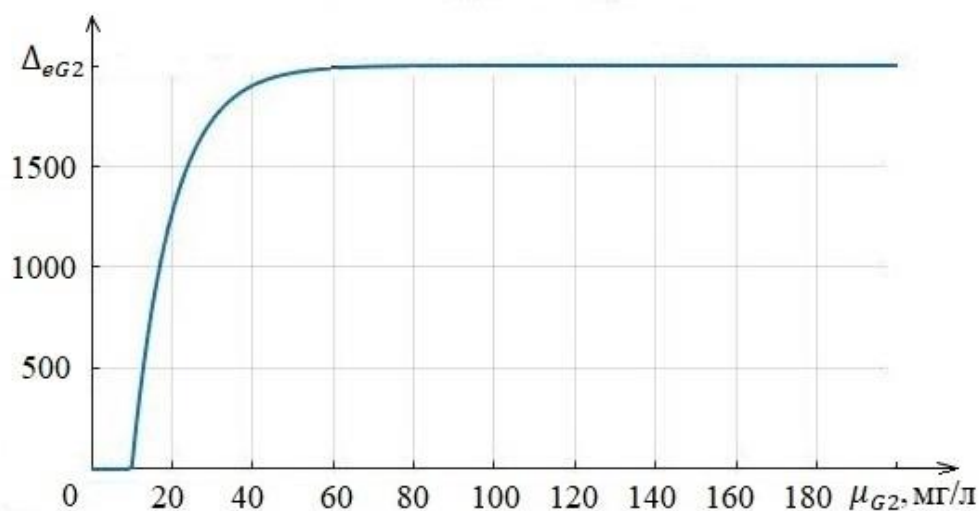


Рисунок – 4.12 Зависимость поправки на концентрацию второй горючей компонент в окружающей среде к вероятности возгорания от одиночного разряда фиксированной энергии

Рассматривается временной интервал эксплуатации элемента электрооборудования длительностью 12 часов (типичная длительность одного рейса пассажирского вагона). На данном интервале заданы условные временные профили изменения во времени параметров окружающей среды и горючих компонент. Они представлены на рисунках 4.13, 4.14, 4.15, 4.16, 4.17. Данные профили отражают фактические условия эксплуатации и на практике могут изменяться в больших пределах, что, соответственно, определяет широкий диапазон вариабельности степени пожароопасности в различных условиях эксплуатации.

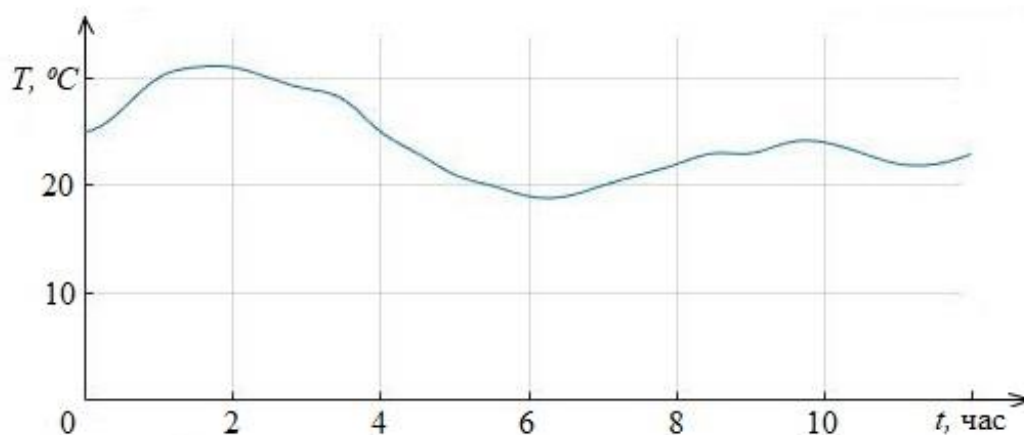


Рисунок – 4.13 Зависимость температуры от времени

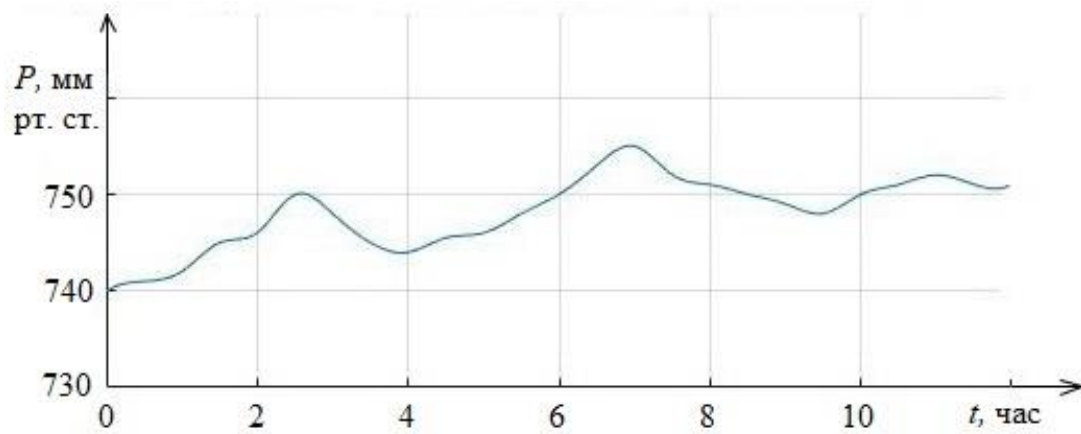


Рисунок – 4.14 Зависимость атмосферного давления от времени

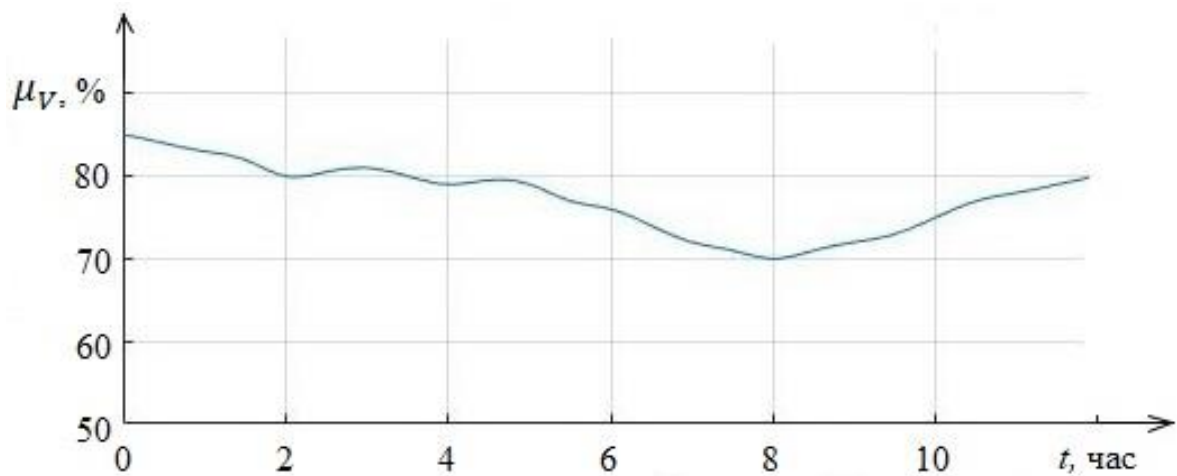


Рисунок – 4.15 Зависимость относительной влажности от времени

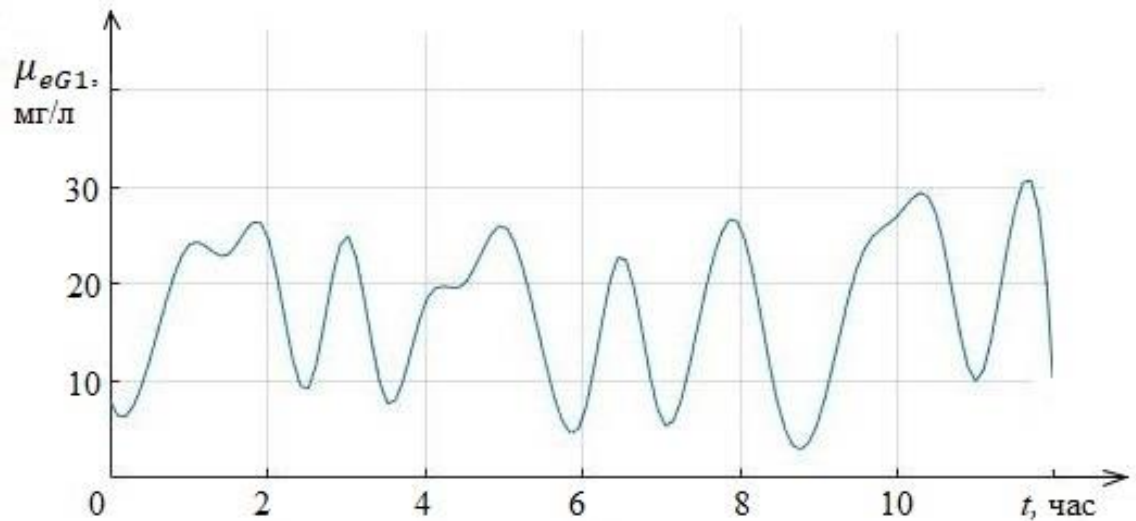


Рисунок – 4.16 Зависимость концентрации первой горючей компоненты от времени

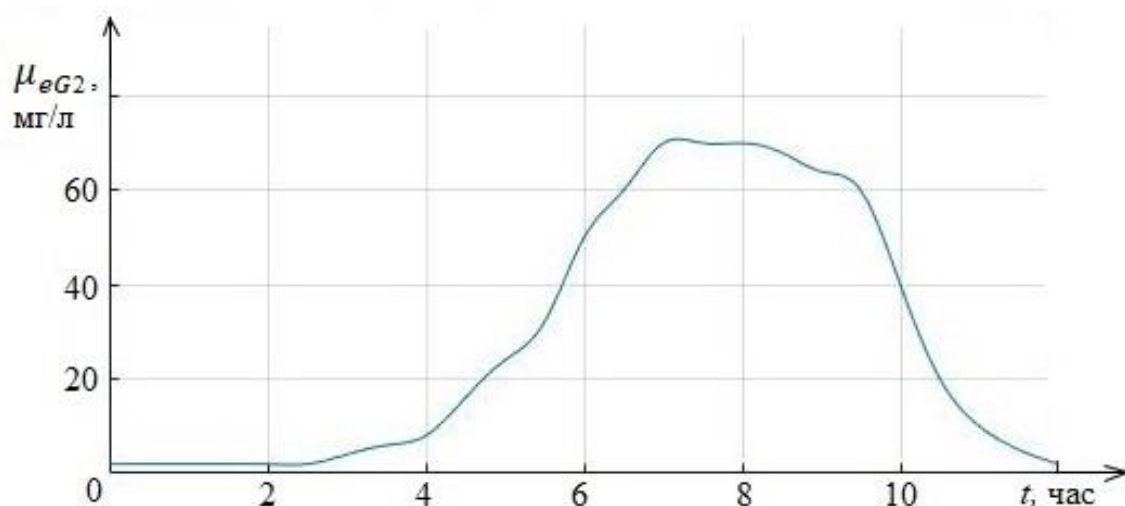


Рисунок – 4.17 Зависимость концентрации второй горючей компоненты от времени

Элемент электрооборудования может иметь дефекты, которые могут приводить к искрению, интенсивность которого зависит от электрической нагрузки на элемент и условий эксплуатации. Процесс искрения является случайным и его можно характеризовать в рамках рассматриваемой задачи частотой искрения (количеством разрядов в единицу времени) и распределением вероятности энергии разрядов. При моделировании в качестве примера взят условный профиль средней частоты искрения за время эксплуатации, представленный на рисунке 4.18.

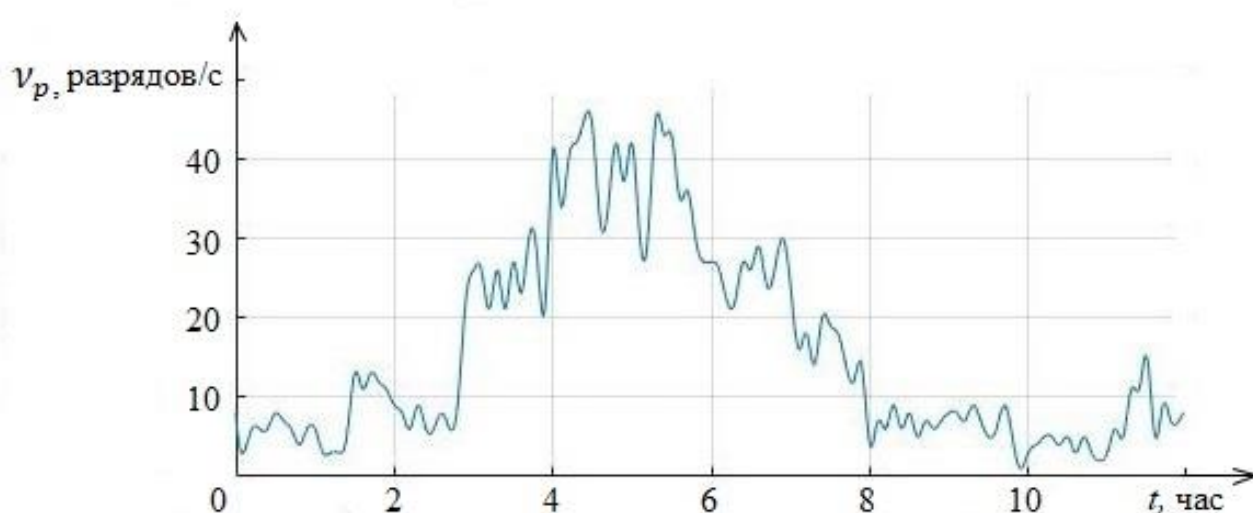


Рисунок – 4.18 Зависимость средней частоты искрения за время эксплуатации

Вид профиля на рисунке 4.18 может указывать, например, на высокую нагрузку на рассматриваемый элемент во временном интервале от 3 до 7 часов.

При моделировании предполагалось, что поток случайных событий – искровых разрядов, является квазистационарным пуассоновским с характерным временем стационарности несколько секунд или более. Соответственно, интервал наблюдения (накопления выборки параметров разрядов) датчиком искрения было задано равным 2 с [104, 108, 116-118].

Случайное количество разрядов на интервалах наблюдения имитировалось как случайная пуассоновская величина со средним значением, равным среднему значению количества разрядов на интервале наблюдения.

Величина энергии разряда имитировалась как гауссовская случайная величина со средним значением, пропорциональным частоте разрядов.

В качестве иллюстрации на рисунках 4.19, 4.20 приведены реализации гистограмм для энергии разрядов и вероятности возгорания от одиночного разряда на одном из интервалов наблюдения, полученные при моделировании.

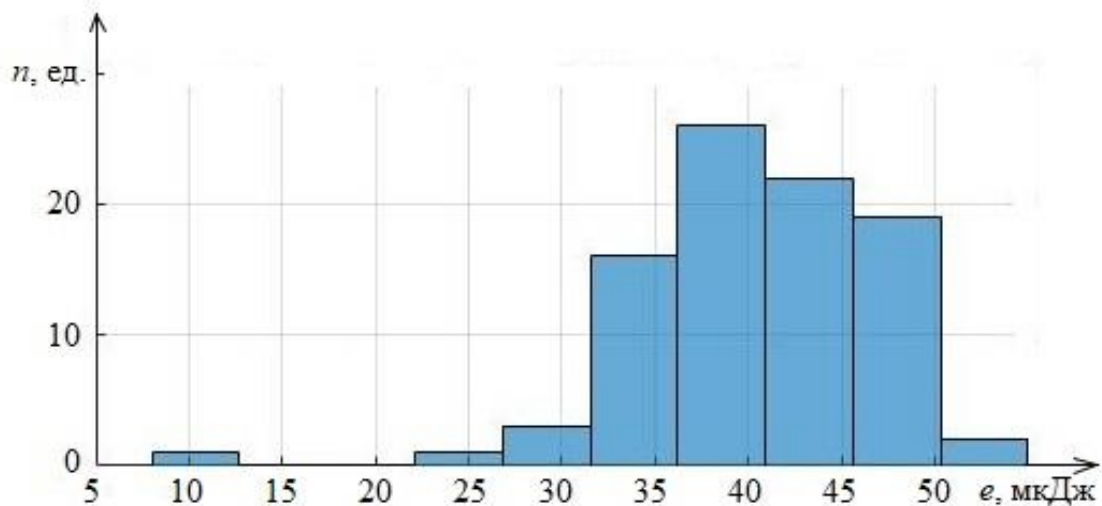


Рисунок – 4.19 Гистограмма для энергии разрядов от одиночного разряда на одном из интервалов наблюдения

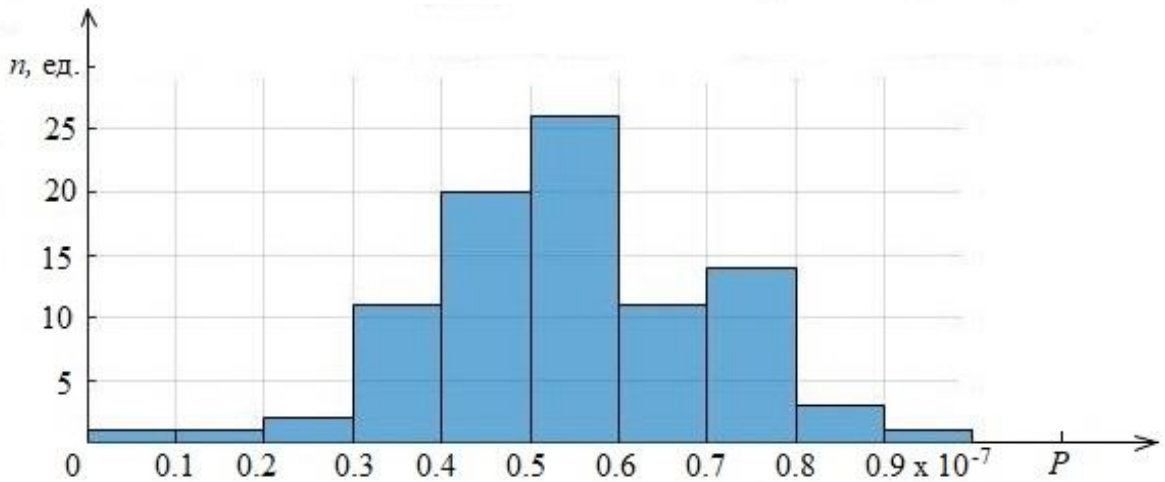
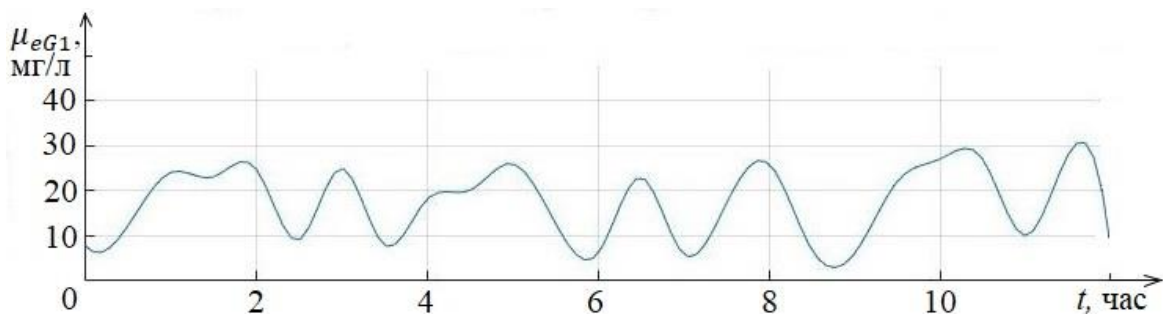


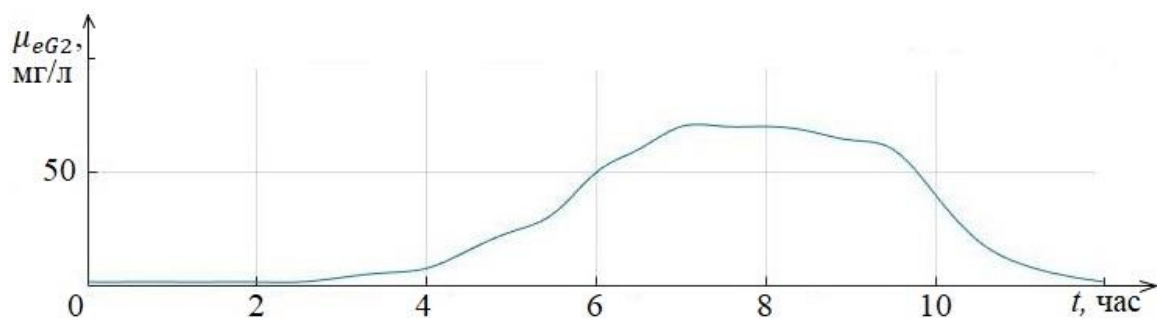
Рисунок – 4.20 Гистограмма для вероятности возгорания

Зарегистрированные датчиком искрения на каждом из интервалов наблюдений выборки энергий разрядов позволяют рассчитать по формулам (4.44), (4.49) текущую оценку вероятности возгорания на каждом интервале наблюдения, а также по формуле (4.47) – текущую оценку частоты возгораний.

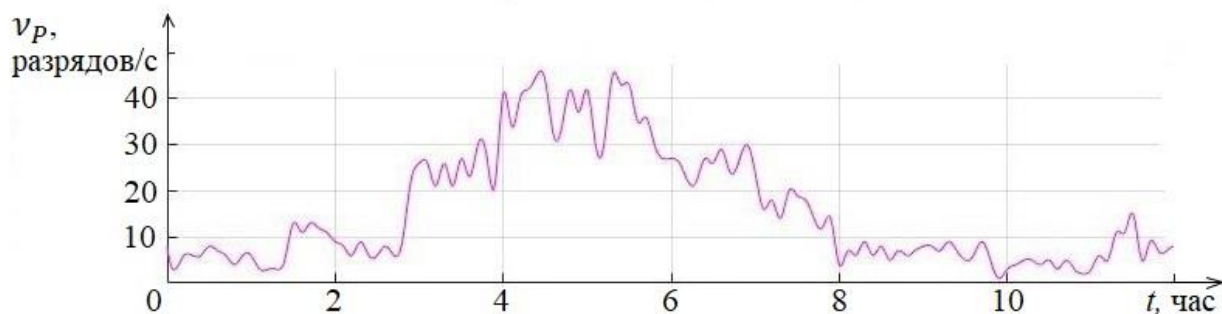
Результаты расчетов зависимостей частоты возгораний от времени на интервале эксплуатации приведены в нижней части рисунка 4.21. В его верхней части показаны также профили изменения концентраций горючих компонент и средней частоты искровых разрядов, необходимые для интерпретации результатов моделирования.



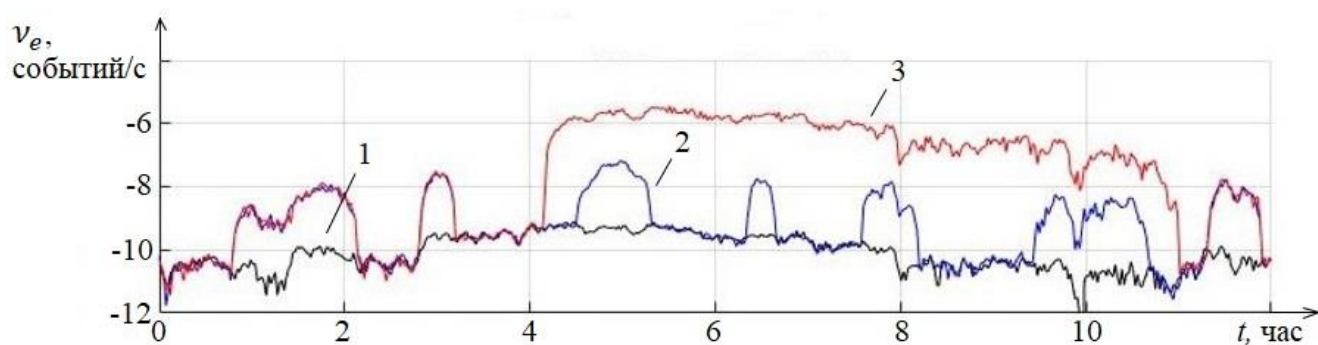
Изменение концентрации первой горючей компоненты во времени



Изменение концентрации второй горючей компоненты во времени



Изменение средней частоты разрядов во времени



Частота возгораний

Рисунок – 4.21 Зависимости частоты возгораний от времени на интервале эксплуатации, изменения концентраций горючих компонент и средней частоты искровых разрядов

На рисунке 4.21 кривая 1 относится к случаю отсутствия горючих компонент в окружающей среде, кривая 2 – наличию первой компоненты, кривая 3 – наличию первой и второй компонент. Вероятности возгорания за весь временной интервал 0 – 12 часов вычисляются по формуле (4.48). Они составляют $1.6 \cdot 10^{-7}$ в 1-м случае, $4.0 \cdot 10^{-6}$ во 2-м случае, $5.2 \cdot 10^{-4}$ в 3-м случае. Последнее значение представляется недопустимо высоким и требует принятия мер по прекращению эксплуатации рассматриваемого элемента электрооборудования. Анализ графиков на рисунке 4.21 показывает, что резкий рост вероятности

возгорания в рассмотренных условиях моделирования обусловлен сочетанием высокой интенсивности искровых разрядов и концентраций горючих компонент в окружающей среде. Такой качественный вывод сам по себе очевиден, однако представленная методика позволяет получать количественные оценки, на основе которых могут приниматься обоснованные решения по обеспечению пожаробезопасности [104, 108, 116-118].

4.6 Выводы по разделу 4

1 Результаты исследований системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов методом численного эксперимента подтверждают работоспособность рассмотренных алгоритмов обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов по оптическому излучению и возможность обнаружения локальных повреждений электропроводки по изменениям в коротковолновой части спектра теплового излучения, собираемого оптическим волокном.

2 Методика оценки вероятности возникновения пожаров, основанная на мониторинге параметров, связанных с физическими процессами, ведущими к возгоранию в элементах электрических сетей пассажирских вагонов, позволяет разработанной системе идентифицировать протекающие физические процессы и исключить из рассмотрения влияние человеческого фактора как источника пожароопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Выполнен анализ отказов основных узлов подвижного состава из-за неисправностей электрооборудования, составляющих 20 % от всего количества отказов, проведён анализ причин пожаров на подвижном составе, существующих методов, способов и средств контроля, диагностики и защиты электрических сетей пассажирских вагонов, что подтверждает актуальность проведения исследования по разработке средств защиты и оценке риска возникновения пожароопасных состояний на подвижном составе железнодорожного пассажирского транспорта.

2 Разработан метод обнаружения оптического излучения (оптической вспышки) искрового разряда по интенсивности излучения в видимом диапазоне длин волн на фоне паразитных помех, новизна которого определяется включением этапа двухканальной пороговой обработки выходного сигнала оптического излучения фотопреобразователя интеграторами со следящим порогом на фоне паразитной засветки от искусственного или естественного освещения.

3 Разработан метод определения текущей температуры в контролируемой области электропроводки по анализу спектра теплового излучения инфракрасного диапазона длин волн, новизна которого определяется включением этапа анализа спектра теплового излучения провода в двух (или более) спектральных каналах, формируемых волоконными брэгговскими решетками для выявления опасных участков проводов, которые могут вызвать возгорание.

4 Разработаны структурно-функциональная организация системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов и алгоритмы, позволяющие осуществлять мониторинг пожароопасных состояний в элементах электрических сетей пассажирских вагонов на основе волоконно-оптических датчиков на стоянках и на ходу движения поезда, что даёт

возможность ранней диагностики и профилактики возникновения пожаров в пассажирских вагонах.

5 Проведены исследования системы оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей пассажирских вагонов методом численного эксперимента, что подтверждает корректность основных предложений по структурно-функциональной организации системы.

6 Предложена методика оценки вероятности возникновения пожаров, основанная на мониторинге параметров, связанных с физическими процессами, ведущими к возгоранию в элементах электрических сетей пассажирских вагонов, позволяющая разработанной системе идентифицировать протекающие физические процессы и исключить из рассмотрения влияние человеческого фактора как источника пожароопасности. Методика рекомендуется для оценки итогового количественного показателя, который определяет необходимость проведения превентивных мер для оперативного вызова дежурной бригады или принятия решения для устранения пожароопасной ситуации в ходе движения подвижного состава силами дежурной смены поезда.

7 Выявлено, что из известных систем мониторинга пожароопасности электрических сетей наиболее близкими к разработанной являются «Способ предупреждения пожара от искрения в электрической сети или электроустановках и устройство для его осуществления» и «Устройство диагностики и мониторинга пожароопасности электрических сетей электроснабжения объектов». В первом случае недостатком данной системы по сравнению с разработанной является меньшая информативность о пожароопасности искрения, поскольку не учитывается энергия разрядов искрения и условия внешней среды. Состояние электропроводов с повреждениями электроизоляции контролируется недостаточно полно, поскольку в ряде случаев в местах повреждений искрение может отсутствовать. Во втором случае система мониторинга отличается от первой добавлением датчиков задымления, анализа воздуха и открытого огня, что увеличивает эффективность обнаружения возгорания, но не изменяет эффективность решения задачи диагностики и оценки вероятности возгорания.

Проведенные теоретические исследования и численные эксперименты дают основания полагать, что разработанная система мониторинга имеет бóльшие функциональные возможности в части оценки и прогнозирования вероятности возгорания и раннего предупреждения о риске возникновения пожара.

8 Реализованная на основе предложенных методов система оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей рекомендуется к внедрению и применению в составе технических систем подвижного состава для выявления опасных участков проводов, которые могут вызвать возгорание, и обнаружения локальных повреждений электропроводки пассажирского вагона.

9 В качестве направлений дальнейших исследований представляется перспективным разработка методов и средств ранней диагностики пожароопасных состояний на основе спектральных признаков оптических излучений, возникающих при наличии неисправностей в электрических сетях пассажирских вагонов на основе искусственного интеллекта.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП - аналого-цифровой преобразователь

БД - база данных

ВБР - волоконная брэгговская решетка

ВОД - волоконно-оптический датчик

КЗ - короткое замыкание

КРУ - комплектное распределительное устройство

МТЗ – максимальная токовая защита

ОЦ - оптический циркулятор

П - пороговое устройство

ПВ – пассажирский вагон

ПММА - полиметилметакрилат

ПОС – пожароопасное состояние

РЩ - распределительный щит

СОЗЭС - система оценки пожароопасных состояний и защиты электрических сетей

СПО – специальное программное обеспечение

ФД - фотодетектор

ФП - фотоприемник

ЭВМ - электронная вычислительная машина

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Пожары и пожарная безопасность в 2017 году : статистический сборник / Всероссийский ордена «Знак почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны министерства Российской федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» ; под общей редакцией Гордиенко Д. М. – Москва, 2018 - . – URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-disk-public%3A%2F%2FVKigytIRPTp%2BXuKJkuaJnkYoopFSI05%2FWuTcKFNAkdvPgwdVfQb%2FI6X%2FXZCxuAI5q%2FJ6bpmRyOJonT3VoXnDag%3D%3D&name=sbornik2017.pdf> (дата обращения: 09.04.2019). – Текст : электронный.

2 Пожары и пожарная безопасность в 2019 году : статистический сборник / Всероссийский ордена «Знак почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны министерства Российской федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» ; под общей редакцией Гордиенко Д. М. – Москва, 2020 - . - URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-disk-public%3A%2F%2FKoshFJJmD1wkghdrZ5TISa8dmNWAM9%2FE0nGXIF3PMXSnyxFHUm4o%2F9XCVT3lHiM8q%2FJ6bpmRyOJonT3VoXnDag%3D%3D&name=sbornik2019.pdf&nosw=1> (дата обращения: 06.04.2020). – Текст : электронный.

3 Пожары и пожарная безопасность в 2021 году: статистический сборник / Всероссийский ордена «Знак почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны министерства Российской федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» ; под общей редакцией Гордиенко Д. М. – Москва, 2022 - . - URL: <https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-disk-public%3A%2F%2FqJBGyvjeehDulMIAKIX0CerE%2FT24STJxC6SoQdWXTiRBgnrioP4zWvupyaN%2Fk%2BrHq%2FJ6bpmRyOJonT3VoXnDag%3D%3D&name=sbornik2021.pdf&nosw=1> (дата обращения: 11.04.2022). – Текст : электронный.

4 Пожары и пожарная безопасность в 2022 году: информационно-аналитический сборник / Всероссийский ордена «Знак почёта» научно-исследовательский институт противопожарной обороны министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий» ; под общей редакцией Гордиенко Д. М. – Москва, 2023 - . - URL: <https://drive.google.com/file/d/1sy2o7HEBPf5GXAf2qaxWG7t4dPHag3GZ/view> (дата обращения: 17.04.2023). – Текст : электронный.

5 Елисеев, И. Б. Методика оценки и способы снижения пожарной опасности пассажирских вагонов железнодорожного подвижного состава : специальность 05.26.03 «Пожарная и промышленная безопасность» : диссертация на соискание степени кандидата технических наук / Елисеев Игорь Борисович ; Санкт – Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России. – Санкт–Петербург, 2018. – 122 с. – Текст : непосредственный.

6 Сметанина, М. И. Состояние пожарной безопасности на железнодорожном транспорте в Российской Федерации / М. И. Сметанина, О.С. Власова. // Научное сообщество студентов: Междисциплинарные исследования: материалы III международной студенческой научно-практической конференции / Волгоградский государственный технический университет ВолГТУ. – Новосибирск: Изд. АНС «СибАК», 2018. - № 17(52). - С. 85-89. - Текст : непосредственный.

7 Пассажирка загоревшегося в Рязани вагона поезда рассказала ЧП / rzn.info : [сайт]. – 2020. - 8 апр. – URL: <https://www.rzn.info/news/2020/4/8/passazhirka-zagorevshegosya-v-ryazani-poezda-rasskazal-podrobnosti-chp.html> (дата обращения: 08.04.2020). - Текст : электронный.

8 В одном из вагонов пассажирского поезда Томск - Анапа произошел пожар / tass.ru : [сайт]. – 2018. - 1 сент. – URL: <https://tass.ru/proisshestviya/5513966/> (дата обращения: 01.09.2018). - Текст : электронный.

9 Ночью под Ростовом загорелся поезд Саратов-Адлер / fn-volga.ru : [сайт]. – 2018. - 11 июл. – URL: <https://fn-volga.ru/news/view/id/86652/> (дата обращения: 11.07.2018). - Текст : электронный.

10 Пожар на железнодорожных путях в Архангельске уничтожил пассажирский вагон РЖД / news29.ru : [сайт]. – 2019. – 11 апр. - URL: https://www.news29.ru/novosti/proishestvija/Pozhar_na_zheleznodorozhnyh_putjah_v_Arhangelske_unichtozhil_passazhirskij_vagon_RZhD/80269/ (дата обращения: 11.04.2019). - Текст : электронный.

11 **Ледащева, Т. Ю.** Электрические аппараты и цепи вагонов : учебное пособие / Т. Ю. Ледащева ; Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – Москва : 2016. – 144 с. – ISBN 978-5-89035-899-8. – Текст : непосредственный.

12 **Зыков, Ю. В.** Расчет и выбор энергетического оборудования пассажирского вагона и вагоноремонтного предприятия : учебно-методическое пособие / Ю. В. Зыков ; Уральский государственный университет путей сообщения. – Екатеринбург : УрГУПС (университет), 2009. – 66 с. – Текст : непосредственный.

13 **Хряпенков, Г. А.** Электрические аппараты и цепи вагонов : учебник для техникумов и колледжей железнодорожного транспорта / Г. А. Хряпенков, Е. П. Стрыжаков ; Издательство Маршрут. – Москва : Маршрут, 2006. - 544 с. - Текст : непосредственный.

14 **Хряпенков, Г. А.** Электрические аппараты и цепи пассажирских вагонов : учебное пособие / Г. А. Хряпенков ; Издательство Маршрут. – Москва : Маршрут, 2003. - 26 с. - Текст : непосредственный.

15 **Воронова, Н. И.** Техническая эксплуатация пассажирских вагонов : учебник / Н. И. Воронова, Н. Е. Разинкин, В. А. Дубинский ; Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте. – Москва : 2016. - 211 с. - ISBN 978-5-89035-925-4. – Текст : непосредственный.

16 **Акимов, Е. Г.** Электротранспорт : справочник / Е. Г. Акимов; Ай-Би-Тех. – Москва : 2005. – 332 с. – Текст : непосредственный.

17 **Гомола, Г. Г.** Централизованное электроснабжение пассажирских поездов: современное состояние и перспективы / Г. Г. Гомола, В. А. Корольков // Вестник ВНИИЖТ. – 1997. – № 2. – С. 41–47. - Текст : непосредственный.

18 **ГОСТ 6962–75.** Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений : государственный стандарт СССР : издание официальное : утверждён и введён в действие постановлением государственного комитета стандартов Совета министров СССР от 14 ноября 1975 г. № 3137. – Москва : Издательство стандартов, 1976. – 3 с. - Текст : непосредственный.

19 **Комаров, Ю. И.** Унифицированный комплекс электрооборудования пассажирских вагонов / Ю. И. Комаров // Известия ПГУПС. - 2007. – №3. - С. 36–41. - Текст : непосредственный.

20 **Колбаснер, М. Г.** Унификация системы индивидуального энергоснабжения пассажирских вагонов / М. Г. Колбаснер, Ю. Н. Кадуба // Железнодорожный транспорт. – 1974. – №11. - С. 51–53. - Текст : непосредственный.

21 **Gramer, G.** Модульная система электроснабжения пассажирских вагонов / G. Gramer // Железные дороги мира. – 2000. – №6. - С. 47–51. - Текст : непосредственный.

22 **Комаров, Ю. И.** Электроснабжение пассажирских вагонов / Ю. И. Комаров // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2007. – №1(10). – С. 41–54. - Текст : непосредственный.

23 **Герхард, Т.** Тенденции в области разработки пассажирских вагонов / Т. Герхард // Железные дороги мира. – 2003. – № 1. – С. 22–26. - Текст : непосредственный.

24 **Комаров, Ю. И.** Обобщенный критерий минимизации затрат на техническое содержание пассажирских вагонов / Ю. И. Комаров // Известия петербургского университета путей сообщения. - 2006. - №1(6). – С. 51–56. - Текст : непосредственный.

25 **Кимстач, И. Ф.** Пожарная тактика : учебное пособие / И. Ф. Кимстач, П. П. Девлишев, Н. М. Евтюшкин ; Издательство Стройиздат – Москва : 1984. - 592 с. - Текст : непосредственный.

26 **Крупенин, С. С.** Развитие системы и организация работы по обеспечению пожарной безопасности на железнодорожном транспорте / С. С. Крупенин, К. Б. Кузнецов // Научно-технический и производственный журнал «Наука и техника транспорта». - 2004. - №4. – С. 32 – 39. - Текст : непосредственный.

27 **Проневич, О.Б.** Автоматизированная система прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков / И.Б. Шубинский // Надежность. - 2019. - №19(1). – С. 48 – 54. - Текст : непосредственный.

28 **Ханис, В. А.** Модель обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов в электрических сетях пассажирских вагонов на основе применения волоконно-оптических датчиков / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис // Транспорт Урала. - 2021. - №3 (70). – С. 46 – 51. - Текст : непосредственный.

29 **Асламова, В. С.** Системный анализ причин возникновения пожаров на локомотивах ОАО «РЖД» / В. С. Асламова, Е. Ю. Фролова // Иркутский государственный институт путей сообщения. - 2018. – №4(60). - С.63-70. - Текст : непосредственный.

30 **Гармышев, В. В.** Обстановка с пожарами на подвижном составе железнодорожного транспорта Российской Федерации / В. В. Гармышев, А. В. Малыхин, В. А. Тарасенко, И. В. Черных // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. - 2001. - № 1. - С.48-52. - Текст : непосредственный.

31 Руководство по тушению пожаров на железнодорожном транспорте.- Москва: УВО МПС, 2001. – 198 с. – Текст : непосредственный.

32 **Ханис, В. А.** Пожарная безопасность пассажирского подвижного состава / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. А. Ханис, А. Л. Ханис // Актуальные вопросы эксплуатации подвижного состава в современных условиях: материалы

международной студенческой научно-практической конференции / Самарский государственный университет путей сообщения филиал СамГУПС. - Нижний Новгород, 2021, - С. 143-152 - Текст : непосредственный.

33 **Ханис, В. А.** Обзор состояния пожарной безопасности и причин возникновения пожаров на железнодорожном транспорте / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. А. Ханис, А. Л. Ханис // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология: материалы международной научно-практической конференции / Якутский институт водного транспорта (филиал) СГУВТ. - Якутск, 2021, - С. 164-175. - Текст : непосредственный.

34 **Серебровский, В. В.** Метод анализа пожаробезопасности при применении модульной структуры автоматизированной защиты помещений центров обработки данных / В. В. Серебровский, Н. А. Ханис, А. Л. Ханис // Известия ЮЗГУ. - 2015. - №1(14). – С. 42 – 48. - Текст : непосредственный.

35 **Гуменюк, В. И.** Диагностика и анализ больших переходных сопротивлений для обеспечения пожарной безопасности электрических контактов / В. И. Гуменюк, А. М. Гренчук // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2014. - №4(207). – С. 92 – 99. - Текст : непосредственный.

36 **Гуменюк, В. И.** О возможности массового применения средств диагностики пожароопасного состояния электрооборудования / В. И. Гуменюк, А. М. Гренчук // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. - 2014. - №2(195). – С. 210 – 215. - Текст : непосредственный.

37 **Ханис, В. А.** Диагностика и раннее предупреждение пожароопасных состояний в вагонах пассажирского подвижного состава / В. А. Ханис, А. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис // материалы XXIX международного конкурса научно-исследовательских работ : научные статьи по техническим наукам / Всероссийское общество научно-исследовательских разработок ОНР «ПТСАЙНС». - Москва, 2020. - С. 53-59. - Текст : непосредственный.

38 Серебровский, В. В. Метод и алгоритм анализа и прогнозирования пожаробезопасности при применении модульной структуры автоматизированной защиты помещений центров обработки данных / В. В. Серебровский, Н. А. Ханис, Е. В. Журавлева, А. Л. Ханис // Известия ЮЗГУ. 2015. №2 (15). - С. 47–54. ISSN 2223-1536. - Текст : непосредственный.

39 Ханис, В. А. Метод контроля пожароопасности электропроводки пассажирского вагона / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, И. А. Ключиков, А. А. Ханис // Железная дорога : путь в будущее : материалы I Международной научной конференции аспирантов и молодых учёных. – Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта. - Москва, 2022. - С. 127–130. - Текст : непосредственный.

40 Ханис, В. А. Диагностика и раннее предупреждение пожароопасных состояний в вагонах пассажирского подвижного состава / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис // Образование – Наука – Производство: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции / Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал Иркутского государственного университета путей сообщения. - Чита, 2020. - С. 67-73. - Текст : непосредственный.

41 Патент № 2254615 Российская Федерация, МПК G08B 17/06, 25/10. Способ предупреждения пожара от искрения в электрической сети или электроустановке и устройство для его осуществления : № 2003120730/09 : заявл. 10.07.03 : опубл. 20.06.05 / Королев И. С., Королев А. И., Новикова Е. И. – 6 с. : ил. - Текст : непосредственный.

42 Патент № 2571513 Российская Федерация, МПК G08B (2006.01). Способ предупреждения пожара от искрения в электрической сети или электроустановке и устройство для его осуществления : № 2013118132/08 : заявл. 22.04.13 : опубл. 20.12.15 / Королев И. С., Королев А. И., Новикова Е. И. – 13 с. : ил. - Текст : непосредственный.

43 Королев, И. С. Способ обнаружения пожаровзрывоопасных неисправностей в электроустановках / И. С. Королев, Б. М. Степанов // Пожаровзрывобезопасность. 2003. №1. - С. 47–50. - Текст : непосредственный.

44 Королев, И. С. Работа с устройством предупреждения пожара «Искра» по выявлению искрения в электросети или электроустановке / И. С. Королев // Пожаровзрывобезопасность. 2006. №2. - С. 48–54. - Текст : непосредственный.

45 Патент № 2374691 Российская Федерация, МПК G08B 17/00 (2006.01) H02H 3/00 (2006.01). Способ предупреждения пожара от искрения в электрической сети или электроустановке и устройство для его осуществления : № 2008145312/09 : заявл. 17.11.08 : опубл. 27.11.09 / Кривов Ю. Н., Тонкий Л. В., Царев А. Б. : – 12 с. : ил. - Текст : непосредственный.

46 Патент № 126876 Российская Федерация, МПК H02H 3/00 (2006.01). Устройство диагностики и мониторинга состояния пожароопасности электрических сетей энергоснабжения объектов : № 2011147572/07 : заявл. 24.11.11 : опубл. 10.04.13 / Бурмака А. А., Емельянов С. Г., Атакищев О. И. [и др.] ; заявитель ЮЗГУ. – 6 с. : ил. - Текст : непосредственный.

47 Патент № 2528137 Российская Федерация, МПК G08B 17/06 (2006.01). Способ для автоматизированного предупреждения пожара от искрения в электрических сетях или электроустановках и устройство для его реализации : № 2012135372/08 : заявл. 17.08.12 : опубл. 10.09.14 / Мкртумов А. С., Немцов А. Н., Немцов Ф. Н. : заявитель ООО «Эколайт». – 7 с. : ил. - Текст : непосредственный.

48 Патент № 2660285 Российская Федерация, МПК G01R 31/08 (2006.01) G01R 15/14 (2006.01) H02H 7/26 (2006.01). Устройство защиты от искрения и способ его работы: № 2017135565 : заявл. 05.10.17 : опубл. 05.07.18 / Мкртумов А. С., Немцов А. Н., Немцов Ф. Н. : – 26 с. : ил. - Текст : непосредственный.

49 Патент № 2275624 Российская Федерация, МПК G01N 27/02 (2006.01). Способ выявления скрытых признаков очага пожара, путей распространения горения и устройство для его реализации: №2004134368/28 :

заявл. 25.11.04 ; опубл. 27.04.06 / Чешко И. Д., Вакуленко С. В., Соколова А. Н. : заявитель ФГУ ВНИИПО МЧС России. – 9 с. : ил. - Текст : непосредственный.

50 Патент № 2700659 Российская Федерация, МПК H02H 3/08 (2006.01) G08B 17/06 (2006.01). Способ определения места искрения в электрической сети и устройство для его осуществления : № 2017143605 : заявл. 13.12.17 : опубл. 18.09.19 / Королев И. С., Гладышев А. И. : заявитель ФГКВОУ ВО «Военная академия ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого» МО РФ. – 14 с. : ил. - Текст : непосредственный.

51 Патент № 2700659 Российская Федерация, МПК H02H 7/26 (1995.01). Устройство дуговой защиты : № 96119439/20 : заявл. 26.09.96 : опубл. 16.01.98 / Демьянович М. В., Казачков Ю. П. : заявитель Научно-исследовательский институт импульсной техники. – 7 с. : ил. - Текст : непосредственный.

52 Патент № 2379811 Российская Федерация, МПК H02H 7/26 (1995.01). Устройство дуговой защиты : № 2008115995/09 : заявл. 22.04.08 : опубл. 20.01.10 / Казачков Ю. П. : заявитель Научно-исследовательский институт импульсной техники. – 7 с. : ил. - Текст : непосредственный.

53 Патент № 132632 Российская Федерация, МПК H02H 7/26 (1995.01). Волоконно-оптический датчик открытой электрической дуги дуговой защиты элегазовых комплектных распределительных устройств : № 2013104036/07 : заявл. 31.01.13 : опубл. 20.09.13 / Казаков С. В. : заявитель ООО «Синтез-электро». – 4 с. : ил. - Текст : непосредственный.

54 Патент № 172284 Российская Федерация, МПК H02H 7/22 (2006.01) H02H 7/26 (2006.01). Датчик электрической дуги : № 2017103701 : заявл. 03.02.17 : опубл. 04.07.17 / Васин Е. Н. : заявитель ЗАО «Меандр». – 7 с. : ил. - Текст : непосредственный.

55 Патент № 2419941 Российская Федерация, МПК H02H 7/26 (2006.01). Совмещенный датчик электрической дуги : № 2010123334/07 : заявл. 08.06.10 : опубл. 27.05.11 / Казачков Ю. П. : заявитель ФГУП «ВНИИА». – 8 с. : ил. - Текст : непосредственный.

56 **Беленков, А.** Оптические системы обнаружения электрической дуги в комплектных распределительных устройствах / А. Беленков, И. Швечиков, А. Елисеев // Компоненты и технологии. 2016. №3. - С. 40–44. - Текст : непосредственный.

57 **ВЕМО 08.00.00.000 ДМ.** Методика тепловизионной неразрушающей диагностики электрооборудования (основные положения). – Москва : 2003. – 136 с. - Текст : непосредственный.

58 **РД 153-34.0-20.363-99.** Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и высоковольтных линий : издание официальное : утверждён и введён в действие департаментом стратегии развития и научно-технической политики РАО «ЕЭС России» 14 декабря 1999 г. – Москва : ОАО "Фирма ОРГРЭС", 1999. – 136 с. - Текст : непосредственный.

59 **Пехотиков, В. А.** Обеспечение пожарной безопасности электроустановок жилых и общественных зданий с применением методов тепловизионного контроля / В. А. Пехотиков [и др.] // Пожарная безопасность. 2011. №1. - С. 118-123. - Текст : непосредственный.

60 Проверка пожарной опасности электрооборудования жилых и общественных зданий с помощью тепловизора. Методические рекомендации. – Москва: ВНИИПО, 2014. – 28 с. – Текст : непосредственный.

61 Защита от электрической дуги: безопасные и эффективные методы тепловизионного контроля / test-energy.ru : [сайт]. – URL: <https://test-energy.ru/zashchita-ot-ehlektricheskoy-dugi-bezopasnye-i-ehffektivnye-metody-teplovizionnogo-kontrolya/> (дата обращения: 07.09.2021). - Текст : электронный.

62 **Филиппов, В. Н.** Результаты комплексных исследований пожаровзрывобезопасности цистерн для перевозки сжиженных углеводородных газов / В. Н. Филиппов, В. Г. Попов, С. В. Беспалько, Ю. Н. Шебеко, В. Ю. Навценя // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 10. – С. 43-49. - Текст : непосредственный.

63 Филиппов, В. Н. Моделирование поведения железнодорожной цистерны с СУГ в очаге пламени / В. Н. Филиппов, Ю. Н. Шебеко, В. М. Пономарев, В. Ю. Навценья, С. В. Беспалько, О. В. Плицына // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, №11. – С. 41-51. - Текст : непосредственный.

64 Евсеев, Д. Г. О необходимости формирования единой технической политики для обеспечения пожарной безопасности перевозки опасных грузов по железным дорогам России / Д. Г. Евсеев, В. Н. Филиппов, Г. И. Петров, Ю. Н. Шебеко, С. В. Беспалько // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – Т. 27, № 9. – С. 26-34. - Текст : непосредственный.

65 Филиппов, В. Н. Пожаровзрывобезопасность перевозок сжиженных углеводородных газов железнодорожным транспортом / В. Н. Филиппов, А. П. Шевчук [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1993. – № 6. – С.35-39. - Текст : непосредственный.

66 Шебеко, Ю. Н. Способы противопожарной защиты резервуаров со сжиженными углеводородными газами / Ю. Н. Шебеко, В. Н. Филиппов [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 1999. – № 4. – С. 33-42. - Текст : непосредственный.

67 Шебеко, Ю. Н. Методы исследования искробезопасности материалов / Ю. Н. Шебеко, В. Ю. Навценья, А. К. Костюхин, Э. Д. Замышевский, С. Н. Копылов, Д. Ю. Шебеко // Пожаровзрывобезопасность. – 2000. – Т. 9, № 1. – С. 18-27. - Текст : непосредственный.

68 Навценья, В. Ю. Влияние длительной эксплуатации и деформационного старения конструкционной стали 09Г2С на сопротивление разрушению и искрообразующую способность / В. Ю. Навценья, В. Г. Стручалин, Н. О. Ливанова, Г. А. Филиппов // Проблемы черной металлургии и материаловедения. – 2015. – №1. – С. 87-92. - Текст : непосредственный.

69 Шебеко, Ю. Н. Экспериментальное исследование поведения тонкостенных оболочек в очаге пламени / Ю. Н. Шебеко, В. А. Назаренко, В.

Н. Филиппов // Пожарная безопасность. – 2004. – № 2. – С. 64-71. - Текст : непосредственный.

70 Патент № 88454 Российская Федерация, МПК G01R 31/28 (2006.01).
Устройство диагностики электрооборудования пассажирских вагонов : № 2009124076/22 : заявл. 24.06.09 : опубл. 10.11.09 / Гаранжа И. В., Харламов В. М. : ОАО «Российские железные дороги». – 4 с. : ил. - Текст : непосредственный.

71 Патент № 2561483 Российская Федерация, МПК B60S 5/00 (2006.01) G01M 17/08 (2006.01), G01R 31/00 (2006.01), B61D 5/00 (2006.01). Способ контроля и диагностики электрооборудования вагонов- термоцистерн : № 2014127709/11 : заявл. 08.07.14 : опубл. 27.08.15 / Никитин А. В., Сапрыкин В. В. : заявитель ООО «Газпромтранс». – 14 с. : ил. - Текст : непосредственный.

72 Патент № 46895 Российская Федерация, МПК H04B 7/26 (2006.01).
Система контроля безопасности и связи пассажирского поезда : № 2005102472/22 : заявл. 02.02.05 : опубл. 27.07.05 / Финк Ю. М., Коваленко В. Н., Осипенко А. В. [и др.]. : – 8 с. : ил. - Текст : непосредственный.

73 Патент № 2329177 Российская Федерация, МПК B61L 25/00 (2006.01) H04B 7/26 (2006.01). Система контроля безопасности и связи пассажирского поезда : № 2006139411/11 : заявл. 09.11.06 : опубл. 20.07.08 / Финк Ю. М., Коваленко В. Н., Осипенко А. В. [и др.]. : – 6 с. : ил. - Текст : непосредственный.

74 Патент № 94395 Российская Федерация, МПК H04B 7/26 (2006.01).
Система контроля безопасности и связи пассажирского поезда : № 2006139411/11 : заявл. 25.12.09 : опубл. 20.05.10 / Ряховский В. И., Коваленко В. Н., Наумчук Г. Л. [и др.] : заявитель ЗАО «Аэрокосмические технологии». – 2 с. : ил. - Текст : непосредственный.

75 Патент № 91706 Российская Федерация, МПК B61L 27/00 (2006.01) B61L 29/00 (2006.01). Многоуровневая система обеспечения безопасности перевозок на железнодорожном транспорте : № 2009126435/22 : заявл. 10.07.09 : опубл. 27.02.10 / Розенберг Е. Н., Шевцов Б. В. : заявитель ОАО «Российские железные дороги». – 9 с. : ил. - Текст : непосредственный.

76 Патент № 2579603 Российская Федерация, МПК B61L 23/00 (2006.01). Центральная управляющая система системы контроля безопасности и связи пассажирского поезда : № 2014142042/11 : заявл. 20.10.14 : опубл. 10.04.16 / Ишимов В. В., Карнаух Р. Н., Подзоров П. В. : заявитель ЗАО «Аэрокосмические технологии». – 8 с. : ил. - Текст : непосредственный.

77 Патент № 2641402 Российская Федерация, МПК A62C 37/00 (2006.01). Локомотивная система раннего обнаружения и тушения пожара : № 2016118790: заявл. 16.05.16 : опубл. 17.01.18 / Абрамов О. В., Марченков А.В., Комков Е. В. [и др.]. : заявитель ООО «АВП Технология». – 8 с. : ил. - Текст : непосредственный.

78 Шабров, С. М. Обеспечение пожарной безопасности на тяговом подвижном составе дирекции тяги и анализ причин возникновения пожаров / С. М. Шабров // Технологии техносферной безопасности. - 2018. – №4(80). - С. 36-45. - Текст : непосредственный.

79 Проневич, О. Б. Методы анализа пожарной безопасности тягового подвижного состава / О. Б. Проневич // Надёжность. - 2017. - № 17(2). - С. 48-55. - Текст : непосредственный.

80 Шубинский, И. Б. Особенности оценки вероятности возникновения пожаров на тепловозах различных серий / И. Б. Шубинский, О. Б. Проневич, А. Д. Данилова // Надёжность. - 2016. - № 4. - С. 24-29. - Текст : непосредственный.

81 Орлов, А. И. Организационно-экономическое моделирование : в 2 частях / А. И. Орлов. – Москва : изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. - Текст : непосредственный.

Ч 2 : Статистические методы анализа данных. – 2012. - 623 с.

82 Патент № 2574473 Российская Федерация, МПК B61D 1/00 (2006.01) B61D 37/00 (2006.01). Способ автоматического управления оборудованием пассажирского вагона на всех этапах его жизненного цикла : № 2013156949/11 : заявл. 23.12.13 : опубл. 10.02.16 / Сорокина М. В., Пащенко Т. А. : заявитель ООО «АВП Технология». – 7 с. : ил. - Текст : непосредственный.

83 Патент № 2644973 Российская Федерация, МПК G01R 19/00 (2006.01). Устройство контроля наличия высоковольтного напряжения вагона : № 2016102668 : заявл. 27.01.16 : опубл. 15.02.18 / Власов В. В., Пащенко Т. А. [и др.]. : заявитель ООО «АВП Технология». – 8 с. : ил. - Текст : непосредственный.

84 Патент № 2616759 Российская Федерация, МПК G01R 21/06 (2006.01) G01R 22/00 (2006.01). Устройство для контроля показателей бортовых устройств транспортного средства : № 2015112824 : заявл. 08.04.15 ; опубл. 27.10.16 / Тихонов Д. А., Сорокина М. В., Цапенко П. Е. : заявитель ООО «АВП Технология». – 6 с. : ил. - Текст : непосредственный.

85 Патент № 88613 Российская Федерация, МПК B60L 1/00 (2006.01). Комплекс электрооборудования "Э-12 АК" : № 2009126712/22 ; заявл. 14.07.09 : опубл. 20.11.09 / Назаров Е. И., Кудинов В. И., Акимов А. А. [и др.]. : заявитель ООО Научно-производственный центр «Экспресс». – 2 с. : ил. - Текст : непосредственный.

86 Комплект электрооборудования ЭВП-110 : Технические условия ТУ 3456-002-97839577-2011. – Москва : ООО «Промтехмонтаж», 2011. - 47 с. – Текст : непосредственный.

87 Ханис, В. А. Оценка возможностей современных технических средств оповещения о пожарах в помещениях пассажирских вагонов подвижного состава / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. А. Ханис, А. Л. Ханис // Транспортные системы: безопасность, новые технологии, экология: материалы II международной научно-практической конференции / Якутский институт водного транспорта (филиал) СГУВТ. - Якутск, 2020. - С. 177-181. - Текст : непосредственный.

88 Ханис, В. А. Возможности современных систем и средств контроля и обнаружения возгораний на объектах вагонного хозяйства / В. А. Ханис, С. Ю. Сазонов, С. В. Беспалько, Е. А. Титенко, С. Н. Фролов, Е. С. Сазонова // Интеллектуальные информационные системы: тенденции, проблемы, перспективы: материалы VII Всероссийской очной научно-практической конференции «ИИС-2019» / Юго-Западный государственный университет. - Курск, 2019. - С. 79-84. - Текст : непосредственный.

89 Ханис, В. А. Идентификация движущихся муниципальных транспортных средств на основе применения устройств радиочастотной идентификации отечественного производства / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. А. Ханис, А. Л. Ханис, Е. И. Щедрина // Инфокоммуникации и космические технологии: состояние, проблемы и пути решения: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции / Юго-Западный государственный университет. – Курск : 2020. - С. 354-357. - Текст : непосредственный.

90 Применение дуговых защит в комплексных распределительных устройствах сельскохозяйственных подстанций. Эксплуатация устройств сельскохозяйственного электроснабжения : сборник научных трудов / О. В. Никитаев, А. У. Селиванин. – Москва: 1989. - С.44. – Текст : непосредственный.

91 Современные средства релейной защиты и противоаварийной автоматики. Каталог спецэкспозиции. – Москва: Союзтехэнерго, 1989. – 15 с. – Текст : непосредственный.

92 Общие требования к пассажирским вагонам нового поколения. - Москва: МПС РФ, 1996. – 19 с. – Текст : непосредственный.

93 Коронный, искровой и высокочастотные разряды / websor.ru : [сайт]. – URL: https://websor.ru/osnovy/elektricheskie-processy-v-vakuume-i-gazah/koronnjei_iskrovoi_razryadje/ (дата обращения: 10.06.2020). - Текст : электронный.

94 Виды электрического разряда в газах / websor.ru : [сайт]. – URL: https://websor.ru/osnovy/elektricheskie-processy-v-vakuume-i-gazah/videj_elektricheskogo_razryada/ (дата обращения: 07.08.2020). - Текст : электронный.

95 Копейкина, Т. В. Применение оптических датчиков для систем дуговой защиты комплектных распределительных систем / Т. В. Копейкина // Оперативное управление в электроэнергетике. Подготовка персонала и поддержание его квалификации. - 2019. - № 5 (80). - С. 47-51. - Текст : непосредственный.

96 Датчик обнаружения электрической дуги на основе пластикового оптического волокна / infiber.ru : [сайт]. – URL:

http://infiber.ru/biblioteka/stati/ArcFlash_Detective.html (дата обращения: 07.09.2021). - Текст : электронный.

97 Волоконно-оптические датчики дуговой защиты на основе полимерных оптических волокон / pofcentre.ru : [сайт]. – URL: <http://www.pofcentre.ru/production/transducer> (дата обращения: 07.09.2021). - Текст : электронный.

98 Электрическая прочность воздушных промежутков / websor.ru : [сайт]. – URL: <https://websor.ru/osnovy/elektrotehnicheskie-materialy/elproch/> (дата обращения: 07.09.2021). - Текст : электронный.

99 **Важов, В. Ф.** Техника высоких напряжений : курс лекций / В. Ф. Важов, В. А. Лавринович ; "Электроэнергетика". – Томск : 2014. - 263 с. – Текст : непосредственный.

100 **Старикин, Ю. А.** Современная теория электрического пробоя твёрдых диэлектриков (обзор) / Ю. А. Старикин // Известия Томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С.М. Кирова. - 1956. – Т. 91. - С. 27-43. - Текст : непосредственный.

101 **Лавринович, М. В.** Условия погасания электрической дуги в воздухе / М. В. Лавринович // Известия Томского политехнического университета. - 2009. - № 4. - С. 51-55. - Текст : непосредственный.

102 **Темников, А. Г.** Исследование характеристик искрового разряда между искусственным облаком заряженного водного аэрозоля и землей / А. Г. Темников, А. В. Орлов, В. Н. Болотов, Ю. В. Ткач // Журнал технической физики. - 2005. – Т. 75, - №7. - С. 52-59. - Текст : непосредственный.

103 **Авилова, И. В.** Оптические свойства горячего воздуха: учебник / И. В. Авилова, Л. М. Биберман, В. С. Воробьев ; Наука. – Москва : 1970. - 320 с. – Текст : непосредственный.

104 **Ханис, В. А.** Модель обнаружения и оценки пожароопасности искровых разрядов в электрических сетях пассажирских вагонов на основе применения волоконно-оптических датчиков / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л.

Ханис, А. А. Ханис // Транспорт Урала. - 2021. - №3 (70). – С. 46 – 51. - Текст : непосредственный.

105 **Ширковец, А. И.** Математическая модель горения однофазной дуги в изоляции силовых кабелей с графической интерпретацией развития пробоя на основе нелинейного сопротивления дугового канала / А. И. Ширковец, Д. Ф. Губаев // Проблемы энергетики. - 2012. - №9-10. - Текст : непосредственный.

106 **Дубовенко, К. В.** Численное моделирование характеристик искрового разряда в жидком азоте / К. В. Дубовенко // Електротехніка і Електромеханіка. - 2014. - №3. - Текст : непосредственный.

107 **Васильев, А. Г.** Численная модель для расчёта температурного профиля нестационарного дугового разряда в воздухе при атмосферном давлении / А. Г. Васильев // Современные проблемы науки и образования. - 2015. - №2 (часть 1) . - Текст : непосредственный.

108 **Ханис, В. А.** Модели диагностики пожароопасных состояний сетей электроснабжения пассажирского вагона / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. А. Ханис, А. Л. Ханис // Поколение будущего: Взгляд молодых учёных: материалы 9-й Международной молодёжной научной конференции / Юго-Западный государственный университет. – Курск, 2020. - 398 с. - Текст : непосредственный.

109 **Серебровский, В. В.** Метод и алгоритм анализа и прогнозирования пожаробезопасности при применении модульной структуры автоматизированной защиты помещений центров обработки данных / В. В. Серебровский, Н. А. Ханис, Е. В. Журавлёва, А. Л. Ханис // Известия ЮЗГУ. - 2015. - №2(15) . - Текст : непосредственный.

110 **Вентцель, Е. С.** Теория вероятностей: учебник / Е. С. Вентцель : - Издательство «Наука». – Москва : 1969. - 576 с. – Текст : непосредственный.

111 **Сколник, М. И.** Справочник по радиолокации: в 2 книгах / М. И. Сколник ; под редакцией профессора, доктора технических наук В. С. Вербь. – Москва : ЗАО «РИЦ Техносфера», 2014. – ISBN 978-5-94836-381-3 (в пер.). - Текст : непосредственный.

К. 2 : Справочник по радиолокации. – 2014. – 680 с.

112 Патент № 2582053 Российская Федерация, МПК G11C 15/04 (2006.01) G06F 17/30 (2006.01) G06K 9/62 (2006.01). Способ и многофункциональное ассоциативное матричное устройство для обработки строковых данных и решения задач распознавания образов : № 2014126652/08 : заявл. 01.07.14 : опубл. 20.04.16 / Ханис В. А., Гришин Д. С., Титенко Е. А. [и др.]. : заявитель ЮЗГУ. – 2 с. : ил. - Текст : непосредственный.

113 Ханис, В. А. Модель обнаружения и оценки пожароопасности электропроводки пассажирского вагона по тепловому излучению / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, И. А. Ключиков, А. А. Ханис // Транспорт Урала. - 2022. - №1 (72). – С. 19 – 23. - Текст : непосредственный.

114 Ханис, В. А. Способ мониторинга пожароопасности электрооборудования подвижного состава / В. А. Ханис, А. А. Ханис, С. В. Беспалько, И. А. Ключиков // Молодежная наука : материалы XXVI Всероссийской научно-практической конференции. - Красноярск, 2022. С. 269–272. - Текст : непосредственный.

115 Приложение к приказу МЧС РФ. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : издание официальное : утверждён и введён в действие МЧС РФ 17 августа 2009 г. – Москва : МЧС РФ, 2009. – 64 с. - Текст : непосредственный.

116 Ханис, В. А. Методика оценки вероятности возникновения пожаров на основе мониторинга пожароопасных состояний электрооборудования пассажирских вагонов / В. А. Ханис, С. В. Беспалько, А. Л. Ханис, А. А. Ханис // Транспорт Урала. - 2020. - №1 (64). – С. 54 – 56. - Текст : непосредственный.

117 Программа для ЭВМ №2015612057. Специальное программное обеспечение многоагентной системы анализа и оценки рисков возникновения пожароопасных ситуаций в электросетях : № 2014663116 : заявл. 24.11.11; опубл. 10.04.13 / Ханис В. А., Фролов С. Н., Титенко Е. А. [и др.] ; заявитель ЮЗГУ. – 2 с. : - Текст : непосредственный.

118 Программа для ЭВМ №2017614845. Программа для прогнозирования опасных факторов пожара в информационной системе мониторинга

возникновения и развития пожароопасной ситуации в дата-центре на основе нейронных сетей : № 2017611840; заявл. 24.11.11; опубл. 10.04.13 / Ханис В. А., Сазонов С. Ю., Титенко Е. А. [и др.] ; заявитель ЮЗГУ. – 2 с. : - Текст : непосредственный.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПЕРЕЧЕНЬ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ И УСТРОЙСТВ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Таблица А.1 – Основные системы контроля и диагностики электрооборудования

№ п/п	Наименование	Состав	Изготовитель	Принцип работы
1	2	3	4	5
1	Устройство диагностики электрооборудования пассажирских вагонов	- силовое электрооборудование вагона - устройства управления электрооборудованием - переносной стенд диагностики цепей пассажирского вагона	ООО «Российские железные дороги»	Стенд диагностики цепей пассажирского вагона подключается с помощью соединительных жгутов в отдельности к разъемам силового электрооборудования вагона и его устройств управления непосредственно в самом вагоне, это обеспечивает оперативную диагностику в отдельности электрооборудования и его управления без извлечения проверяемых узлов из рабочих мест
2	Устройство контроля и диагностики электрооборудования вагонов – термостерн	- переносной компьютер с предустановленной операционной системой; - переносной мегаомметр-мультиметр - сервисное программное обеспечение - база данных обслуживания приписного вагонного парка	ООО «Газпром-транс»	Переносной мегаомметр-мультиметр имеет встроенную память результатов измерений и порто вывода результатов измерений на переносной компьютер, основная погрешность измерений в пределах 2 %, с диапазоном измеряемых сопротивлений изоляции минимум до 1 МОм
3	Комплекс электрооборудования «Э-12АК»	- пульт управления системой жизнеобеспечения вагона - ящик высоковольтный для электропитания мощных электропотребителей аппаратуры	ООО Научно-производственный центр «Экспресс»	Аппаратура САУД включает цифровое решающее устройство и устройство сопряжения для соединения пульта управления и его элементов аналоговыми и/или цифровыми линиями связи с датчиками параметров и исполнительными устройствами аппаратуры

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
		- ящик низковольтный для электропитания низковольтной аппаратуры - ящик вводно-выводной и/или комбинированный ящик		жизнеобеспечения и электрооборудования вагона. Цифровое решающее устройство САУД выполнено в виде панельного компьютера или в виде микроконтроллера с блоком памяти, соединенного с панелью управления и индикаторным устройством пульта управления.
4	Комплект электрооборудования «ЭВП-110»	- ящик вводного устройства - ящик низковольтный - ящик высоковольтный - пульт управления вагона - генератор переменного тока	ЗАО "ЭЛСИЭЛ"	Комплект обеспечивает коммутацию и защиту электрических цепей вагона, поддержание необходимых параметров работы вагонных источников и потребителей электроэнергии, а также автоматическое и ручное управление работой климатической установки.
5	Измерительный комплекс постоянного и переменного тока для пассажирского вагона на базе КВИНТ-РЕСУРС и КВИНТ-ОНЛАЙН	- счетчик постоянного и переменного тока СЭППТ - дисплей - измерительный шунт - блок мобильной связи - удаленный сервер обработки информации	ООО «АВП Технологии»	Измерение расхода электрической энергии в цепях постоянного тока с номинальным значением напряжения 3000 В и переменного тока частотой 50 Гц номинальным значением напряжения 3000 В. Мониторинг значений силы тока и напряжения для каждого рода тока в режиме реального времени и использование полученных данных в диагностических целях;
6	Система контроля безопасности и связи пассажирского вагона	- центральная управляющая система - один антенный модуль, установленный на крыше штабного вагона - две базовые станции	ЗАО «АЭРО-КОСМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ»	Антенный модуль подключен к центральной управляющей системе с обеспечением работоспособности базовых станций DECT и обеспечения их подогрева для работы при температурах до – 50 °С, в

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
		ДЕСТ; - две антенны, расположенные таким образом, чтобы радиосигнал охватывал все вагоны состава		каждом вагоне поезда установлено устройство передачи аварийных сигналов - ретранслятор для передачи аварийных сигналов от систем аварийной сигнализации железнодорожного вагона.
7	Комплекс универсаль- ный пожарно- охранный локомотив- ный (сигнали- зации и пожароту- шения) «КУПОЛ-С- ПТ»	- блок пожарной сигнализации БПС - извещатель пожарный тепловой - извещатель пожарный комбинированный ИПК-ТУ - извещатель пожарный пламени ИП329 "Спектрон - 402" - генератор огнетушащего аэрозоля АГС-11/3	ООО «АВП Технология»	Автоматическое обнаружение очага пожара в контролируемых помещениях локомотива при повышении температуры, наличии дыма и открытого пламени; тушение пожара в ручном и автоматическом режимах; автоматическое обнаружение проникновения в локомотив посторонних лиц.
8	Система сверх- раннего предупреж- дения пожароопас- ных ситуаций	- расширитель пожарно-охранный - радиомодем локальный - радиомодем магистральный - извещатель пожарный дымовой электроиндукционный - прибор приемно- контрольный охранно- пожарный	АО «НПП «Радар ммс, г. Санкт- Петербург»	Система обеспечивает сверххранний сбор информации об аэрозольной и газовой обстановке в охраняемых помещениях, обработку, визуализацию и передачу информации на пульт централизованного наблюдения и управление внешними исполнительными устройствами.
9	УЗМ-51МД	- реле контроля напряжения с мощным электромагнитным реле на выходе - устройство защиты от дугового разряда	ЗАО «МЕАНДР», г. Санкт- Петербург	Устройство для защиты от дугового пробоя и искрения в электропроводке
10	Автоматизи- рованная информа- ционная система пожарной	- силовое электрооборудование вагона; - рабочие места заместителей и руководителей пожарных подразделений,	ООО «Российские железные дороги»	Все пользователи обеспечены доступом в Интернет и в данных ОАО «РЖД». Вся внесённая в АИС ПБ информация на местах в регионах доступна и контролируется

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
	безопасности (АИС ПБ)	оснащённые ПЭВМ - мобильные комплекты для работы непосредственно на объектах, оснащённые нетбуками		должностными лицами, находящимися в Москве.
11	УПС-Т	- пожарный извещатель дымового или комбинированного типа - пожарный максимально-дифференциальный извещатель теплового типа - блок пожарного приемно-контрольного типа	НПФ «Спец-системы»	Установка противопожарной сигнализации УПС-Т используется в составе систем пожарной безопасности пассажирских вагонов для оповещения о начале пожара и месте возникновения.
12	УПС-ТПС	- пожарный извещатель ИПК-ТУ и ИП 114-1А3(С)/ДТК - блок искрозащиты БС - извещатель ИП 102 - 2Х2 - взрывозащищенный извещатель типа ДТК "В"	НПФ «Спец-системы»	Обнаружение пожаров в помещениях железнодорожного тягового подвижного состава - электровозов и тепловозов;
13	АСОТП «Игла-ТПС» РА2	- извещатель ИП-212/101-78-А1 комбинированный – 5 шт. - извещатель ИП-212/101-78-А1 основная база – 5 шт. - датчик температуры ПТКЛ.421916.017 23 - 10 шт. - извещатель (ИП-212-3СУ) дымовой – 8 шт. - МПП "Буран-2.0R(22-24)" – 9 шт.	ООО "ПромЭПОТ ОС"	АСОТП формирует извещение о пожаре при превышении порогового значения температуры, контролируемой пожарными извещателями Система обеспечивает тушение пожара в автоматическом или ручном режимах. Величина времени срабатывания находится в диапазоне 60 ÷ 242 с.
14	УПС «Тесла-М»	- прибор УПС «Тесла-М», - извещатели типа ИПК-ТУ и ИПК-ТУ(Т)	НПФ «Спец-системы»	Установка пожарной сигнализации для пассажирских вагонов УПС «Тесла-М» предназначена для

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ А

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4	5
		в двух вариантах исполнения: пластмассовый прямоугольный корпус и корпус радиоизотопного извещателя МНГ-108.		обнаружения пожаров в пассажирских железнодорожных вагонах. Приборы восстанавливаются из неисправных и отслуживших свой срок приборов УПС «Тесла» (Чехия) путем ремонта или полной замены электронных плат.
15	УПСПТ ООО «КОНТИ-НЕНТ»	- ППКП - ИП ППКП осуществляет контроль параметров среды в местах размещения ИП и предоставляет простой и удобный интерфейс для контроля состояния и настройки работы УПСПТ	ООО «КОНТИ-НЕНТ»	В настоящее время различные модификации УПСПТ обеспечивают пожарную безопасность на более чем 10000 пассажирских вагонах. Универсальность конструкции позволяет гибко реагировать на требования заказчика и быстро интегрировать УПСПТ в любой вид подвижного состава ЖД транспорта. Обнаружение признаков пожара в контролируемых помещениях. Обеспечивает своевременное извещение обслуживающего персонала о возгорании на ранней стадии развития пожара.
16	УПС «Дельта»	- приемно-контрольный прибор - пожарные и охранные извещатели до 16 шт.	«Спец-информатика-СИ»	Установка пожарной и охранной сигнализации предназначена для раннего обнаружения загораний в пассажирских или других типах вагонов железнодорожного транспорта как на маршруте следования поезда, так и в период формирования состава или отстоя вагонов в депо, с выдачей тревожных световых и звуковых сигналов и формированием команд адресного включения систем пожаротушения, а также для обеспечения охранной и вызывной тревожной сигнализации.

ПРОГРАММА ДЛЯ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ИСКРОВЫХ РАЗРЯДОВ В ЭЛЕМЕНТЕ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Программа расчёта Б.1 - Программа расчёта текущей частоты возгораний и суммарной вероятности возгорания на интервале времени

```
% Загрузить исх данные из папки Data:
% tFL_h.mat, t1FL_h.mat,
% TtFL_Cels.mat, PtFL.mat, muVtFL.mat, muG1tFL.mat, muG2tFL.mat,
% mCtFL.mat

load('Data/tFL_h.mat')
load('Data/t1FL_h.mat')
load('Data/TtFL_Cels.mat')
load('Data/PtFL.mat')
load('Data/muVtFL.mat')
load('Data/muG1tFL.mat')
load('Data/muG2tFL.mat')
load('Data/mCtFL.mat')

%
*****
*
% Профиль температуры tFL_h.mat, TtFL.mat
tFL_s=tFL_h*3600;
% TtFL - загружен в мм рт.ст.

fnTt=@(t_s) spline(tFL_s,TtFL_Cels,t_s);

t_h=linspace(0,max(tFL_s)/3600,120);

figure;
plot(t_h,fnTt(t_h*3600));
ylim([0 35]);
title('Изменение температуры во времени');
xlabel('час');
ylabel('град Цельсий');
grid;

%
*****
*
% Профиль атмосферного давления tFL_h.mat, PtFL.mat
tFL_s=tFL_h*3600;
% PtFL - загружен в мм рт.ст.
```


ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

fnPt=@(t_s) spline(tFL_s,PtFL,t_s);

t_h=linspace(0,max(tFL_s)/3600,120);

figure;
plot(t_h,fnPt(t_h*3600));
ylim([730 770]);
title('Изменение атмосферного давления во времени');
xlabel('час');
ylabel('мм рт.ст. ');
grid;

%
*****
*
% Профиль относительной влажности tFL_h.mat, muVtFL.mat
tFL_s=tFL_h*3600;
% muVtFL - загружен в процентах

fn_muVt=@(t_s) spline(tFL_s,muVtFL,t_s);

t_h=linspace(0,max(tFL_s)/3600,120);

figure;
plot(t_h,fn_muVt(t_h*3600));
ylim([50 100]);
title('Изменение относительной влажности во времени');
xlabel('час');
ylabel('%');
grid;

%
*****
*
% Профиль концентрации 1-й горючей компоненты tFL_h.mat, muG1tFL.mat
tFL_s=tFL_h*3600;
% muG1tFL - загружен в процентах

fn_muG1t=@(t_s) spline(tFL_s,muG1tFL,t_s);

t_h=linspace(0,max(tFL_s)/3600,120);

figure;
plot(t_h,fn_muG1t(t_h*3600));
ylim([0 50]);
title('Изменение концентрации 1-й горючей компоненты во времени');
xlabel('час');
ylabel('мг/л');
grid;

```

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

%
*****
*
% Профиль концентрации 2-й горючей компоненты tFL_h.mat, muG2tFL.mat
tFL_s=tFL_h*3600;
% muG2tFL - загружен в мг/л

fn_muG2t=@(t_s) spline(tFL_s,muG2tFL,t_s);

t_h=linspace(0,max(tFL_s)/3600,120);

figure;
plot(t_h,fn_muG2t(t_h*3600));
ylim([0 100]);
title('Изменение концентрации 2-й горючей компоненты во времени');
xlabel('час');
ylabel('мг/л');
grid;

%
*****
*
% Профиль средней частоты разрядов (среднее число разрядов в
ед.времени)
t1FL_s=t1FL_h*3600;
% mCtFL - загружен

fn_mCt=@(t_s) spline(t1FL_s,mCtFL,t_s);

t_h=linspace(0,max(t1FL_s)/3600,120*5);

figure;
plot(t_h,fn_mCt(t_h*3600));
ylim([0 50]);
title('Изменение средней частоты разрядов во времени');
xlabel('час');
ylabel('разрядов/с');
grid;

%
*****
***
% Распределение вероятности энергии разрядов
% mEt - средняя энергия разрядов от времени
% sdgmEt - СКО энергии разрядов от времени

mEtMax=50; % мкДж
sgmEtMax=0.2*mEtMax;
mCtMax=100;

```

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

qE=0.2;

fn_mEt=@(t_s) mEtMax*sqrt(sqrt((abs(fn_mCt(t_s)/mCtMax))));
fn_sgmEt=@(t_s) qE*mEtMax*(sqrt((abs(fn_mCt(t_s)/mCtMax))));

figure;
plot(t_h,fn_mEt(t_h*3600));
ylim([0 50]);
title('Изменение средней энергии разрядов во времени');
xlabel('час');
ylabel('мкДж');
grid;

figure;
plot(t_h,fn_sgmEt(t_h*3600));
ylim([0 10]);
title('Изменение СКО энергии разрядов во времени');
xlabel('час');
ylabel('мкДж');
grid;

%
*****
***
% Стандартные условия:
% T0=298 - стандартная температура, град
% P0=760 - стандартное атмосферное давление, мм рт.ст.
% muV0=75 - стандартная относительная влажность, %
% muG0i=0 - стандартная концентрация горючего вещества номер i, мг/л

T0=298; % град
P0=760; % мм рт. ст.
muV0=75; % процентов
muG0=[0 0]; % две горючих компоненты, мг/л

% Вероятность возгорания от одиночного разряда с энергией e
% в стандартных условиях
% p1st = fn_p1st(e,eMin,ap1,np1)
eMin=1; % мкДж
%ap1=0.25E-17;
ap1=0.25E-13;
np1=2;
% function p1 = fn_p1st(e,eMin,ap1,np1)
% вероятность возгорания от разряда с энергией e

```

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

%
*****
***
% Вероятность возгорания от одиночного разряда с энергией e
% в текущих условиях T,P,muV,muG1,muG2

% function DT = fnDT(T,Bet_T)
% поправка на температуру
% T0=298; % град
Bet_T=0.0025;
T=310; % задавать в пределах 243 - 333 град (-30...+60 град
Цельсия)

% function DP = fnDP(P,P0,Bet_P)
% поправка на давление
% P0=760; % мм рт.ст.
Bet_P=-0.0015;
P=740; % задавать в пределах примерно 720 - 790 мм рт. ст.

% function DmuV = fnDmuV(muV,muV0,Bet_muV)
% поправка на влажность
% muV0=75; % процентов
Bet_muV=0.0025;
muV=85; % задавать в пределах 0 - 100 процентов

% function DmuG = fnDmuG(muG,muGmin,alfG,aG )
% поправка на концентрацию 1-й горючей компоненты
muGmin1=10; % мг/л
alfG1=0.05;
%aG1=3;
aG1=0;
%aG1=100;
muG1=20; % задавать в пределах 0 - 100 мг/л
% function DmuG = fnDmuG(muG,muGmin,alfG,aG )
% поправка на концентрацию 2-й горючей компоненты
muGmin2=5; % мг/л
alfG2=0.075;
%aG2=4;
aG2=0;
%aG2=3000;
muG2=10; % задавать в пределах 0 - 100 мг/л

% function p1 = fnFind_p1(e,eMin,ap1,np1,T,T0,Bet_T,P,P0,Bet_P,...
% muV,muV0,Bet_muV,...
% muG1,muGmin1,alfG1,aG1,muG2,muGmin2,alfG2,aG2)

```

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

% Пробное вычисление для заданных условий T,P,muV,muG1,muG2
% и энергии разряда e
e=50; % мкДж
p1=fnFind_p1(e,eMin,ap1,np1,T,T0,Bet_T,P,P0,Bet_P,...
             muV,muV0,Bet_muV,...
             muG1,muGmin1,alfG1,aG1,muG2,muGmin2,alfG2,aG2);

%
*****
***
% Теперь надо для каждого момента времени t на интервале времени Dt
% найти по профилям текущие параметры среды T,P,muV,muG1,muG2,
% частоту разрядов mC, среднюю энергию и СКО энергии разряда mE,
sgmE;
% затем имитировать реализацию выборки энергий разрядов на
рассматриваемом
% интервале времени ек, по ни подсчитать вероятность возгорания по
каждому
% из разрядов и суммарную вероятность возгорания на данном интервале
% времени

Nt=500;
t_s=linspace(0,max(tFL_s),Nt); % переопределяем сетку по времени
Dt_s=2; % с

nuCtk=zeros(1,Nt);

for k=1:Nt

mnC_tk=abs(fn_mCt(t_s(k)))*Dt_s; % среднее к-во разрядов на
интервале t...t+Dt

nCtk=poissrnd(mnC_tk); % фактическое к-во разрядов на интервале
t...t+Dt

mEtk=abs(fn_mEtk(t_s(k)));
sgmEtk=abs(fn_sgmEtk(t_s(k)));

% Имитируем выборку энергий разрядов на интервале t...t+Dt:
Ar_Etk=normrnd(mEtk,sgmEtk,[1,nCtk]);

% Находим вероятности возгораний по каждому из разрядов текущей
выборки:

Ttk=fnTt(t_s(k));
Ptk=fnPt(t_s(k));
muVtk=fn_muVt(t_s(k));
muGltk=fn_muGlt(t_s(k));

```

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

muG2tk=fn_muG2t(t_s(k));

Ar_pltk=zeros(1,nCtk);
for i=1:nCtk

Ar_pltk(i)=fnFind_p1(Ar_Etk(i),eMin,ap1,np1,Ttk,T0,Bet_T,Ptk,P0,Bet_
P,...
                    muVtk,muV0,Bet_muV,...
                    muG1tk,muGmin1,alfG1,aG1,muG2tk,muGmin2,alfG2,aG2);
end;

Ptk=fn_PAr_p1(Ar_pltk); % текущее значение вероятности возгорания
                        % на интервале t...t+Dt

nuCtk(k)=Ptk/Dt_s;      % текущее значение частоты возгораний

end; % for k=1:Nt

figure;
plot(t_s/3600,nuCtk);
title('Частота возгораний');
xlabel('час');
ylabel('событий/с');
grid;

% Итоговая вероятность возгорания:
PC=1-exp(-Dt_s*sum(nuCtk));

```

Подпрограммные модули Б.2 - Подпрограммные модули в которых реализованы функции, необходимые для работы основной программы scModel_02A.

Подпрограмма расчёта вероятности возгорания от одиночного разряда с заданной энергией в стандартных условиях:

```

function p1 = fn_plst(e,eMin,ap1,np1)

N=length(e);
p1=zeros(1,N);
de=e-eMin;

for k=1:N
    de(k)=e(k)-eMin;
    if de(k)<0
        p1(k)=0;
    end
end

```

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

else
    p1(k)=ap1*de(k)^np1;
end;
end;

end

```

Подпрограмма расчёта поправки частоты возгораний на температуру:

```

function DT = fnDT( T,T0,Bet_T )
    DT=(T-T0)*Bet_T;
end

```

Подпрограмма расчёта поправки частоты возгораний на давление:

```

function DP = fnDP( P,P0,Bet_P )
    DP=(P-P0)*Bet_P;
end

```

Подпрограмма расчёта поправки частоты возгораний на влажность:

```

function DmuV = fnDmuV(muV,muV0,Bet_muV )
    DmuV=(muV-muV0)*Bet_muV;
end

```

Подпрограмма расчёта поправки частоты возгораний на концентрацию горючих компонент:

```

function DmuG = fnDmuG(muG,muGmin,alfG,aG )

N=length(muG);
DmuG=zeros(1,N);

for k=1:N
    if muG(k)<muGmin
        DmuG(k)=0;
    else
        DmuG(k)=aG*(1-exp(-alfG*(muG(k)-muGmin)));
    end;
end;

end

```

Подпрограмма расчёта вероятности возгорания от одиночного разряда с заданной энергией в текущих условиях:

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

```

function p1 = fnFind_p1(e,eMin,ap1,np1,T,T0,Bet_T,P,P0,Bet_P,...
    muV,muV0,Bet_muV,...
    muG1,muGmin1,alfG1,aG1,muG2,muGmin2,alfG2,aG2)

p10=fn_p1st(e,eMin,ap1,np1);

DT=fnDT(T,T0,Bet_T);
DP=fnDP(P,P0,Bet_P);
DmuV=fnDmuV(muV,muV0,Bet_muV);
DmuG1=fnDmuG(muG1,muGmin1,alfG1,aG1);
DmuG2=fnDmuG(muG2,muGmin2,alfG2,aG2);

p1=p10*(1+DT+DP+DmuV+DmuG1+DmuG2);

end

```

Подпрограмма расчёта вероятности возгорания от последовательности разрядов по совокупности вероятностей одиночных возгораний:

```

function P= fn_PAr_p1(Ar_p1)
    P=1-prod(1-Ar_p1);
end

```

Подпрограмма расчёта генерирования случайного количества разрядов на заданном интервале времени:

```

function nC = fn_nC(mC,Dt)
% к-во разрядов на интервале времени Dt
% mC - среднее кол-во разрядов в единицу времени
% mC*Dt - среднее к-во разрядов на интервале Dt
% nC - пуассоновская случайная величина со средним к-вом событий
mC*Dt

nC=poissrnd(mC*Dt);

end

```