

На правах рукописи



Проневич Ольга Борисовна

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПОЖАРНЫМИ РИСКАМИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ
ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (транспорт)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет транспорта» РУТ (МИИТ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шубинский Игорь Борисович

Официальные оппоненты: **Долгий Игорь Давидович**
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщений», заведующий кафедрой «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте»;

Крупин Михаил Владимирович
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», заместитель начальника кафедры «Специальной электротехники автоматизированных систем и связи»

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

Защита состоится 13 октября 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 40.2.002.02 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, Москва ул. Образцова, 9, стр. 9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miit.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сидоренко Валентина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На безопасность перевозочного процесса на железнодорожном транспорте (ЖДТ) оказывают влияние ряд дестабилизирующих факторов. Среди них значительное влияние, наряду с отказами технических средств и технологическими нарушениями, оказывают события возникновения пожароопасных состояний инфраструктуры и подвижного состава. В 2014 году пожар был отнесен к событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации ЖДТ (Положение о классификации, порядке расследования и учета транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, утв. Приказом Минтранса России от 18.12.2014 N 344). К 2019 году, с развитием практики оценки рисков в ОАО «РЖД», пожар вошел в реестр рисков нарушения безопасности движения как один из внутренних/основных видов риска. В настоящее время в ОАО «РЖД» следует единовременно парировать риски возникновения пожароопасных состояний более 14 000 локомотивов, а также сотен стационарных объектов. Временные затраты на устранение неисправностей – причин возгораний, тем более, на ликвидацию последствий пожаров, приводят к длительным задержкам в движении поездов и, как следствие, – к существенным финансовым потерям компании. Разовый ущерб от пожара на подвижном составе достигает 30 млн. рублей.

Для поддержания бесперебойного перевозочного процесса на ЖДТ необходима система предотвращения появления дестабилизирующих безопасность состояний объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, которые приводят к возникновению пожаров. Ее основой должна стать автоматизированная система управления пожарными рисками, позволяющая на основании результатов оперативного прогноза риска, принимать решение о необходимости ремонта, технического обслуживания или замены потенциального источника огня (ПИО) с целью минимальной задержки перевозочного процесса. Под пожарным риском в рамках исследования понимается риск возникновения пожароопасной ситуации.

Степень разработанности темы исследования. Большая часть исследований пожарных рисков проводилась институтами Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. Основными задачами этих исследований были расчет вероятности успешной эвакуации

людей и оценка социальных рисков. Существенный вклад в эти исследования внесли Клепенко Е.А., Костерин И.В., Швырков С.А., Шевчук А.П. Построением автоматизированных систем управления сигнализацией и тушением пожара занимались Кучера Л.Я., Цветков Р.Е., Шарафутдинов А.А. и др.

На ЖДТ не менее актуальна задача автоматизированного управления пожарными рисками на объектах, для которых нехарактерно массовое пребывание людей, но при этом важно минимизировать вероятности возгорания объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, обеспечивающих непрерывность перевозочного процесса. Однако в отечественных исследованиях, известных автору, не получили широкого распространения методы оценки пожарных рисков на основе анализа фактического состояния ПИО.

В европейских странах популярны методы индексной оценки пожарного риска, в основе которых лежит метод Гретенера. Общей чертой большинства методов индексной оценки рисков является превалирование в моделях факторов, зависящих от вида деятельности, реализуемой в помещении (на объекте), а не от состояния технических средств, являющихся ПИО.

Интеллектуализация процессов управления пожарными рисками за счет математического моделирования процессов, приводящих к изменению вероятности появления пожара позволит снизить количество случаев пожара. Автоматизация системы управления пожарными рисками обеспечит возможность единовременной оценки множества объектов и формирования перечня и плана корректирующих мероприятий по снижению пожарных рисков.

Объект исследования – объекты инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, реализуемые на них производственные процессы, а также автоматизированные системы управления пожарными рисками.

Предмет исследования – автоматизированная система управления пожарными рисками на объектах ЖДТ, методы и модели оценки пожарных рисков объектов, способы и инструменты автоматизированной диагностики и прогнозирования пожарных рисков при обеспечении безопасности перевозочного процесса.

Цель и задачи. Целью диссертации является снижение количества опасных состояний, приводящих к пожарам и повышение безопасности движения за счет автоматизации процессов управления пожарными рисками объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ.

В соответствии с этой целью были поставлены следующие теоретические и практические задачи:

— Анализ состояния проблемы оценки и управления пожарными рисками на объектах ЖДТ, видов автоматизированных систем управления пожарными рисками.

— Математическое моделирование пожарного риска объекта ЖДТ на стадии его эксплуатации.

— Разработка алгоритмов автоматизированного диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, которые приводят к пожарным рискам этих объектов.

— Интеллектуализация процессов управления пожарными рисками объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на основе их фактических состояний.

— Разработка мобильного программно-аппаратного комплекса для автоматизированного управления пожарными рисками объектов ЖДТ.

— Апробация автоматизированной системы управления пожарными рисками на стационарных и передвижных объектах инфраструктуры и подвижного состава ОАО «РЖД».

Научная новизна результатов, полученных в результате выполнения диссертационного исследования, заключается в следующем:

1. Выявлены основные неисправности, дестабилизирующие пожарную безопасность инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на этапе их эксплуатации, сформулированы принципы оценки пожарных рисков, позволяющие ранжировать объекты одного функционального назначения и одинаковых конструкций.

2. Разработаны алгоритмы диагностирования неисправностей объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, позволяющие для каждого объекта выявлять пожарные риски.

3. Предложен и обоснован метод описания изменения состояний объектов ЖДТ с помощью ориентированного графа для определения путей перехода и вероятностей возникновения пожарных рисков.

4. Предложен комплекс методик интеллектуализации процессов управления пожарными рисками объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, позволяющих оценивать реальные уровни пожарных рисков, принимать решения о допуске объектов к эксплуатации, а также формировать корректирующие мероприятия для снижения пожарных рисков.

5. Предложены принципы построения и алгоритмы функционирования мобильного программно-аппаратного комплекса для диагностирования и

прогнозирования пожарных рисков на объектах ЖДТ, отличающегося возможностью оперативной оценки рисков этих объектов с учётом условий эксплуатации.

Теоретическая и практическая значимость работы:

— Разработан метод описания процессов возникновения и развития пожароопасных ситуаций на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ до появления открытого горения. В основе метода лежат статистические и экспертные оценки вероятностей изменения фактического состояния объекта ЖДТ на стадии эксплуатации.

— Разработаны способы и алгоритмы автоматизированного аудита пожарной опасности ПИО на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, впервые позволяющие собирать исходные данные для оценки пожарных рисков без привлечения сотрудников надзорных органов.

— Разработан графовый метод прогнозирования вероятности возникновения пожароопасного состояния для оценки пожарных рисков на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ.

— Разработана совокупность моделей управления и методик оценки пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ.

— Разработаны классификаторы и контрольно-оценочные карты неисправностей объектов ЖДТ, влияющих на пожарные риски объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, позволяющие проводить аудит их пожарных рисков без привлечения надзорных органов.

— Разработан мобильный программно-аппаратный комплекс, позволяющий оперативно проводить аудит и оценку пожарных рисков объектов ЖДТ.

— На железнодорожных вокзалах, постах электрической централизации, в информационно-вычислительных центрах ОАО «РЖД», на тепловозах и электровозах ОАО «РЖД», тяговых подстанциях ОАО «РЖД» проведены расчёты пожарных рисков для 425 стационарных объектов и 806 передвижных объектов ЖДТ. Результаты расчётов пожарных рисков использованы при построении планов технического обслуживания объектов ЖДТ и легли в основу принятия решения о допусках объектов ЖДТ к эксплуатации.

Методология и методы исследования. В работе использованы методы и модели анализа и оценки надежности и функциональной безопасности систем, методы теории вероятности, методы теории графов, методы теории нечетких

множеств, методы оценивания рисков, методы теории экспертных оценок, методы теории игр.

Положения, выносимые на защиту:

1. Классификация неисправностей объектов ЖДТ, дестабилизирующих пожарную безопасность инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ и контрольно-оценочные карты как инструмент, обеспечивающие интеллектуализацию процесса выявления пожароопасных состояний, а также выбора контролируемых характеристик пожароопасных узлов объектов ЖДТ.

2. Метод математического моделирования пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на стадии эксплуатации, отличающийся от известных возможностью априорной оценки вероятностей возникновения пожароопасных состояний.

3. Способ и алгоритмы интеллектуализации выявления неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к пожарным рискам, отличающиеся от известных способов аудита возможностью автоматизированного выявления пожароопасных состояний без привлечения надзорных органов и впервые позволяющие прогнозировать пожарные риски на основе обработки статистических и экспертных данных о техническом состоянии оцениваемых объектов.

4. Комплекс методик управления пожарными рисками для стационарных и передвижных объектов ЖДТ на стадии их эксплуатации, отличающихся тем, что они позволяют количественно оценивать величину риска появления пожара на основании математического моделирования изменения состояния объекта.

5. Мобильный программно-аппаратный комплекс, впервые позволяющий диагностировать и прогнозировать пожарные риски на объектах ЖДТ в зависимости от их технического состояния и функционального назначения.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность научных положений и результатов диссертационной работы подтверждается экспериментальными исследованиями и практической апробацией разработанных методов и МПК. После внедрения результатов исследования наблюдается снижение количества пожаров. Статистическая значимость различий между количеством пожаров до внедрения результатов диссертационного исследования и после подтверждена с помощью критерия Фридмана.

Положения и результаты диссертационной работы докладывались на V-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016» (г. Москва 12-13 апреля 2016 года), на научно-техническом семинаре АН РФ «Надежность и

качество информационных систем» (г. Москва, МИИТ 25 октября 2017 года), на научно-практическом семинаре «Совершенствование и применение методик определения пожарного риска» (г. Балашиха 21 апреля 2016 года); на VI-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017» (г. Москва 11-12 апреля 2017 г.).

Результаты диссертации внедрены:

1. При разработке Методики расчета пожарного риска на постах электрической централизации, диспетчерской централизации, горочной автоматической централизации (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 4 августа 2017 г. №1558р).

2. При разработке Методики оценки пожарных рисков в информационно-вычислительных центрах ОАО «РЖД» и классификатора нарушения требований пожарной безопасности (утв. Распоряжением ОАО «РЖД» 20 декабря 2017 г. №2665р).

3. При разработке СТО РЖД 15.016-2017 «Тяговый подвижной состав. Правила оценки и управления пожарными рисками» (утв. Распоряжение ОАО «РЖД» от 29 декабря 2017 г. №2084р).

4. При разработке Методики проведения анализа противопожарного состояния тяговых подстанций в Трансэнерго – филиале ОАО «РЖД» (утв. Распоряжением Директора Трансэнерго – филиала ОАО «РЖД» 12 января 2018 г. № ТЭ-2/р).

Акты внедрения приведены в приложении диссертационной работы.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 132 источников, 6 приложений, 259 страниц основного текста, 62 таблиц, 64 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы для управления пожарными рисками при обеспечении безопасности движения поездов. Сформулированы цели и основные задачи, объект и предмет исследования.

В первой главе дана характеристика объекта исследования и проведен анализ методов оценки пожарных рисков, видов автоматизированных систем управления пожарными рисками.

Выделены три основных направления автоматизации процессов управления пожарными рисками: автоматизация процессов тушения пожара и управления эвакуацией (АСУ ТПиЭ); автоматизация процессов обнаружения пожаров и

состояний, им предшествующих; автоматизация учёта и управления информацией о пожарах. В основе АСУ ТПиЭ лежат две группы моделей: математические модели развития пожара и математические модели поведения людей при пожаре. Первая группа моделей описывает физические процессы горения. Вторая – движение людских потоков при эвакуации. Именно АСУ ТПиЭ призваны минимизировать индивидуальный пожарный риск, нормируемый Федеральным законом №123-ФЗ от 22.07.2008 г. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности. Для оценки индивидуального пожарного риска разработаны различные программные продукты, автоматизирующие исполнение положений методики, утвержденной приказом Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий от 30 июня 2009 года N 382.

Несмотря на очевидную эффективность таких систем на объектах с массовым пребыванием людей, функциональность АСУ ТПиЭ одновременно избыточна и недостаточна для значительной части стационарных и передвижных объектов ЖДТ. Только 6% пожаров в ОАО «РЖД» происходило на объектах с массовым пребыванием людей (вокзалы, торговые залы, платформы и т.п.). 94% пожаров связаны с повреждением оборудования на малолюдных объектах железнодорожной инфраструктуры (постах электрической централизации, тяговых подстанциях и т.п) и тяговом подвижном составе. Основные последствия пожаров на таких объектах связана с задержками поездов и материальным ущербом. Управление пожарными рисками объектов ЖДТ должно основываться на прогнозировании появления дестабилизирующих факторов, выявленных в ходе аудита пожарного риска.

Отечественные исследования в области прогнозирования вероятности появления пожара находятся на стадии развития. Новые математические модели оценки факторов, приводящих к появлению пожаров, основываются на теории активных систем, нечётких множеств, конечных цепей Маркова. Большая часть этих исследований традиционно касается объектов, связанных с нефтегазовой промышленностью, которые слабо адаптируются к объектам ЖДТ. По другому пути развивались модели оценки пожарных рисков в странах Европы и Америки. Большинство из них основывается на определении безразмерных показателей пожарной опасности, индексов пожарного риска. Наиболее известные из них: индекс Гретенера, индекс FRAME, индекс пожара и взрыва Дау Кемикал, индекс FSES. Практическое применение указанных индексов для расчета пожарного риска на Российских железных дорогах затруднено из-за различий в

европейской и отечественной классификации функций помещений и других объектов транспортной инфраструктуры, специфики возникновения и развития пожаров на ЖДТ.

Недостатки существующих методических и программных решений заключаются в следующем:

1. Не разработаны методики и алгоритмы расчета априорной вероятности возникновения пожароопасной ситуации из-за неисправностей технических средств и оборудования на объектах.

2. Отсутствуют программные решения, позволяющие вводить информацию о техническом состоянии оборудования на объекте, отслеживать изменения фактического состояния и планировать проведение корректирующих мероприятий.

3. Не разработаны методики интеллектуализации процессов управления пожарными рисками на объектах железнодорожного транспорта.

Анализ показал, что для снижения количества пожаров на ЖДТ необходима разработка автоматизированной системы управления, позволяющей управлять пожарными рисками на основе диагностируемых пожароопасных неисправностей объектов ЖДТ. Такая система должна основываться как минимум на двух инструментах: автоматизированном аудите состояния объектов ЖДТ и на нормативно-методической базе прогнозирования пожарных рисков на основе выявленных состояний.

Вторая глава посвящена разработке алгоритмов и математических моделей оценки состояния объектов ЖДТ для автоматизации и интеллектуализации оценки и управления пожарными рисками. Информация о случаях пожара на ЖДТ хранится в различных источниках, значительный объем данных – в текстовом виде. Для системного анализа пожарной безопасности разработан алгоритм обработки числовых и нечисловых данных о случаях пожаров на объектах ЖДТ, получаемых из различных источников.

Разработана математическая модель оценки априорного пожарного риска, включающая в себя метод определения вероятности перехода в опасное состояние на стационарных и передвижных объектах ЖДТ. Предложен способ описания процессов возникновения и развития пожароопасных ситуаций на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ (объектов ЖДТ) до появления открытого горения. Теоретической базой моделирования являются графовые методы и теория множеств: для исследуемых объектов определяют перечень их возможных состояний. Множество состояний S_H – это состояния системы, при которых отсутствует опасность для имущества, жизни, здоровья

работников, третьих лиц и соблюдены требования технической, технологической документации, условий эксплуатации. Множество состояний $S_{\text{риск}}$ – множество состояний, дестабилизирующих пожарную безопасность объекта. Это состояния, не соответствующие требованиям пожарной безопасности, из которых возможен переход в опасное состояние. Множество опасных состояний $\bar{S}_{\text{ПБ}}$ – пожароопасные состояния, при которых реализуются случаи пожара в течение периода наблюдения.

Процесс перехода из неопасных состояний в опасные под воздействием дестабилизирующих факторов представляется с помощью ориентированного графа состояний $G = (S, H)$, где S – конечное множество состояний системы; H – конечное множество дуг – пар (состояниями s_i, s_j) элементов из S . Развитие событий, приводящих к пожару, можно описать следующим образом: если система находится в состоянии s_i , то с вероятностью P_{ij} она сможет перейти в состояние s_j . Критерием опасного события является переход системы во множество пожароопасных состояний $\bar{S}_{\text{ПБ}}$. Предложенный способ формализованного описания состояний объектов позволяет поставить и решить ряд задач численной оценки показателей пожарной опасности объектов ЖДТ.

Для обеспечения возможности эффективного управления сформулированы принципы оценки пожарных рисков на объектах инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, а также предложен алгоритм, позволяющий реализовывать эти принципы на стадии эксплуатации объектов ЖДТ.

Определены два блока методических инструментов интеллектуализации оценки рисков. Первый блок оперирует статистикой пожаров. Его цель – дать оценку апостериорных вероятностей возникновения пожара на объектах ЖДТ. Установлено, что количество пожаров является случайной величиной, что позволило рассчитать интервальные оценки вероятности пожаров на объектах ЖДТ.

Особенностью оценки вероятности появления пожаров на объектах ЖДТ (на основе статистики пожаров) является то, что объекты каждого типа распределены на группы по региональному признаку. Условия эксплуатации объектов в группах отличаются по таким параметрам, как максимальная и минимальная температура окружающей среды, качество ремонта, интенсивность движения поездов и т.п. Все эти факторы могут оказывать влияние на наборы элементарных исходов, благоприятствующих событию «пожар». Возникают вопросы о принадлежности выборок (групп) одной генеральной совокупности и необходимости оценки вероятности появления пожара на объектах ЖДТ с учётом принадлежности оцениваемого объекта той или иной группе. Для ответа

на эти вопросы проведены проверки гипотез о равенстве выборочных характеристик с помощью критерия Пирсона, критерия Колмогорова-Смирнова. Установлено, что большинство групп объектов принадлежат одной генеральной совокупности.

При этом установлено, что локомотивы, обладающие схожими конструктивными характеристиками, но отличающиеся производительностью, принадлежат разным генеральным совокупностям (например, 2ТЭ10 и 3ТЭ10). На основании рассчитанных значений вероятностей пожара и известных уровней последствий пожаров строят матрицу рисков объектов ЖДТ; выделяют группы объектов, образующих нежелательный или недопустимый уровни риска.

Второй блок обработки данных о состояниях пожарной безопасности в качестве исходной информации использует результаты автоматизированного диагностирования неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к пожарным рискам. Для таких объектов описывают последовательности событий, приводящих к появлению пожара. Принятие решения о приоритетности проведения мероприятий по снижению пожарных рисков объектов ЖДТ должно осуществляться на основе оценки опасности совокупности выявленных состояний. Предложенными показателями пожарной опасности являются: вероятность появления пожароопасного состояния, время до его появления. Для оценки этих показателей необходимо построить модель, с помощью которой можно представить процесс перехода объекта из состояния неисправности в состояние пожарной опасности.

Для априорной оценки вероятности возникновения пожароопасного состояния на основе данных о неисправностях объекта ЖДТ разработан метод прогнозирования пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ на стадии эксплуатации на основе графа состояний объекта.

Для объекта, пожарные риски которого описываются графом с несколькими опасными состояниями, вероятность перехода объекта из заданного начального неопасного состояния в конкретное опасное состояние зависит от следующих факторов:

- наличия путей перехода в опасное состояние;
- значений переходных вероятностей на прямых путях в опасное состояние;
- количества прямых путей перехода в опасное состояние (на которых не лежит другое опасное состояние).

Для определения вероятности попадания из фактического i -го неопасного состояния в заданное опасное предложен метод, основанный на следующем утверждении.

Утверждение. Вероятность перехода системы из конкретного i -ого начального состояния системы, принадлежащего множеству неопасных состояний ($i \in S_{\text{ПБ}}, S_{\text{ПБ}} \cap \bar{S}_{\text{ПБ}} \neq \emptyset, S_{\text{ПБ}} \cup \bar{S}_{\text{ПБ}} = S$), в любое состояние, принадлежащее множеству опасных состояний $f \in \bar{S}_{\text{ПБ}}$, определяется выражением (1):

$$b_{if} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_{\text{ПБ}}} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^f}{\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}}, \quad (1)$$

где l_k^{if} – вес k -го пути, ведущего из неопасного состояния графа $i \in S_{\text{ПБ}}$ в опасное состояние f ;

ΔG_k^f – вес разложения графа без f -й вершины и вершин графа, расположенных на k -м пути;

$\Delta G_{\bar{S}_{\text{ПБ}}}$ – вес разложения графа без вершин множества опасных состояний.

Предложенный метод позволяет устанавливать численное значение вероятности попадания объекта ЖДТ в пожароопасное состояние из неисправного состояния, выявленного по результатам аудита.

На Рисунке 1 в качестве примера представлен граф состояний кабелей в помещении стационарного объекта.

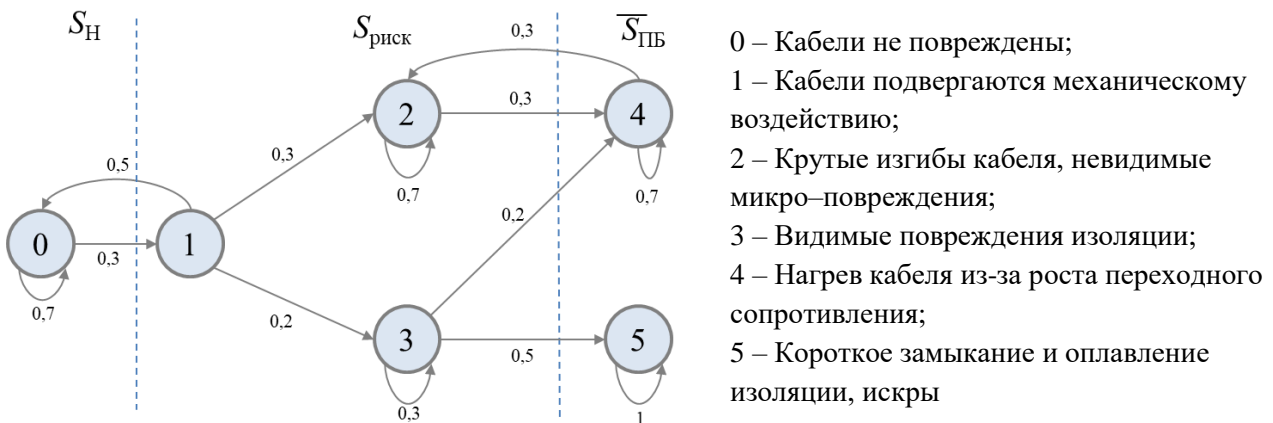


Рисунок 1 – Граф состояний кабелей в помещении

Априорная вероятность возникновения пожароопасного состояния (ПоС) является индивидуальной характеристикой объекта оценки, а не свойством группы, как в случае с апостериорной оценкой. На основе анализа зависимости прогноза вероятности появления ПоС от переходных вероятностей P_{ij} (которые характеризуют частоту появления определенных нарушений, неисправностей и, в некоторых случаях, отказов) планируется периодичность планового

технического обслуживания технических средств, являющихся ПИО. При этом переходные вероятности P_{ij} являются варьируемыми величинами, т.к. поддаются корректировке за счёт проведения организационно-технических мероприятий.

На Рисунке 2 приведены графики зависимости вероятности перехода объекта в опасное состояние «нагрев кабелей» от переходных вероятностей P_{34} , P_{12} , P_{24} , P_{10} .

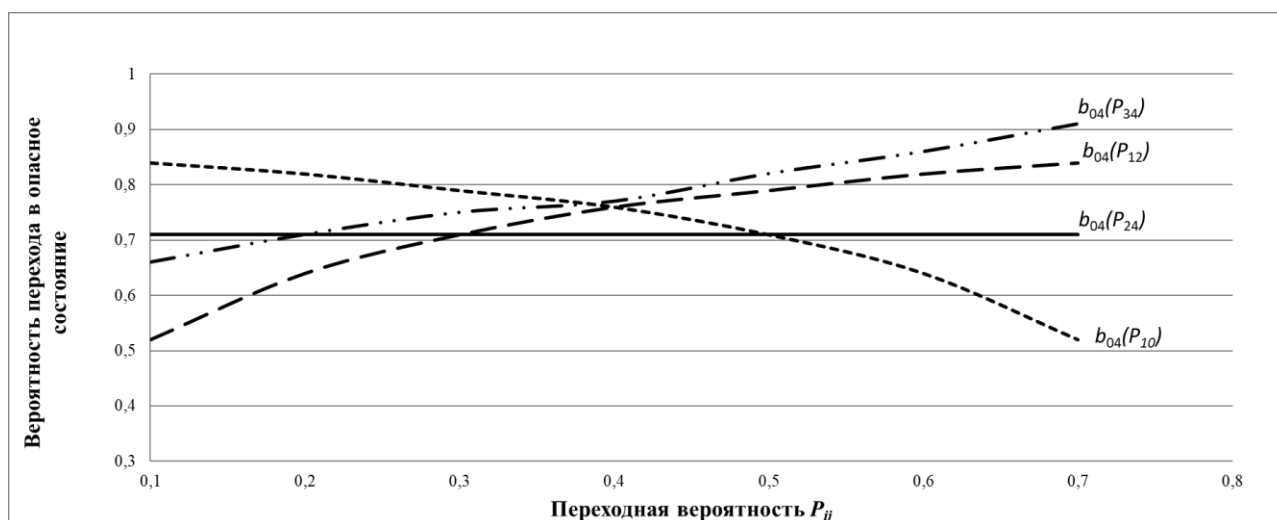


Рисунок 2 – Зависимость вероятности появления пожароопасного состояния от переходных вероятностей P_{34} , P_{12} , P_{24} , P_{10} .

Третья глава посвящена разработке алгоритмического обеспечения автоматизированной системы управления пожарными рисками объектов ЖДТ. Ключевым инструментом такой системы является подсистема аудита пожарных рисков с использованием классификаторов и контрольно-оценочных карт пожароопасных неисправностей объектов ЖДТ.

Классификаторы и контрольно-оценочные карты формируются на основе анализа сценариев появления пожара (СПП). Под СПП понимается последовательность событий или состояний объекта, которые приводят к появлению пожароопасного состояния. Они формируются на основе статистического анализа случаев пожаров и экспертных оценках опасности неисправностей объектов.

Для формирования типовых СПП и перечней пожароопасных неисправностей выработаны правила поиска общих признаков в текстовых описаниях СПП. Последовательность событий, приводящих к пожару, является частично упорядоченной, что позволяет представить все сценарии пожара в виде цепей событий (ЦС) одной длины. Для попарного сравнения ЦС используется расстояние по Хэммингу (2):

$$d_{lk} = \sum_{i=1}^5 r_i, \quad r_i = \begin{cases} 0, & x_{ki} = x_{li} \\ 1, & x_{ki} \neq x_{li} \end{cases} \quad (2)$$

где d_{lk} – расстояние между l -й и k -й ЦС,

x_{li} и x_{ki} – событие на i -м месте в ЦС l и k соответственно.

Для формирования типовых СПП объединяются ЦС с уровнями схожести «сильная» ($d = 1$) и «заметная» ($d = 2$). Если расстояние от одной ЦС до всех остальных $d \geq 1$, сценарий пожара, соответствующий ей, считается однократным (редким событием).

Все сценарии появления пожара можно объединить в четыре группы, в соответствии с которыми выделено три стратегии формирования классификатора пожароопасных неисправностей объектов ЖДТ:

— неоднократные сценарии возникновения пожара, развивающиеся путем перехода объекта из одного состояния в другое. В этом случае для формирования классификатора применяется стратегия составления классификатора на основе графа состояний;

— неоднократные сценарии возникновения пожара, развивающиеся из-за накопления пожароопасных неисправностей. На основе таких сценариев классификатор формируется по стратегии анализа видов технического обслуживания и ремонта (ТО/ТР), при проведении которого может быть устранена пожароопасная неисправность;

— неоднократные сценарии возникновения пожара, развивающиеся по неизвестным причинам, а также однократные пожары. В случае, когда не удастся установить истинные причины развития пожароопасной ситуации, применяется стратегия составления классификатора на основе шкалы экспертов.

На Рисунке 3 приведен алгоритм формирования классификатора пожароопасных неисправностей объектов ЖДТ и контрольно-оценочных карт. Для обеспечения эффективности аудита пожарных рисков неисправности, включенные в классификатор, должны быть сформулированы в виде, удобном для чтения аудитором, и обладать следующими свойствами:

— однозначность: формулировка неисправности должна однозначно определять узел или объект, к которому она относится;

— выявляемость в краткосрочный период: неисправность должна быть выявляема в ходе аудита объекта, т.е. без применения методов разрушающего контроля. Допускается включение в перечень неисправностей, для выявления которых необходимо применение средств диагностики, а также разбор узла;

— интерпретируемость: неисправность должна быть статистически наблюдаемой или оцениваемой экспертами для установления значений

переходных вероятностей или ранжирования видов ТО/ТР, на которых неисправность может быть выявлена.

Для проведения аудита разработаны алгоритмы автоматизированного диагностирования состояний объектов ЖДТ, позволяющие формировать классификаторы для аудита объектов ЖДТ, составлять контрольно-оценочные карты для диагностики объектов ЖДТ и выявлять неисправности объектов ЖДТ, являющиеся ПИО.

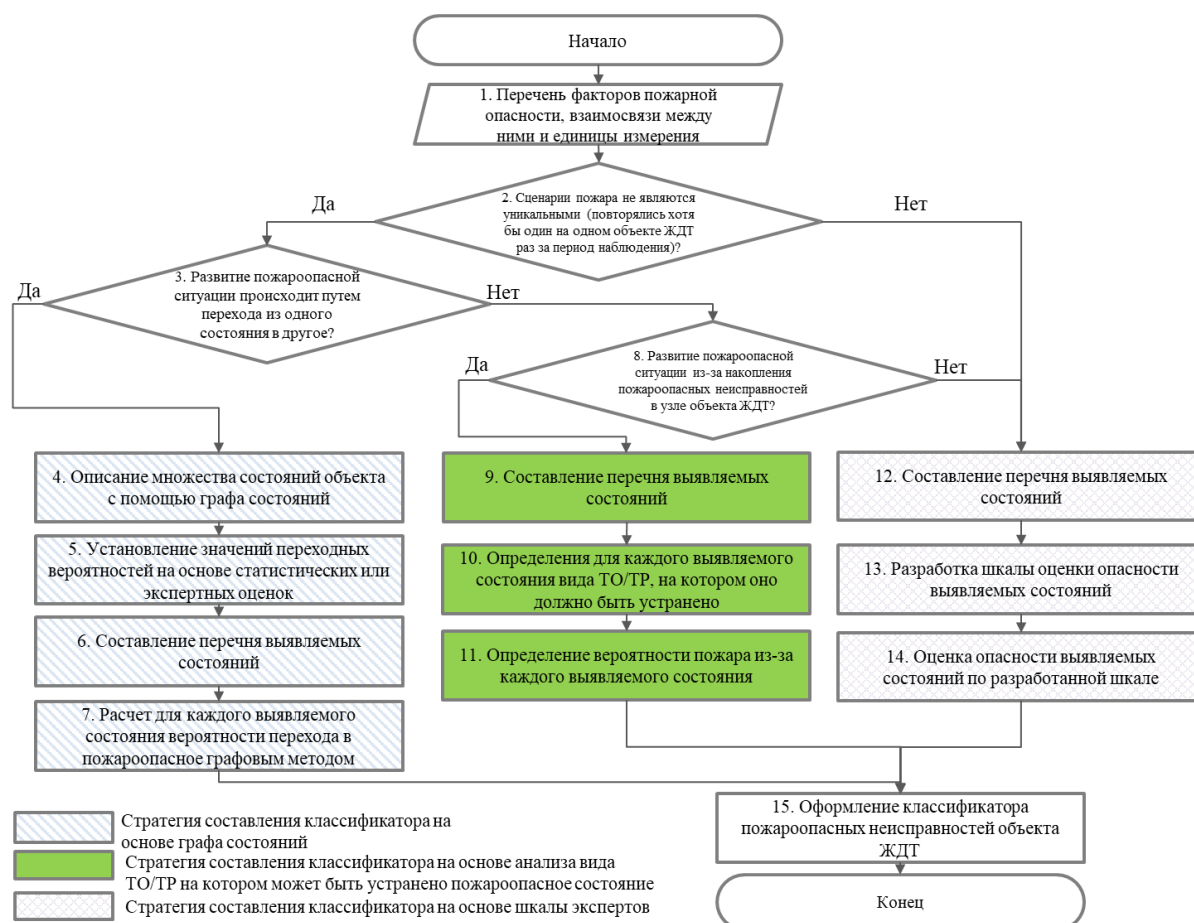


Рисунок 3 – Алгоритм формирования классификаторов неисправностей объектов ЖДТ для определения величины пожарного риска

Используя контрольно-оценочные карты для выявления состояний, дестабилизирующих пожарную безопасность, эксперты проводят автоматизированный аудит пожарной безопасности объектов ЖДТ. Для реализации автоматизированного аудита разработан унифицированный мобильный программно-аппаратный комплекс (МПАК), позволяющий минимизировать время сбора данных, а также отслеживать влияние выявленных состояний на уровень пожарного риска. Пример алгоритма функционирования МПАК для автоматизированной оценки пожарных рисков локомотивов приведен на Рисунке 4.

Подготовка к аудиту реализуется один раз для каждого типа объекта ЖДТ или однородной, по техническим характеристикам группы объектов (серия локомотива, стационарные объекты одного функционального назначения или с одинаковым набором оборудования). Аудит осуществляется специалистами, ответственными за эксплуатацию объектов, с помощью контрольно-оценочных карт, составленных с учетом особенностей конструкции и эксплуатации объектов. По результатам аудита проводится оценка пожарных рисков.

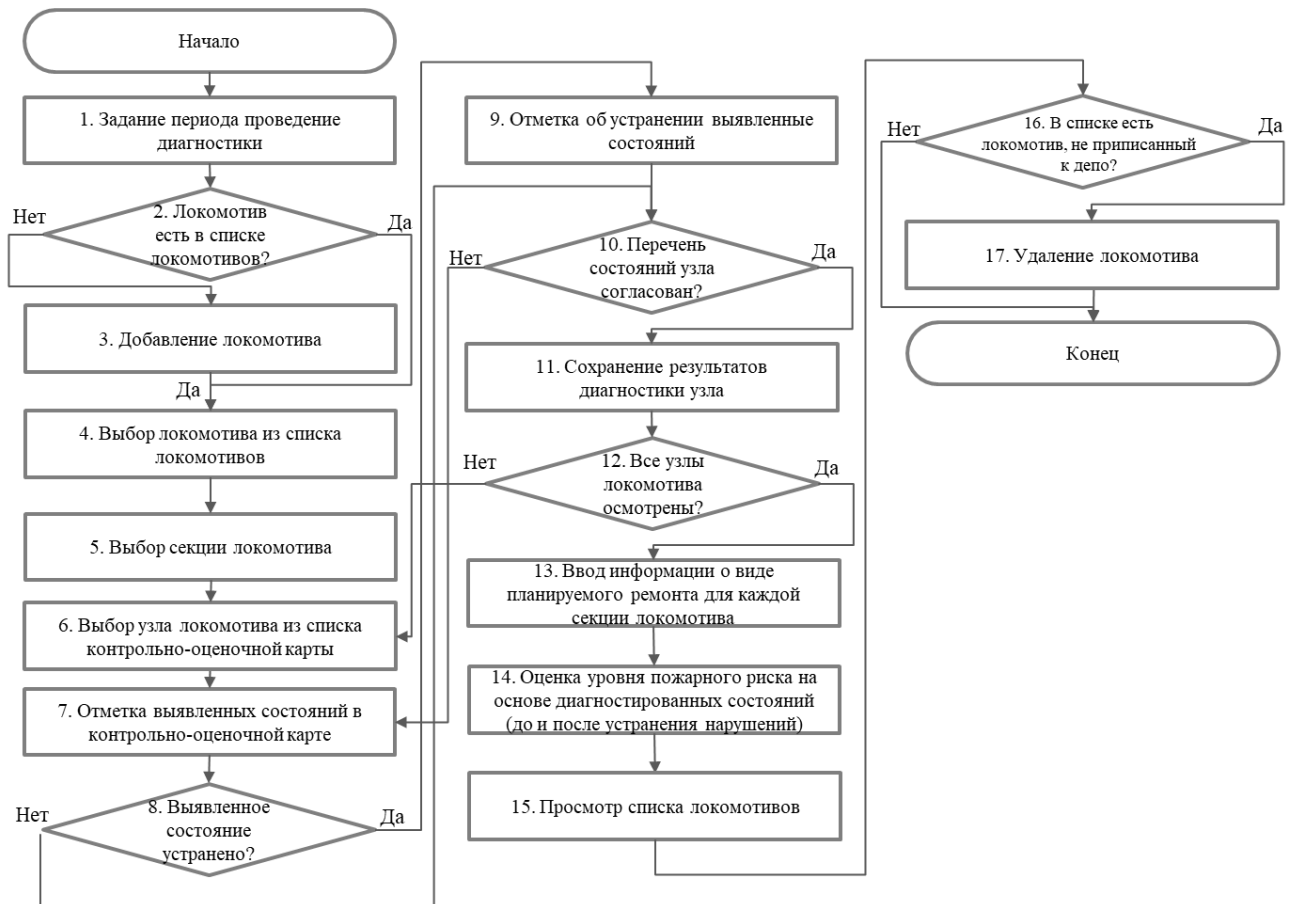


Рисунок 4 – Алгоритм функционирования МПАК для оценки пожарного риска локомотива

МПАК содержит блоки ввода данных об объекте ЖДТ, обеспечивает расчет значений показателей, влияющих на уровень пожарного риска, определение уровня пожарного риска, реализует правила принятия решения о декларировании объекта ЖДТ и допуска его к эксплуатации.

В диссертации разработан также специфичный алгоритм диагностирования пожарных рисков стационарных объектов ЖДТ. Необходимость дифференцированного подхода к алгоритмическому и программному обеспечению автоматизированной диагностики пожароопасных состояний стационарных объектов и локомотивов вызвана различными подходами к описанию состояний объектов.

Для стационарных объектов трудоемко составлять и поддерживать в актуальном состоянии полный перечень ПИО и их возможных состояний, однако нарушения ТПБ таких ПИО поддаются классификации (из-за единства требований к ним). Состояние стационарного объекта для априорной оценки вероятности появления пожара целесообразно описывать множеством различных комбинаций нарушений требований пожарной безопасности.

В то же время ПИО локомотива являются его узлы, которые хорошо поддаются классификации, и каждый узел может быть описан конечным множеством его состояний.

После оценки уровня пожарного риска на основании внесенных в МПАК данных о состояниях пожарной опасности разрабатывается план их устранения с учётом уровня риска, которые образуют эти состояния. В случае, если объект ЖДТ допускается к эксплуатации с ограничениями, то устранение пожароопасных состояний осуществляется в рамках планового технического обслуживания и ремонта. Если объект не допускается к эксплуатации, то он направляется на внеплановый ремонт.

В четвертой главе приведены результаты применения автоматизированной системы управления пожарными рисками на объектах ОАО «РЖД».

Разработанная методика автоматизированного управления пожарными рисками подвижных объектов ЖДТ впервые позволяет количественно оценивать пожарную опасность ПИО: количество узлов локомотивов, состояние которых может привести к пожару, прогноз вероятности возникновения пожара в случае устранения пожароопасных состояний.

В основе методики лежит стохастическая модель определения вероятности появления пожара для группы подвижных объектов, позволяющая проводить аудит пожарной безопасности единиц подвижного состава, ранжировать объекты по уровню риска и планировать мероприятия по их ремонту.

Применение разработанной методики в эксплуатационных депо Дальневосточной и Красноярской дирекциях тяги позволило выявить 9761 пожароопасную неисправность на 221 тепловозе серии 2ТЭ10 и 13318 неисправностей на 585 электровозах серии ВЛ80.

Для стационарных объектов железнодорожной инфраструктуры разработан комплекс методик оценки пожарных рисков, включающий блок оценки систем противопожарной защиты (СОПБ), оценку риска для перевозочного процесса, имущества и людей. Для объектов с массовым пребыванием людей рассчитаны пожарные риски на 365 вокзалах Дирекции железнодорожных вокзалов. Из них

на 25 вокзалах выявлены нарушения по отношению к системам инженерного обеспечения, образующие нежелательный уровень пожарного риска, на 254 вокзалах риск оценен как допустимый, на 71 вокзале – не принимаемый в расчет. Все вокзалы переведены в зону допустимого риска за счет проведенных мероприятий. На 19 из 32 постов электрической централизации выявлены нежелательные уровни риска и спланированы мероприятия по устранению дестабилизирующих факторов.

Для обеспечения возможности массового использования разработанных методик был создан МПАК, позволяющий проводить автоматизированный аудит пожарной безопасности и оценку пожарного риска. На Рисунке 5 приведена форма вывода информации об уровне риска локомотива.



Рисунок 5 – Форма вывода информации об уровне риска локомотива МПАК

По результатам оценки пожарных рисков осуществляют:

— планирование корректирующих мероприятий для устранения выявленных в ходе аудита состояний, образующих недопустимый уровень пожарного риска;

— проведение корректирующих мероприятий и регистрацию информации о изменении состояния объекта ЖДТ.

Для допуска локомотивов к эксплуатации разработан алгоритм, включающий априорный и апостериорные оценки пожарного риска в качестве критериев безопасности объекта ЖДТ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Обоснована целесообразность разработки и использования алгоритмов интеллектуализации диагностики неисправностей объектов ЖДТ, приводящих к повышению пожарного риска. Анализ состояния проблемы оценки и управления пожарными рисками на объектах ЖДТ, видов автоматизированных систем управления пожарными рисками в России и странах Европы позволил выявить необходимость разработки методов и алгоритмов, обеспечивающих возможность прогнозирования вероятности пожара на основе технических характеристик объектов железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава.

2. Разработаны классификаторы неисправностей объектов ЖДТ, дестабилизирующих пожарную безопасность, а также контрольно-оценочные карты для интеллектуализации их диагностики в рамках автоматизированного аудита пожарных рисков на постах электрической централизации, тяговом подвижном составе, информационно-вычислительных центрах ОАО «РЖД», тяговых подстанциях ОАО «РЖД», железнодорожных вокзалах.

3. Разработан метод математического моделирования пожарного риска объекта ЖДТ на стадии его эксплуатации. Метод основывается на результатах статистического анализа пожаров и отказов на объектах ЖДТ. Он заключается в формализации описания процесса изменений состояний объекта ЖДТ с помощью ориентированного графа состояний, моделировании развития событий, приводящих к пожару.

4. Предложен способ определения вероятности перехода объекта в опасные состояния из выявленного неопасного состояния, обеспечивающий возможность определения априорной вероятности появления пожара на основе информации о начальном и последующих возможных состояниях объекта ЖДТ, выявленных по результатам аудита.

5. Разработаны способ и алгоритмы автоматизированного диагностирования пожарных рисков ПИО на объектах инфраструктуры и подвижного состава, впервые позволяющие собирать исходные данные для оценки пожарных рисков без привлечения сотрудников надзорных органов.

6. Разработаны методики оценки пожарных рисков объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ. Эти методики реализованы в ОАО «РЖД» в системе управления пожарными рисками.

7. Создан мобильный программно-аппаратный комплекс, позволяющий проводить аудит пожарной безопасности и оценку пожарного риска на стадии эксплуатации объектов инфраструктуры и подвижного состава ЖДТ, обеспечивающий возможности одновременного проведения массовых расчетов пожарных рисков.

8. Проведены расчёты пожарного риска для 407 стационарных объектов ОАО «РЖД». По результатам диагностирования пожароопасных состояний выявлен нежелательный уровень пожарного риска для 25 (из 365) железнодорожных вокзалов, 19 (из 32) постов ЭЦ, 4 (из 10) тяговых подстанций.

9. Проведены аудит и оценка пожарного риска на 806 локомотивах, по результатам которых устранено 23051 пожароопасное состояние. В Дальневосточной дирекции тяги недопустимый уровень пожарного риска был выявлен для 207 тепловозов ТЭ10, у 14 тепловозов установлен нежелательный уровень пожарного риска. Для 585 электровозов Красноярской дирекции тяги был установлен недопустимый уровень пожарного риска.

В качестве рекомендаций и перспективы дальнейшей разработки темы диссертации предлагается повышение точности и достоверности прогнозирования пожарных рисков объектов ЖДТ путем обработки больших данных о пожароопасных состояниях объектов транспорта методами и алгоритмами искусственного интеллекта *Data Mining* и *Data Science*.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

а) Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Проневич, О.Б. Разработка математической модели оценки эффективности систем обеспечения пожарной безопасности стационарных объектов / О.Б. Проневич // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 7. – С. 67-72.

2. Проневич, О.Б. Особенности оценки вероятности возникновения пожаров на тепловозах различных серий / И.Б. Шубинский, О.Б. Проневич, А.Д. Данилова // Надежность. – 2016. – №16(4). – С. 24-29.

3. Проневич, О.Б. Оценка пожарных рисков тягового подвижного состава в условиях неполной информации / В.А. Гапанович, О.Б. Проневич // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 11. – С. 58-63.

4. Проневич, О.Б. Методы анализа пожарной безопасности тягового подвижного состава / О.Б. Проневич // Надежность. – 2017. – №17(2). – С. 48-55.

5. Проневич, О.Б. Графовый метод оценки производственной безопасности на объектах железнодорожного транспорта / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, О.Б. Проневич // Надежность. – 2017. – Москва. – №17(1). – С. 40-45.

6. Проневич, О.Б. Система управления техногенными рисками в ОАО «РЖД» / В.А. Гапанович, И.Б. Шубинский, О.Б. Проневич, В.Э. Швед // Железнодорожный транспорт. – 2017. – №12 – С. 34-40.

7. Проневич, О.Б. Автоматизированная система прогнозирования пожарной безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков / О.Б. Проневич, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2019. – №19 (1). – С. 48-53.

б) Патент на изобретение:

8. Пат. №2674216 Российская Федерация. СПК G06Q 90/00 (2018.08) Способ определения пожарной опасности технических объектов железнодорожного транспорта и система для его реализации / Вихрова Н. Ю., Гапанович В.А., Проневич, Розенберг И.Н., Розенберг Е.Н., Швед В.Э., Шубинский И.Б.; заявитель и патентообладатель АО «НИИАС» – № 2017141007, заявл. 24.11.2017, опубл. 05.12.2018, Бюл. № 34. – 24 с.

в) В материалах конференций:

9. Проневич, О.Б. Анализ пожарной безопасности тягового подвижного состава и оценка пожарных рисков / А.Д. Данилова, О.Б. Проневич, А.В. Лохач // Материалы V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2016. – С. 13-16.

10. Проневич, О.Б. Анализ пожарных рисков на постах электрической, диспетчерской и горочной централизации ОАО «РЖД» / О.Б. Проневич, А.В. Лохач, В.Э. Швед // Материалы V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016». – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2016. – С. 34-37.

11. Проневич, О.Б. Аудит пожарной безопасности тягового подвижного состава и оценка риска по фактическому состоянию / В.Э. Швед, О.Б. Проневич // Материалы VI-й международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2017». – М.: Академия ГПС МЧС России. – 2017. – С. 545-459.

Проневич Ольга Борисовна

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ
ПОЖАРНЫМИ РИСКАМИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ БЕЗОПАСНОСТИ
ДВИЖЕНИЯ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и
производствами (транспорт)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __. __. 2021 Заказ № _____ Формат 60x84^{1/16} Тираж 80 экз.

Объем 1,5 усл. п. л. Типаж 80 экз.

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, дом 9, стр. 9,
ЦСО Отдел дизайна, верстки и печати РУТ (МИИТ)