

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи



Андрюков Александр Владимирович

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКА ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ
БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ
ПРИ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИИ НА КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

научный руководитель – кандидат технических наук, доцент
Ковалев Алексей Анатольевич

Екатеринбург – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ.....	9
1.1 Анализ работ по теме научного исследования.....	9
1.2 Способы борьбы с гололедообразованием на участках контактной сети.....	12
1.3 Анализ влияния многочисленных факторов на работоспособность контактной сети.....	19
1.4 Статистическая оценка отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования	20
Выводы по первой главе.....	31
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МНОГОФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ В ВИДЕ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА ПО ОЦЕНКЕ РИСКА ОТКАЗОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ИЗ-ЗА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ.....	32
2.1 Оценка влияния стрел провеса контактного провода для обеспечения безопасности движения поездов на участке контактной сети.....	32
2.2 Установление критериев (сочетание факторов), способствующих возникновению аварий на контактной сети	40
2.3 Математическая многофакторная модель в виде марковского процесса по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования.....	45
Выводы по второй главе	58
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА МАТРИЦЫ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ РИСКОВ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА УЧАСТКАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ.....	59
3.1 Классификация рисков для оценки гололедообразования на контактной сети.....	60
3.2 Определение перечня нежелательных последствий при оценке риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололеде	62
3.3 Определение шкал частот и последствий гололедообразования на участке железнодорожной магистрали	67

3.4 Разработка структуры математической матрицы для ранжирования и отражения риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании	72
3.5 Расчет интегральной оценки уровня риска на участке контактной сети «Е-Ч»	76
Выводы по третьей главе.....	81
ГЛАВА 4 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА УЧАСТКАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В СЛОЖНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.....	82
4.1 Мероприятия по предупреждению гололедообразования устройств контактной сети на исследуемом участке железнодорожной магистрали	82
4.2 Алгоритм управления рисками из-за гололедообразования на участках контактной сети.....	88
4.3 Расчет стоимости жизненного цикла контактной подвески с учетом выбора мероприятий по предупреждению гололедообразования.....	93
Выводы по четвертой главе.....	99
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	100
ПРИЛОЖЕНИЕ А	102
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	122
ПРИЛОЖЕНИЕ В	124
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	126

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Холдинг «Российские железные дороги» – одна из крупнейших бизнес-систем России с высоким потенциалом для повышения эффективности удовлетворения растущего спроса на транспортные услуги как внутри страны, так и за ее рубежом. Достижение вышесказанного невозможно без обеспечения высокого уровня безопасности и надежности перевозочного процесса.

Основной задачей внедряемой методологии по Управлению ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН) является управление рисками объектов железнодорожного транспорта. Для обеспечения безопасности движения поездов на участках контактной сети, специалисты проводят анализ риска с учетом статистических данных об отказах устройств контактной сети, возникающих за определенный период времени. Повышение эффективности работы контактной сети достигается за счет улучшения систем мониторинга и диагностики устройств, а также расширения практики планирования и проведения работ по ремонту и обслуживанию объектов с учетом прогнозируемых рисков отказов.

Наибольшее количество отказов на контактной сети (КС) происходит из-за недостатков в эксплуатационной работе, отклонениях в технических параметрах элементов системы. Значительная часть нарушений связана с внешними климатическими факторами, например с гололедом, который существенно повышает нагрузку на провода. Гололедообразование на контактном проводе ухудшает токосъем, вызывая образование электрической дуги.

Существующие районы гололедообразования, указанные в справочной литературе, зависят от фактических значений толщины стенки гололеда, зафиксированных в процессе эксплуатации за последние 10 лет. В связи с этим появляется

потребность разработки алгоритма управления рисками с целью правильного определения уровня риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на участках железнодорожных магистралей.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями в области повышения качества токосъема занимаются многие научные работники транспортных высших учебных заведений России, таких как ДВГУПС, ОмГУПС, ПГУПС, РГУПС, СамГУПС, УрГУПС, ВНИИЖТ, УКС и др.

Решение задач в области управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами отобразено в трудах А. М. Замышляева, Е. Н. Розенберга, И. Б. Шубинского и др. которые сформировали теоретические основы функциональной безопасности на железнодорожном транспорте.

Исследование проблем гололедообразования на контактной сети изложено в работах А. Н. Смердина, А. А. Ковалева, Е. В. Добрынина, И. В. Игнатенко, Ф. Кисслинга, Р. Пушмана, А. Шмидера.

Теоретическую основу в области повышения надежности устройств контактной сети составляют работы А. Г. Галкина, А. В. Ефимова, А. В. Окунева, В. П. Михеева, М. В. Шевлюгина, О. А. Сидорова, С. А. Митрофанова.

Цель работы: разработка методики оценки риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на участках железнодорожных магистралей.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ эксплуатационной надежности устройств контактной сети при условии гололедообразования.
2. Разработать математическую многофакторную модель в виде марковского процесса по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования.
3. Разработать матрицу, позволяющую ранжировать и отражать риск по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на участках контактной сети.

4. Разработать алгоритм управления рисками из-за гололедообразования на участках контактной сети для повышения безопасности движения поездов в сложных метеорологических условиях.

Направление исследования соответствует паспорту специальности, а именно пункт 10 «Взаимодействие токоприемников электроподвижного состава и контактных подвесок. Системы контактных подвесок и токоприемников, устройства и материалы, повышающие надежность, работоспособность системы токосъема, в том числе в условиях скоростного и высокоскоростного движения».

Научная новизна:

1. Предложена и научно обоснована математическая многофакторная модель в виде марковского процесса, которая позволяет спрогнозировать возникновение отказа на участке контактной сети и оценить риск по обеспечению безопасности движения поездов.

2. Разработана матрица, позволяющая ранжировать и отражать риск по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на различных участках контактной сети во всех климатических районах. Предложенная матрица *отличается* тем, что станет инструментом для принятия решения при проектировании железнодорожных магистралей в части выбора оборудования контактной сети.

3. Предложен к применению алгоритм управления рисками при гололедообразовании на участках контактной сети для обеспечения бесперебойного движения поездов в сложных метеорологических условиях, *отличающийся* тем, что на его основе становится возможным составить план мероприятий по предупреждению и предотвращению гололедообразования и не допустить задержку поездов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Выполнен анализ эксплуатационной надежности контактной сети по причине гололедообразования для участков Свердловской и Южно-уральской железных дорог.

2. Дана оценка влияния стрел провеса контактного провода на обеспечение безопасности движения на проектируемых участках железных дорог, для которых уточнены гололедные районы.

3. Выполнен расчет стоимости жизненного цикла контактной подвески, учитывающий проведение мероприятий по предупреждению гололедообразования.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования являлись основные положения теории надежности и теории вероятностей. Для решения поставленных задач использовались структурные сети Байеса, математическое моделирование и математическая статистика. Для проведения математических расчетов применялись лицензионные программные продукты: электронные таблицы *Microsoft Excel* и пакет прикладных программ *Matlab/Simulink*.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Математическая многофакторная модель в виде марковского процесса по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования.

2. Матрица, позволяющая ранжировать и отражать риск по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на участках контактной сети.

3. Алгоритм управления рискам гололедообразования на участках контактной сети, обеспечивающий бесперебойное движение поездов в сложных метеорологических условиях.

Реализация результатов работы

Практическая значимость исследования подтверждается получением свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Автоматизированный расчет риска гололедообразования на различных участках», а также актами внедрения результатов научно-исследовательской работы в АО «Фортатэкэнерготрансстрой», специализирующегося на проектировании контактной сети.

Достоверность результатов исследования обоснована высокой сходимостью результатов расчета математической модели на основе статистических данных в программном обеспечении *Matlab/Simulink*.

Обоснованность результатов диссертационного исследования достигается базированием на строго доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, таких как математический анализ, теория вероятностей, математическая статистика.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ, в том числе 3 статьи в ведущих изданиях из перечня, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науке Российской Федерации.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались на следующих конференциях, семинарах: «Всероссийская научно-техническая конференция Транспорт Урала», г. Екатеринбург (УрГУПС, 202); Международная научно-практическая конференция «Железнодорожный транспорт и технологии (РТТ-2021, 2022)», г. Екатеринбург (УрГУПС, 2021, 2022); Всероссийская научно-техническая конференция «Электроэнергетические комплексы и системы: история, опыт, перспектива» г. Хабаровск (ДВГУПС, 2020); IX Всероссийская научная конференция «Студент: наука, профессия, жизнь» г. Омск (ОмГУПС, 2022); XV Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту» г. Самара (СамГУПС, 2022); Международная научно-практическая конференция, посвященная юбилею Самарского государственного университета путей сообщения, г. Самара (СамГУПС, 2023); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации устройств электроснабжения электрического транспорта» г. Омск (ОмГУПС, 2023).

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 128 страницах, содержит 115 страниц основного текста, 44 рисунка, 11 таблиц, 4 приложения, 125 наименований библиографического списка, включая 2 наименования зарубежных источников.

1 АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ УСТРОЙСТВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ С УЧЕТОМ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

1.1 Анализ работ по теме научного исследования

В научной литературе широко распространены различные толкования понятия «риск». Некоторые подходы рассматривают его как вероятность возникновения несчастного случая, угрозы, аварии или катастрофы в определенных условиях производственного процесса или окружающей среды. В данных определениях особое внимание уделяется как активной роли субъекта, так и объективным особенностям окружающей среды.

Например, риск гололедообразования определяется как вероятность возникновения опасности образования гололеда и последующего ущерба для контактной сети. В настоящее время все эти интерпретации термина «риск гололедообразования» активно используются при анализе опасностей и управлении безопасностью технологических процессов и производств в целом. Таким образом, формирование опасных и чрезвычайных ситуаций является результатом сложного взаимодействия различных факторов риска гололедообразования.

Топологический полумарковский метод, графовые полумарковские методы были разработаны ученым *И. Б. Шубинским* [123, 124, 125], которые использовались для определения вероятностных показателей надежности систем различных состояний. Графовые методы рассчитывали временные показатели надежности и их функции распределения, а топологический метод использовали для более сложных структур систем, он обеспечивал определение коэффициентов готовности и простоя.

Система управления рисками в области безопасности движения на железно-

дорожном транспорте позволяет обеспечить эффективное функционирование железнодорожного транспорта в условиях ограниченных финансовых ресурсов. Вопросами внедрения такой системы управления рисками на ОАО «РЖД» занимается руководитель научно-технического комплекса по системе обеспечения безопасности движения поездов *А. М. Замышляев* [30, 31, 32, 33, 34]. Он разработал методологию УРРАН (управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла), основная цель которой в области электрификации и электроснабжения – повышение надежности и безопасности объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков за счет сбора и обработки данных по отказам устройств электроснабжения.

Е. Н. Розенберг провел исследование ключевых аспектов концепции построения многоуровневых систем обеспечения безопасности движения поездов. В рамках своей работы он разработал математические методы и алгоритмы для проведения расчетов, прогнозирования и обоснования функциональной безопасности и надежности. Эти методы направлены на обеспечение высоких показателей эффективности контроля и времени принятия решений [98, 99, 100]. Ефим Наумович сформулировал комплекс моделей функциональной безопасности многоуровневых систем электроснабжения с учетом ограниченной надежности и эффективности средств контроля для передачи ответственной информации в цифровых технологиях.

А. В. Бунзя разработал устройство для удаления наледи с двойных контактных проводов импульсно-резонансным методом, которое позволяет сократить энергозатраты и исключить отжиг контактных проводов при устранении гололеда на участках железнодорожных магистралей [10].

А. Г. Галкин разработал математические модели, представляющие собой единую систему моделирования отдельных объектов контактной сети и позволяющие описывать процессы изменения их технических состояний на всех этапах жизненного цикла [13, 14, 15, 19].

Вопросом повышения надежности работы устройств контактной сети на основе совершенствования технологий их защиты от воздействия внешней среды в

условиях тяжеловесного движения занимался *А. А. Ковалев* [45, 46, 47]. Он разработал технологию защиты устройств контактной сети от гололеда, позволяющую сохранить заданный график движения поездов, определил теплофизические характеристики проводов контактной сети, покрытых *Isollat*, которые доказали возможность его нанесения. Предлагаемая технология не требует выделения дополнительных «окон», остановки поездов и может проводиться на одном участке не чаще одного раза за десять лет.

А. Н. Смердин разработал вероятностную модель прогнозирования отказов в работе системы токосъема вследствие гололедообразования на устройствах контактной сети, которая позволяет определить вероятность благоприятного исхода (отсутствие отказов устройств токосъема или приемлемое их число) при управляемых изменениях статистических данных [92, 106, 107, 108].

Вопросами повышения надежности и моделирования токоприемников ЭПС занимался такой ученый, как *В. П. Михеев*. Он рассмотрел и дал развернутую оценку качества и надежности токосъема на различных участках пути [69].

О. А. Сидоров совершенствовал токоприемники для высокоскоростного движения, а также исследовал взаимодействие этих токоприемников с элементами контактной сети при различных погодных условиях [91, 95, 104, 105].

И. В. Игнатенко занимался повышением эксплуатационной надежности токопроводящих зажимов контактной сети электрифицированных железных дорог. Иван Владимирович предложил нанесение серебряно-цинкового покрытия на контактные поверхности токоведущих частей зажимов методом легирования для снижения и стабилизации значения переходного электросопротивления, разработал математическую модель нагрева болтовых зажимов, учитывающую функциональную зависимость между формой теплопередающей поверхности и коэффициентом теплоотдачи плашек зажима для предотвращения гололеда на линиях электропередач [35, 36, 78].

С. А. Митрофанов разработал математическую модель и методику для проведения риск-анализа и прогнозирования состояния контактной сети. Этот подход включает в себя разработку комплексной диагностической оценки, учитывающей

как нарушения, так и их потенциальные последствия для элементов контактной сети [62, 63, 64, 65].

А. В. Окунев провел глубокий анализ риска возможной задержки поезда, обусловленного потенциальным отказом опоры контактной сети. В своем исследовании он выявил неотъемлемую необходимость использования комплексного подхода к диагностике состояния опор контактной сети. Этот интегрированный метод охватывает множество измеряемых параметров, подчеркивая важность комплексного контроля. Кроме того, исследование предполагает применение метода статистического анализа в сочетании с теоремой Байеса и методом последовательного анализа, что обеспечивает более точное и надежное изучение данных [76].

Проблемой борьбы с гололедообразованием на контактной сети занимались следующие иностранные ученые: *Ф. Кислинг, Р. Пушман, А. Шмидер*. Они разработали две разные схемы подключения для плавки гололеда [38]:

- 1) создание короткого замыкания между контактной сетью и рельсом;
- 2) питание контактной сети от двух фаз одного трансформатора или двух трансформаторов.

1.2 Способы борьбы с гололедообразованием на участках контактной сети

Для ограничения различных неблагоприятных воздействий необходимы схемы плавки гололеда и способы, которые позволят на важных железнодорожных линиях в зависимости от интенсивности наледи избежать или снизить последствия нарушения поездов. Особенно это относится к высокоскоростным железнодорожным магистралям, где после ночных рабочих перерывов ожидается

наличие высокой эксплуатационной готовности.

Для борьбы с гололедообразованием на участках контактной сети применяются следующие способы [82, 103]:

- механический;
- химический;
- электрический.

Механическое удаление наледи возможно с помощью изолирующей штанги. Монтажники, стоя на рабочей платформе, ударяя по контактному проводу, вызывают колебания, и лед падает с проводов по длине всего пролета. Некоторые железнодорожные предприятия используют для удаления гололеда вибрационные токоприемники, которые вызывают колебания контактного провода. Локомотивы, используемые для этого, движутся с двумя поднятыми токоприемниками со скоростью 40-60 км/ч. Электрический вращающийся барабан ударяет стальными стержнями по нижней части контактного провода, покрытого льдом. Данный способ подходит только для удаления льда толщиной до 4 мм. Если слой льда более 4 мм, то удалить его можно быстрее и эффективнее с помощью плавки гололеда контактного провода. Механические методы устранения обледенения могут привести к повреждению контактных проводов, поэтому данный способ следует применять только для того, чтобы избежать еще больших повреждений, вызванных наледью.

Химические методы также позволяют избежать или ограничить образование наледи на токоприемниках или разъединителях. Этого можно достичь благодаря гололедоочистительным смазкам, которые препятствуют прилипанию и образованию льда и наносятся в мастерских технического обслуживания каждые три дня. Разъединители контактной сети с контактами, на которые не нанесено покрытие, должны обрабатываться минимум один раз в год. В связи с трудозатратами и ограниченным сроком действия обработка контактных проводов химическим методом оказалась нерентабельной.

Для предотвращения образования гололеда на контактных проводах используют два электрических метода:

- 1) профилактический подогрев провода;
- 2) плавка гололеда.

При профилактическом подогреве контактного провода подается электрический ток, который поддерживает температуру контактного провода $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, предотвращая таким образом образование гололеда на контактной подвеске. В зависимости от погодных условий для такой цели достаточно $1\text{-}3,5\text{ А/мм}^2$. Профилактический подогрев используется в тех климатических районах железных дорог, при которых есть вероятность образование гололеда. Используемые схемы соединения не препятствуют движению поездов.

Образовавшийся гололед начинает таять при плотности тока $3,5\text{-}8\text{ А/мм}^2$. Это позволяет восстановить движение в течение одного часа. Для того чтобы выбрать величину тока и время, необходимое для плавки гололеда, можно воспользоваться соответствующими таблицами и диаграммами, в которых указаны стандартные значения толщины льда и плотности, температура окружающей среды и скорость ветра. Плавка возможна при толщине стенки гололеда от трех до пяти миллиметров, в зависимости от характеристик льда. После удаления гололеда необходимо нагревать контактные провода еще в течение 10-15 минут, для того чтобы высушить их поверхность. Величина тока, необходимая для плавки гололеда, не должна превышать заданные, зависящие от материала температурные границы предельно допустимой силы тока в контактной сети при соответствующей температуре окружающей среды, толщине стенки гололеда, силе ветра и продолжительности протекания тока.

Кроме того, необходимо учитывать предельно допустимую нагрузку всех остальных элементов системы электроснабжения, например разъединителей, трансформаторов тока, кабеля и электрических соединений, и регулировать ее.

В настоящий момент существуют две схемы подключения по плавке гололеда:

– создание короткого замыкания между контактной сетью и рельсом (рисунки 1.1-1.2). Такая схема применяется для быстрого устранения обледенения контактной сети. Движение поездов должно быть обязательно приостановлено.

Место короткого замыкания зависит от участка контактной сети, с которого нужно удалить обледенение, и от величины необходимого тока. После удаления гололеда на первом участке выполняется переключение на следующий и так далее;

– питание контактной сети от двух фаз одного трансформатора или двух трансформаторов (рисунки 1.3-1.4). Движение поездов в этом случае возможно. При этом система защиты контактной сети должна полностью контролировать, чтобы сумма тягового тока и тока нагрева не превышала допустимую токовую нагрузку при соответствующих погодных условиях. Данную схему подключения можно использовать для профилактического подогрева устройств контактной сети. Так как в схеме ток проходит только через контактную сеть, то при использовании такого метода отсутствуют непроизводительные потери энергии.

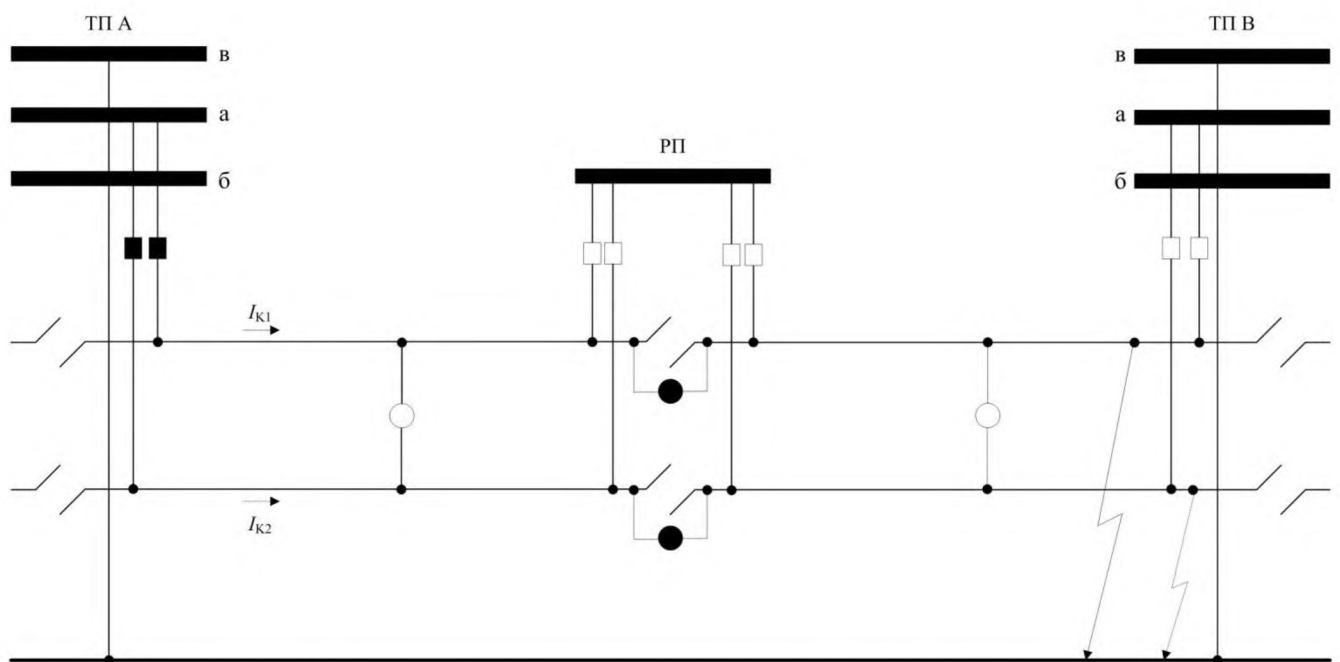


Рисунок 1.1 – Схема подключения контактной сети для плавки гололеда с однопутным или двухпутным участком между питающими подстанциями А и В или на распределительном poste

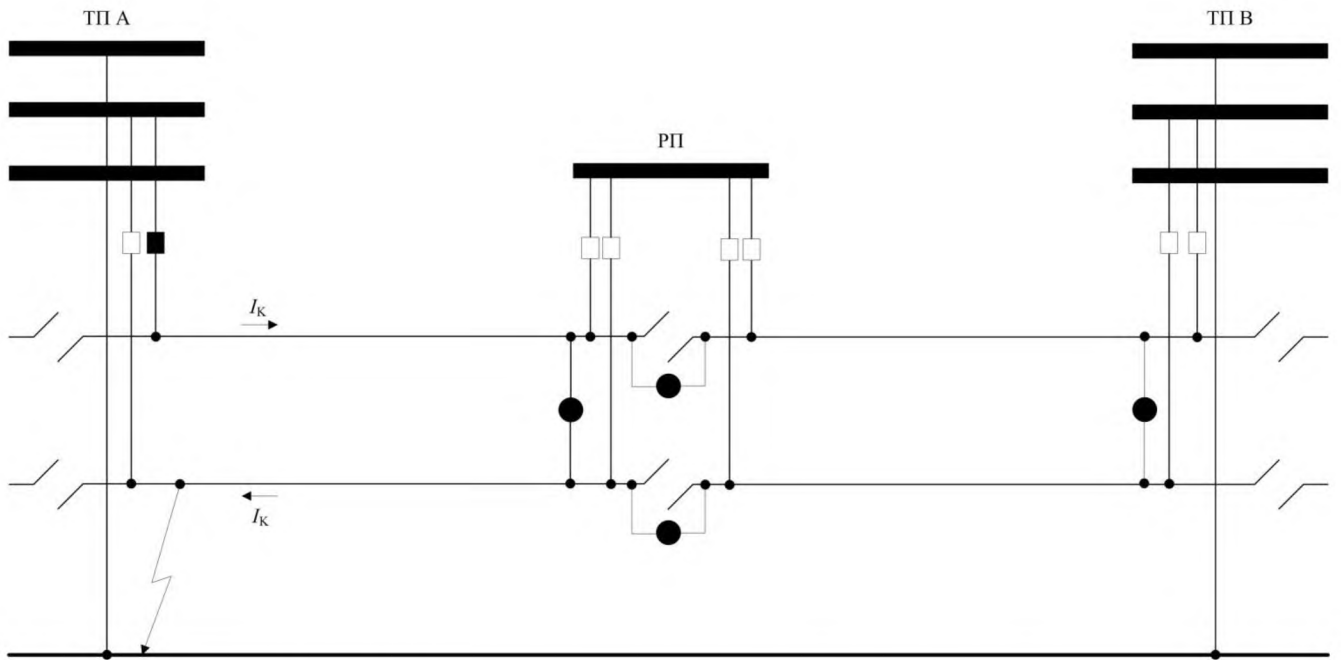


Рисунок 1.2 – Схема подключения контактных подвесок для плавки гололеда при петле от подстанции А к распределительному посту и соседней подстанции В с искусственным коротким замыканием на питающей подстанции А

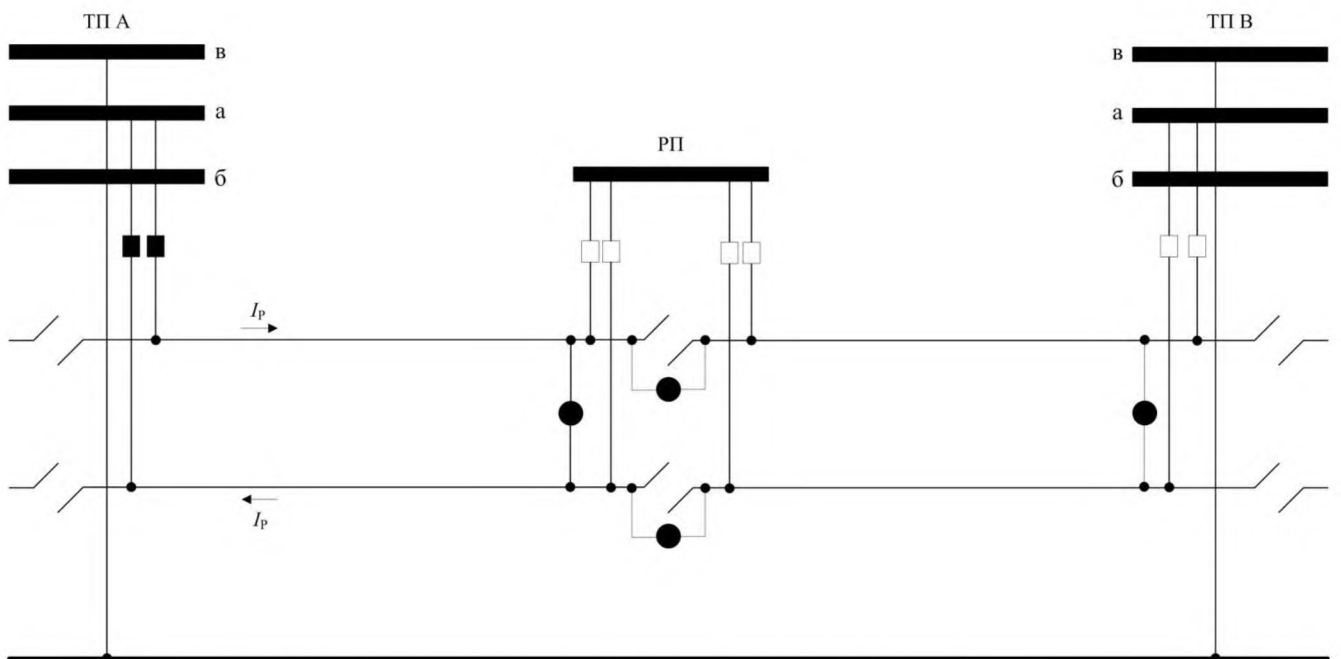


Рисунок 1.3 – Схема подключения контактных подвесок для плавки гололеда при использовании разных питающих фаз подстанции А в петле к распределительному посту и соседней подстанции В

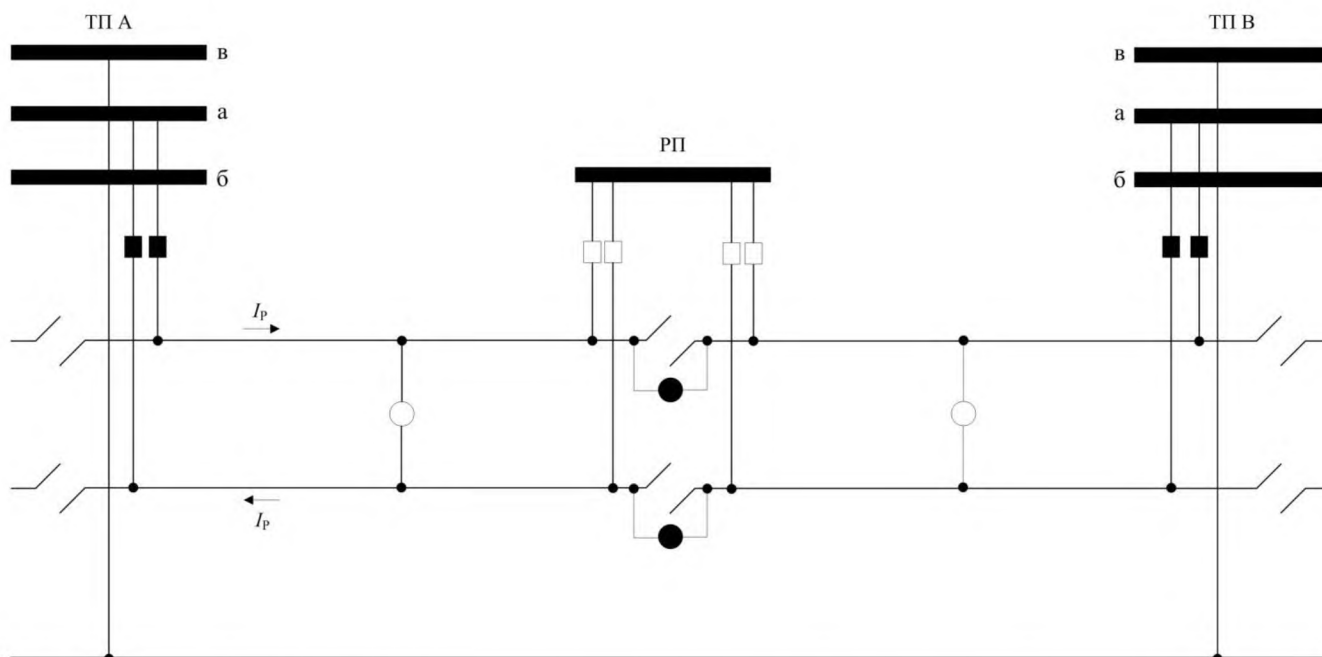


Рисунок 1.4 – Схема подключения контактных подвесок для плавки гололеда при электроснабжении через разные питающие фазы подстанций А и В

Электрические методы, схемы подключения и оборудование выбираются в зависимости от региональных климатических условий и необходимых токов нагрева. В регионах с частым и интенсивным образованием гололеда, например в некоторых районах Российской Федерации, при проектировании предусматривается дополнительный третий трансформатор, чтобы обеспечить достаточную тепловую мощность для профилактического подогрева. В связи с этим выбирается самый выгодный способ удаления гололеда в соответствии с расчетом допустимых токов (см. рисунки 1.1-1.4). Так как очень сложно регулировать силу тока при нагреве, ее не регулируют. Вместо этого при проектировании выполняется проверка того, может ли подстанция, в зависимости от длины и полного электрического сопротивления тяговой сети при выбранной схеме подключения, подавать в контактную сеть достаточный, но не слишком большой ток. В случае если установленный питающий ток слишком низкий или слишком высокий, то при нагреве участок питания следует укоротить или удлинить. Это достигается путем изменения схемы подключения или путем изменения расстояний между точками подачи питающего напряжения, если в распоряжении нет других вариантов.

У каждого вышеописанного метода удаления гололеда есть преимущества и недостатки. Вибрационные барабаны устраняют наледь только локально с непродолжительной эффективностью. Они могут повредить контактный провод. Химические методы действуют кратковременно и локально ограничены. При плавке гололеда существует опасность потери прочности проводов; при этом – низкий расход электроэнергии. При профилактическом подогреве контактной сети не существует опасность потери прочности проводов; но при этом – высокий расход электроэнергии.

Выбор метода устранения гололеда зависит от экономических соображений относительно частоты образования гололеда, условий эксплуатации и желаемой эксплуатационной готовности железнодорожной магистрали. В регионах с низкой вероятностью образования гололеда экономически выгоднее увеличить интервал движения между поездами в период обледенения, чем использовать устройства для удаления гололеда. Предполагается по возможности дополнительное движение одиночных электровозов, оборудованных токоприемниками для механического удаления гололеда с контактного провода, в том числе в ночное время. В случае, если предъявляются требования к предотвращению образования или удалению гололеда, то их следует учесть уже при проектировании и монтаже электрического оборудования, для того чтобы избежать высоких расходов на оснащение необходимым оборудованием позднее. Поэтому проблема удаления гололеда с проводов контактной сети является актуальной и требует проведения риска-анализа по выбору необходимого мероприятия по предотвращению гололедообразования на участках железнодорожных магистралей.

1.3 Анализ влияния многочисленных факторов на работоспособность контактной сети

Чтобы гарантировать стабильный и качественный токосъем на железнодорожных путях, необходимо учитывать факторы, которые можно подразделить на эксплуатационные, конструктивные и климатические (рисунок 1.5) [80, 81, 90].

Неисправности элементов контактной сети, вызванные воздействием внешних факторов, могут нарушить работу всей системы токосъема. Наледь, образующаяся на контактных проводах и несущем тросе из-за высокой влажности, часто появляется из-за воздействия ветра и низких температур. Увеличение погонной массы гололеда между токоприемником и контактным проводом приводит к искрению и образованию дуги. Под действием ветра горизонтальные отклонения проводов могут повредить как провода, так и токоприемники, что создает угрозу для безопасности движения поездов. Воздействие солнечной радиации также может увеличить стрелу провеса проводов, негативно влияя на работу системы токосъема [5].



Рисунок 1.5 – Характеры отказов, влияющие на показатели контактной сети

Среди конструктивных факторов важными являются: тип контактной подвески, натяжение несущего троса и контактного провода, геометрические параметры вертикальной и горизонтальной регулировки контактной подвески, а также конструкции сопряжений анкерных участков.

Факторы, связанные с эксплуатацией, влияют на надежность и качество работы системы токосъема, а также могут повысить эксплуатационные расходы и привести к повреждениям устройств контактной сети. Повышение токовых нагрузок может привести к перегреву проводов контактной сети, что может вызвать их повреждение или полное разрушение, а также серьезно повлиять на движение поездов. Ключевую роль играет частота и качество технического обслуживания, так как значения параметров могут изменяться быстро после каждого обслуживания [5].

1.4 Статистическая оценка отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования

Анализ отказов элементов системы токосъема играет очень важную роль в работе контактной сети. С целью получения данных об отказах ее элементов используется комплексная автоматизированная система учета, контроля, устранения отказов технических средств (КАСАНТ), которая внедрена во всех филиалах ОАО «РЖД». Для успешного развития ОАО «РЖД» подразделения электрификации и электроснабжения обязаны повышать надежность устройств контактной сети. Особое внимание уделяется элементам, которые из-за гололеда могут работать неэффективно [5].

Основные причины отказов в работе устройств контактной сети с указанием их доли представлены в таблице 1.1. Выделим основные причины, которые непо-

средственно связаны с возникновением метеоусловий на контактной сети (ежегодно наблюдается снижение количества отказов на 0,5-2 %).

Таблица 1.1 – Причины возникновения отказов устройств контактной сети

Основные причины	2019 г.	2020 г.	2021 г.	2022 г.
Эксплуатация, %	48,0	44,2	39,4	39,0
По вине монтажных организаций, %	18,9	27,8	30,9	29,9
Износ, %	12,4	13,1	12,8	12,4
По вине посторонних предметов, механизмов, %	6,4	4,2	5,7	7,8
Метеорологические условия, %	10,5	8,5	7,9	7,4
Прочие, %	3,8	2,2	3,3	3,5

На основании проведенного статического анализа отказов на контактной сети за 2022 год была построена диаграмма Парето по всем филиалам ОАО «РЖД» (рисунок 1.6) [1, 2, 3, 4].

Рассмотрим каждый отказ более детально [43]. Обрывы и пережоги контактной сети – 135 случаев (20 % от общего количества). Пережоги и, как следствие, обрывы контактных проводов происходят из-за плохого токосъема. Когда токоприемник отрывается от проводов, происходит образование электрической дуги и перегрев контактного провода – это приводит к рискам отказов участка контактной сети.

Проведение технического обслуживания позволяет уменьшить количество отказов контактного провода, но снижает уровень риска лишь частично.

В 2022 году произошло 88 случаев из-за неудовлетворительной регулировки контактной подвески (13 % от общего количества). Причиной такого состояния послужила неполная диагностика контактной подвески. Статические параметры контактной сети зависят от отсутствия новых методов совершенствования техни-

ческого обслуживания и неисправностей проводов, которые возникают при выполнении работ с поддерживающими конструкциями.

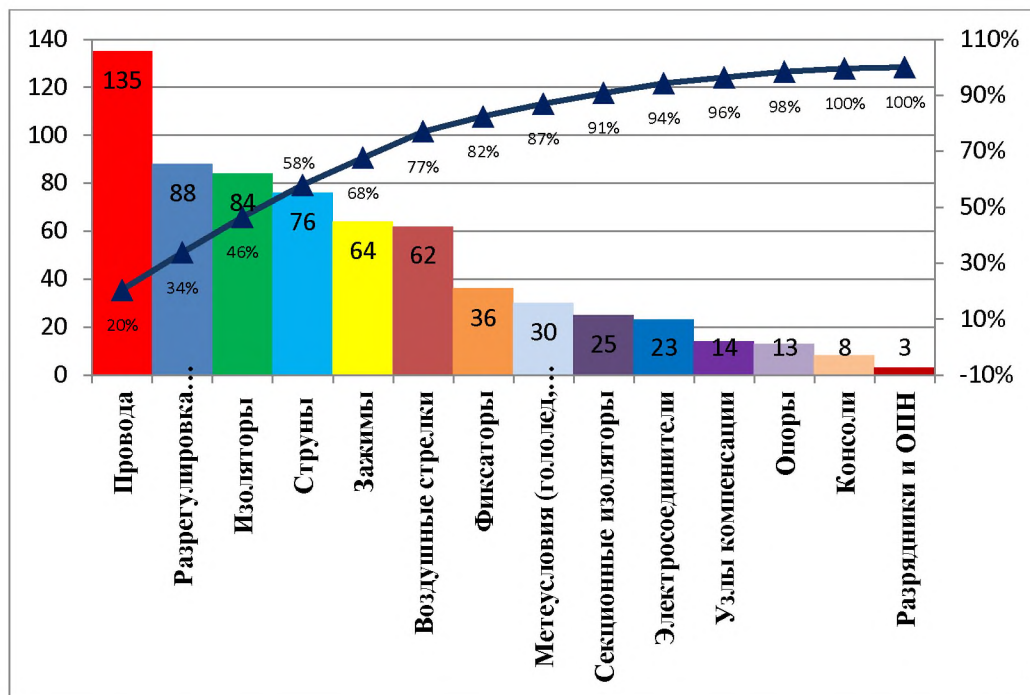


Рисунок 1.6 – Анализ отказов устройств контактной сети в 2022 году в виде диаграммы Парето

Перекрытие и повреждение изоляторов – 84 случая (13 % от общих случаев). Основной причиной повреждений является нарушение изоляционных свойств фарфоровых изоляторов. Для того чтобы повысить надежность контактной сети, необходимо проводить диагностику изоляторов на участке железнодорожных магистралей, что не всегда выполняется из-за сложности и трудоемкости при ручной диагностике процесса.

Обрывы струн – 76 случаев (11 % от общего количества), часто происходят в полукompенсированных контактных подвесках, применяемых в том числе на участках контактной сети переменного тока.

Разрушение зажимов – 64 случая (10 % от общего количества). На данный момент наиболее повреждаемыми зажимами являются КС-049 и КС-046. Неудачная установка в проектное положение конструкций является основной причиной разрушения зажимов, особенно в период гололедообразования.

Воздушные стрелки являются одними из важных узлов контактной подвески. В 2022 году произошло 62 отказа (9 % от общего количества). На воздушных стрелках не были установлены устройства, обеспечивающие одновременный подъем проводов. Это указывает на то, что установка таких устройств должна осуществляться на воздушных стрелках, где пересекаются как одиночные контактные провода, так и двойные.

Отказы устройств контактной сети из-за метеорологических условий (гололед+ветер, ветер максимальной интенсивности) – 30 случаев (5 % от общего числа). Несмотря на то что продолжительность обледенения устройств контактной сети в течение года невелика, серьезные последствия, которые могут возникнуть в результате гололедообразования, требуют тщательной подготовки к борьбе с ним.

Наибольшую угрозу гололед представляет в момент начала движения электроподвижного состава. Когда образуется наледь большой толщины, механическая нагрузка на контактный провод увеличивается, из-за этого возрастает стрела провеса для компенсированных контактных подвесок, что приводит к ухудшению качества токосъема.

В качестве примера повреждения токоприемника, характерного для контактной сети, можно привести случай отключения быстродействующего выключателя на фидере № 3 тяговой подстанции, произошедший в ноябре 2020 года и вызванный коротким замыканием. Повреждение токоприемника на локомотиве 2ВЛ-10 произошло из-за образования небольшого слоя гололеда на фиксаторе. При низких температурах дополнительный стержень у фиксатора оказался в горизонтальном положении, что повлекло за собой повреждение токоприемника и сильный провес контактного провода. В результате произошла задержка поездов на два часа.

При расчете воздушных линий электропередачи и их элементов должна учитываться толщина стенки гололеда. Определение расчетных условий по гололеду производится на основании соответствующих карт климатического районирования территории РФ с уточнением параметров увеличения или уменьшения температур по региональным картам и материалам многолетних наблюдений за размерами и видом гололедно-изморозевых отложений (рисунок 1.7) [39].



Рисунок 1.7 – Карта гололедного районирования

На основании карты климатического районирования было составлено доле-вое соотношение гололедных районов РФ и филиалов ОАО «РЖД» (таблица 1.2, рисунок 1.8). Это соотношение поможет в дальнейших разработках для исследо-вания отдельных участков железнодорожного пути [39].

Таблица 1.2 – Гололедные районы филиалов ОАО «РЖД»

Филиал (дорога)	Гололедные районы
Восточно-Сибирская	I
Горьковская	II
Дальневосточная	II
Забайкальская	III
Западно-Сибирская	III
Калининградская	III
Красноярская	I
Куйбышевская	III

Окончание таблицы 1.2

Московская	III
Октябрьская	I
Приволжская	III
Свердловская	II
Северная	I
Юго-Восточная	III
Южно-Уральская	III

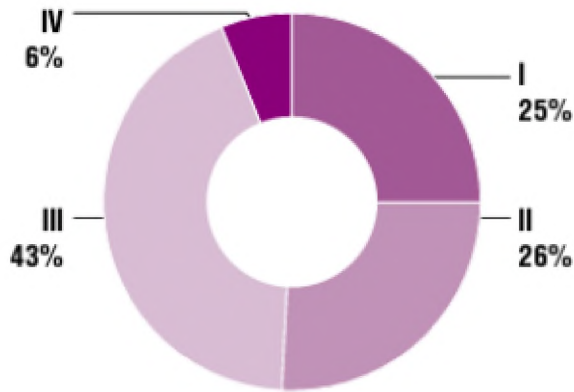


Рисунок 1.8 – Долевое соотношение гололедных районов филиалов ОАО «РЖД»

На рисунке 1.9 показаны причины отказов устройств КС на железных дорогах России, связанные с гололедообразованием, в виде схемы Исикавы [38].



Рисунок 1.9 – Причины отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования

На основании ежегодных аналитических отчетов подразделений электрификации и электроснабжения сотрудники научно-исследовательской лаборатории «Системы автоматизированного проектирования контактной сети» в рамках выполнения госбюджетной научно-исследовательской работы провели обзор технического состояния устройств КС с 2019 по 2022 г. Был построен график отказов устройств КС при условии гололедообразования. Из рисунка 1.10 видно, что с каждым годом число отказов уменьшается [5].

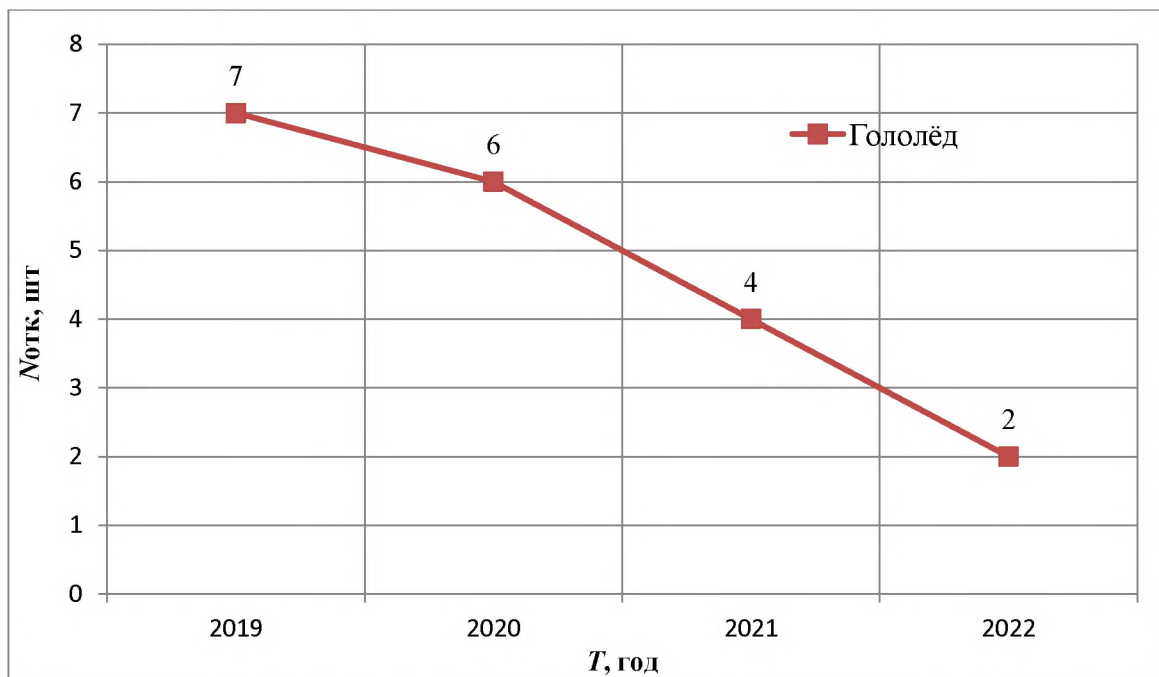


Рисунок 1.10 – Диаграмма количества отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования в период с 2019 по 2022 год

На рисунке 1.11 показано процентное соотношение отказов элементов КС по отношению ко всем нарушениям работы устройств в период с 2019 по 2022 г. Определено, что в среднем отказы устройств КС вследствие гололедообразования составляют 3 % в год от общего числа нарушений нормальной работы контактной сети. Больше половины этих отказов приходится на пережоги и обрывы контактных проводов, остальные отказы связаны с другими устройствами, которые подвергаются воздействию гололеда [1, 2, 3, 4].

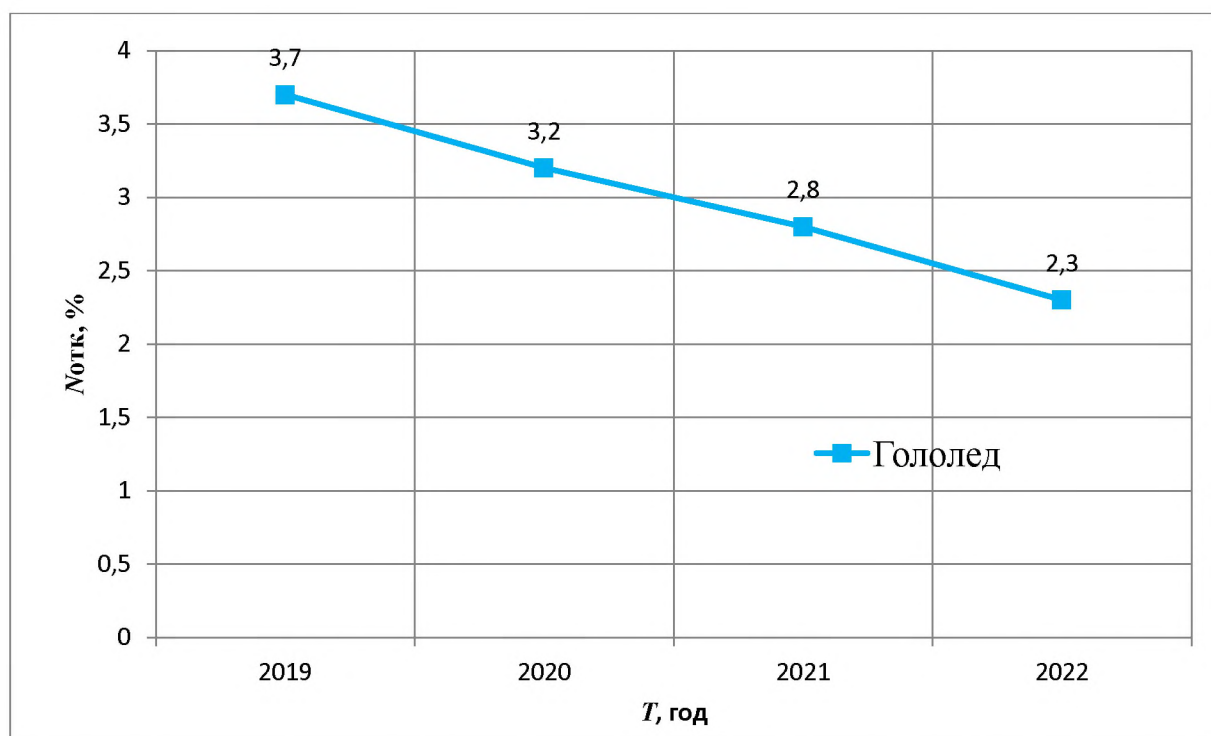


Рисунок 1.11 – Процентное соотношение отказов устройств контактно сети по причине гололедообразования с 2019 по 2022 год

В рамках стратегии обеспечения безопасности и надежности перевозочного процесса в ОАО «РЖД» предусмотрено принятие мер по предотвращению возможных нарушений в работе устройств контактной сети в условиях образования гололеда. Эти меры включают в себя переход к системе обеспечения безопасности движения, которая направлена на прогнозирование и предупреждение транспортных происшествий на ранних этапах [17, 18, 62, 114].

Функциональная стратегия управления рисками в ОАО «РЖД» направлена на повышение качества инфраструктурных объектов путем выявления и оценки потенциальных рисков зон, а также на предотвращение рисков гололедообразования путем систематического прогнозирования и оценки рисков [18, 65].

В соответствии с поставленными задачами предлагается провести риск-анализ и прогнозирование показателей качества состояния контактной сети при условии гололедообразования.

Проведем анализ диагностических нарушений и последствий нарушений с 2019 по 2022 г., который состоит из следующих параметров:

- количество задержанных поездов;
- время задержки поездов;
- длительность отказа.

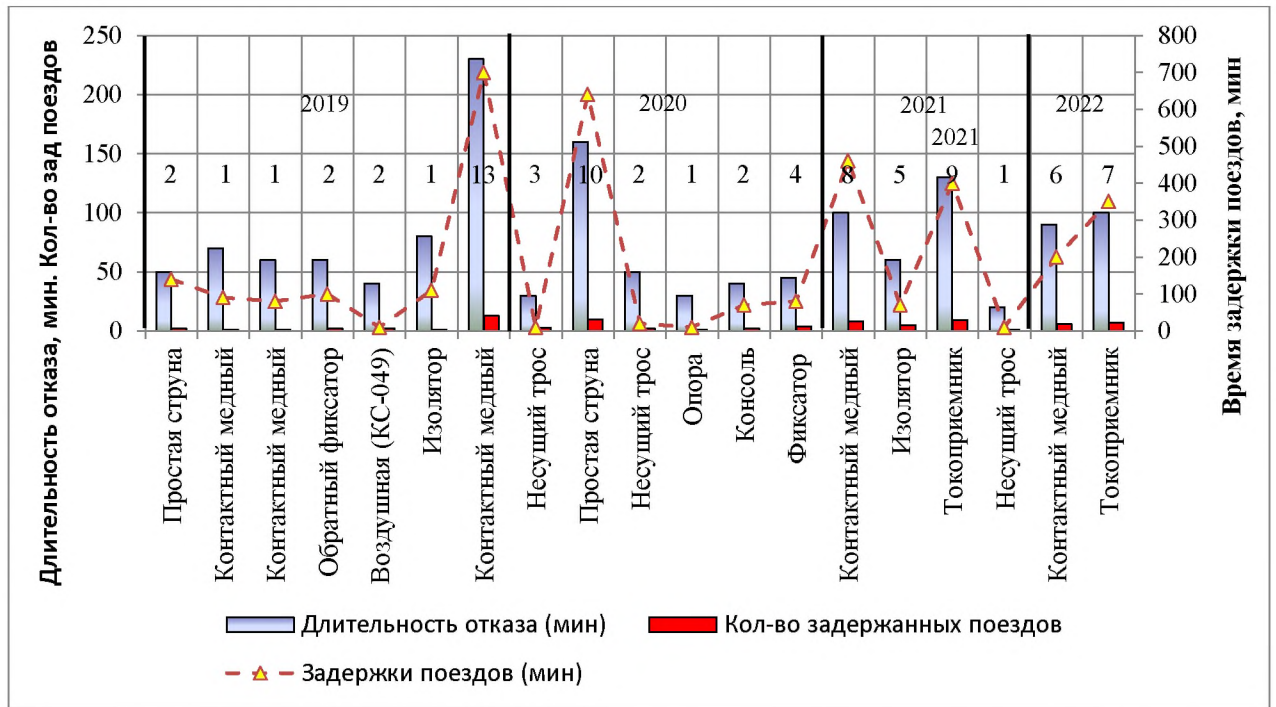


Рисунок 1.12 – Анализ диагностических испытаний и последствий нарушений устройств контактной сети вследствие образования гололеда

Далее были выявлены статистически значимые показатели состояния контактной сети, связанные с гололедообразованием. Определены значения таких показателей, как отказы устройств контактной сети из-за образования гололеда. На рисунке 1.13 представлена диаграмма Парето в виде расчета вероятности возникновения отказов по видам устройств контактной сети, подверженных гололедообразованию. За основу был принят *ABC*-анализ, который позволит оценить влияние устройства контактной сети на вероятность возникновения отказа вследствие образования гололеда и который представляет собой классификацию показателей по трем группам важности. К группе *A* относятся наименее значимые по важности элементы контактной сети, у которых вероятность образования гололеда составляет от 0 % до 12,5 % всего результата, группа *B* – значимые с вероятностью от

12,5 % до 20 % общего результата и группа *C* – наиболее значимые элементы с вероятностью от 20 % до 25 %. Исходя из диаграммы *ABC*-анализа, можно утверждать, что наибольшая вероятность отказов приходится на контактный провод [5].

Частота отказов различных устройств КС постоянно варьируется. Устройства, подверженные частым отказам, оказывают более существенное воздействие в контексте анализа неисправностей. Оценка последствий отказов в значительной степени зависит от этого аспекта. Различаются уровни ущерба от каждого отказа, поэтому устройства, отказы которых приводят к значительным потерям, должны оказывать более сильное воздействие на общие экономические показатели. Тем не менее этот фактор не всегда учитывается. Наиболее эффективным подходом будет учет двух ключевых факторов: вероятности возникновения отказа элементов контактной сети и продолжительности задержек поездов [5].

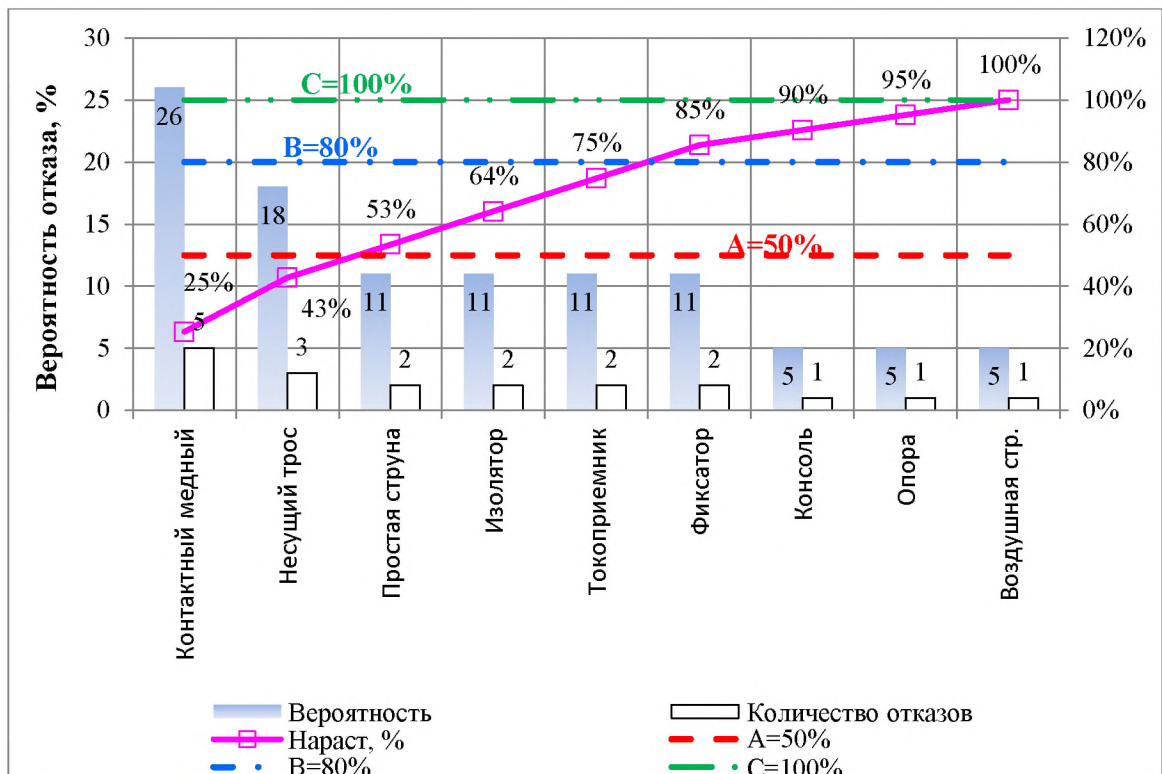


Рисунок 1.13 – Диаграмма вероятности отказов контактной сети по видам устройств по причине гололедообразования в виде диаграммы Парето

На рисунке 1.14 представлена графическая интерпретация рисков по отказам устройств контактной сети по причине гололедообразования. На левой оси представлены абсолютные значения рисков в финансовой трактовке, на правой – доли риска отказов в процентах. Данное ранжирование позволит сделать вывод о приоритетности обслуживания элементов контактной сети в зависимости от степени значимости финансовой составляющей рисков [5, 65].

На основании проведенного статистического анализа устройств контактной сети по причине гололедообразования становится возможным разработать структурную схему надежности контактной сети при токосъеме. Проведенный риск-анализ позволит разработать методику оценки рисков гололедообразования на контактной сети для определения финальной вероятности возникновения гололеда на участках магистрали [5].

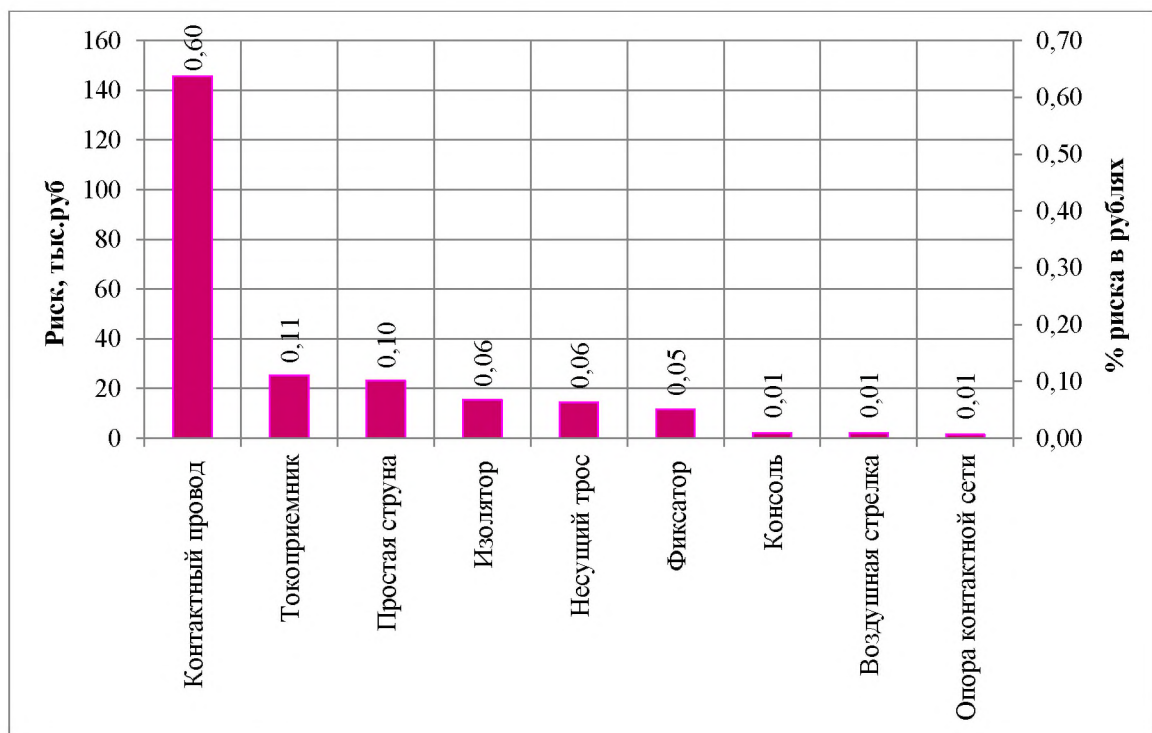


Рисунок 1.14 – Гистограмма рисков отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования

Выводы по первой главе

1. Проведен анализ способов удаления гололеда с проводов контактной сети, по которому можно сделать вывод, что каждый из применяемых методов имеет свои недостатки и не отвечает в полной мере требованиям удаления льда с контактных проводов. Изучены меры по предотвращению гололеда на участках железнодорожных магистралей, на которых требуется проведение риска-анализа по выбору необходимого мероприятия по предотвращению гололедообразования на участках железнодорожных магистралей.

2. Приведенная статистическая оценка отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования является основой разработки математической многофакторной модели по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования в виде марковского процесса. Такой анализ позволит:

- разработать структурную схему надежности устройств контактной сети при токосъеме, подвергающейся различным климатическим факторам, для которой будет выполнен расчет последовательно-параллельной структурной схемы надежности;

- уточнить требования к контактной подвеске на проектируемых участках скоростных и высокоскоростных магистралей;

- определить с высокой точностью финальную вероятность возникновения гололеда на участках контактной сети.

2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МНОГОФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ В ВИДЕ МАРКОВСКОГО ПРОЦЕССА ПО ОЦЕНКЕ РИСКА ОТКАЗОВ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ИЗ-ЗА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ

2.1 Оценка влияния стрел провеса контактного провода для обеспечения безопасности движения поездов на участке контактной сети

Отсутствие резерва в контактной сети, на которую оказывают воздействие внешние факторы (максимальные и минимальные температуры, гололедообразование и т. д.), приводит к необходимости выполнения множества требований, направленных на поддержание ее безаварийной работы. Одно из основных таких требований – обеспечение бесперебойного токосъема при различных климатических условиях (образование льда, сильный ветер и др.) [78, 80].

Стрела провеса, которая влияет на качество токосъема, проявляется не только при повышении температуры окружающей среды летом, но и при образовании гололеда на проводах контактной подвески зимой. В результате этого качество токосъема снижается, а износ контактных проводов растет [26, 29].

Чтобы снизить влияние температуры на увеличение стрел провеса, применяют специально разработанные компенсационные устройства, при которых значение натяжения сохраняется независимо от температуры окружающей среды. Однако проблема увеличения стрел провеса при образовании гололеда на проводах контактной подвески в настоящее время решена не в полном объеме.

Для оценки влияния стрел провеса контактных проводов на обеспечение безопасности движения поездов автором выполнен расчет на участке контактной сети «Е-Ч».

Трасса «Е-Ч» включает три выделенных климатических района: Па – «Е-С», Пб – «С-Сн», Пв – «Сн-Ч» (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 – Карта рельефов железнодорожной магистрали «Е-Ч»

При осаждении плотного гололеда большой толщины статическая нагрузка на контактные провода значительно возрастает, вследствие этого увеличиваются их стрелы провеса. Чтобы убедиться в правильности проведенного исследования, предлагается провести оценку влияния стрелы провеса несущего троса и контактного провода при гололеде на участке «Е-Ч» [78].

Результат расчетов монтажных таблиц и монтажных кривых представляет собой зависимость стрел провеса в пролете от расчетной толщины стенки гололеда. Расчет монтажных стрел провеса проводов выполнен для всех пролетов участков контактной сети.

В настоящее время на главных путях железных дорог широко применяются контактные подвески Бр-120+2МФ100+2А-185, М-95+2НЛФ-100+2А-185 и М-120+2МФ-100+2А-185 [21, 23]. Рассмотрев эти подвески, станет возможным определить, как стрела провеса влияет на безопасность движение поездов при различных видах подвески [40].

Нормативную толщину стенки гололеда плотностью $0,9 \text{ г/см}^3$ следует принимать в соответствии с картой районирования территории России по толщине стенки гололеда или по региональным картам районирования [39].

Для определения расчетных условий контактной сети и их элементов должна учитываться расчетная толщина стенки гололедообразования [22].

Расчетная толщина для участка контактной сети «Е-Ч» рассчитывается по следующему выражению:

$$b_r = b_n \cdot k_r, \quad (2.1)$$

где b_n – нормативная толщина стенки гололеда по гололедному району, м;

k_r – коэффициент, учитывающий диаметр провода, высоту его подвешивания и рекомендации по учету метеорологических станций.

Расчет стрелы провеса несущего троса для компенсированной контактной подвески осуществляется по формуле

$$F_r = \frac{W_r \cdot l^2}{8 \cdot Z_r}, \quad (2.2)$$

где W_r – приведенная нагрузка подвески при гололеде, Н/м;

l – длина пролета, м;

- F_{Γ} – стрела провеса несущего троса при гололеде, м;
 Z_{Γ} – приведенное натяжение подвески при гололеде, м.

Стрела провеса контактного провода при расчетной толщине стенки гололеда b_{Γ} в реальных пролетах рассчитывается по формуле

$$f_{xi} = \varphi_{xi} \cdot (F_{\Gamma} - F_{0i}), \quad (2.3)$$

- где f_{xi} – стрела провеса контактного провода;
 φ_{xi} – конструктивный коэффициент цепной подвески;
 F_{0i} – стрела провеса несущего троса при беспровесном положении провода.

По результатам расчетов построены зависимости $f_{xi}(t_x)$.

1. Результаты расчета для контактной подвески Бр-120+2МФ-100+2А-185 (гололедный район III, $b_{\Gamma} = 0,015$ м) приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты расчета стрел провеса контактного провода для компенсированной контактной подвески Бр-120+2МФ-100+2А-185

b_{Γ} , мм	$F_{\Gamma(65 \text{ м})}$, м	$f_{\Gamma(65 \text{ м})}$, м
0	0,71	0
11,25	0,84	0,13
15	0,90	0,18
18,75	0,98	0,27

Зависимости стрел провеса несущего троса Бр-120 и контактного провода МФ-100 для контактной подвески изображены на рисунках 2.2 и 2.3.

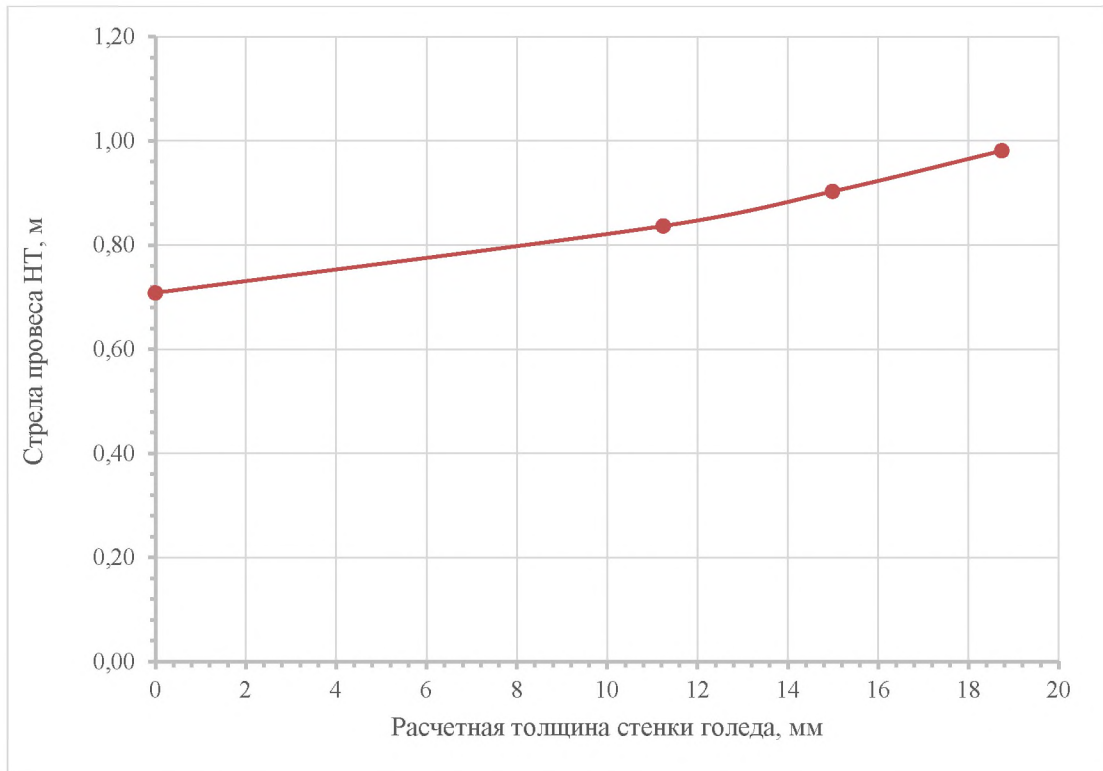


Рисунок 2.2 – Зависимость стрел провеса (F) несущего троса Бр-120 от расчетной толщины стенки гололеда при длине пролета 65 м

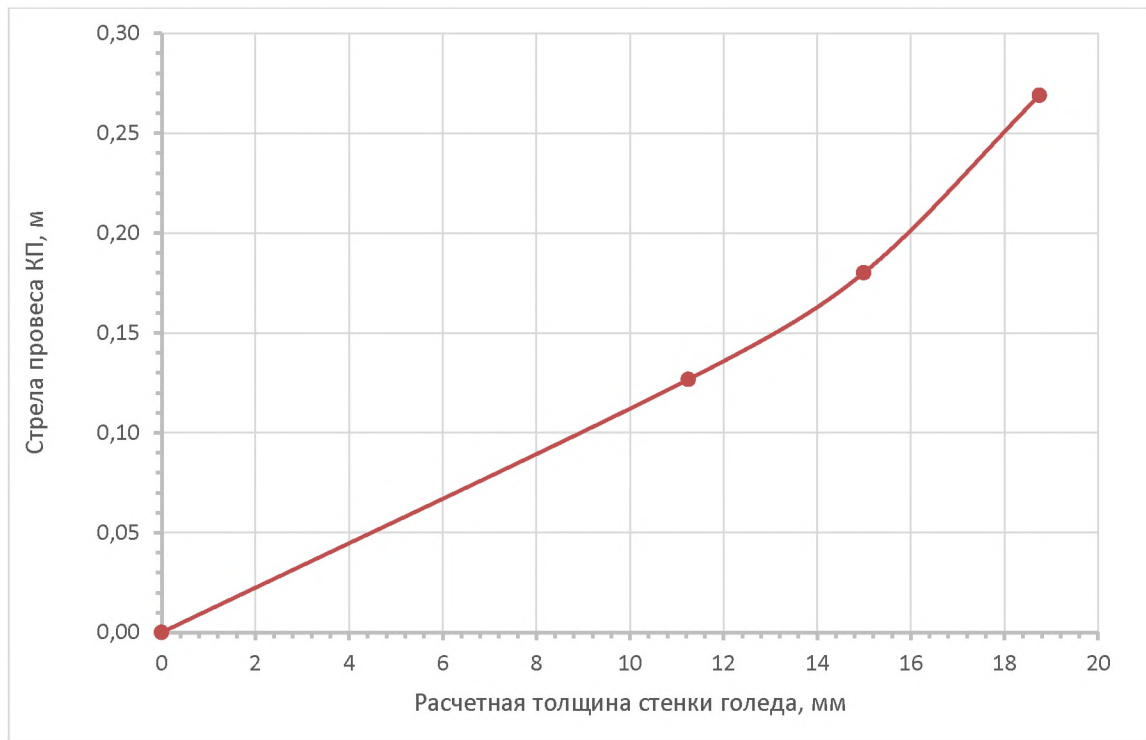


Рисунок 2.3 – Зависимость стрел (f) провеса контактного провода МФ-100 от расчетной толщины стенки гололеда при длине пролета 65 м

2. Результаты расчета для контактной подвески М-95+2НлФ-100+2А-185 (гололедный район III, $b_H = 0,015$ м) приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета стрел провеса контактного провода для компенсированной подвески М-95+2НлФ-100+2А-185

b_r , мм	$F_{Г(65 м)}$, М	$f_{р(65 м)}$, М
0	0,69	0
11,25	0,8	0,1
15	0,85	0,14
18,75	0,91	0,18

Зависимости стрел провеса несущего троса М-95 и контактного провода НлФ-100 для контактной подвески изображены на рисунках 2.4 и 2.5.

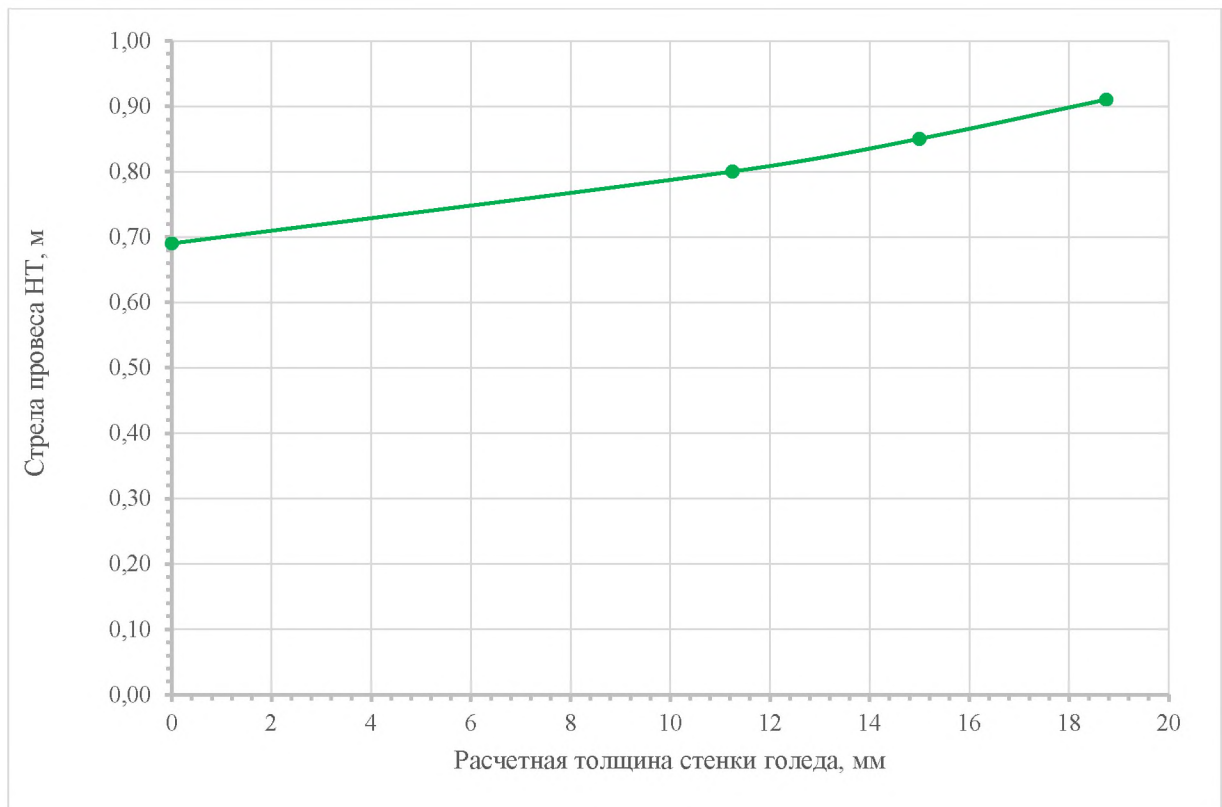


Рисунок 2.4 – Зависимость стрел провеса (F) несущего троса М-95 от расчетной толщины стенки гололеда при длине пролета 65 м

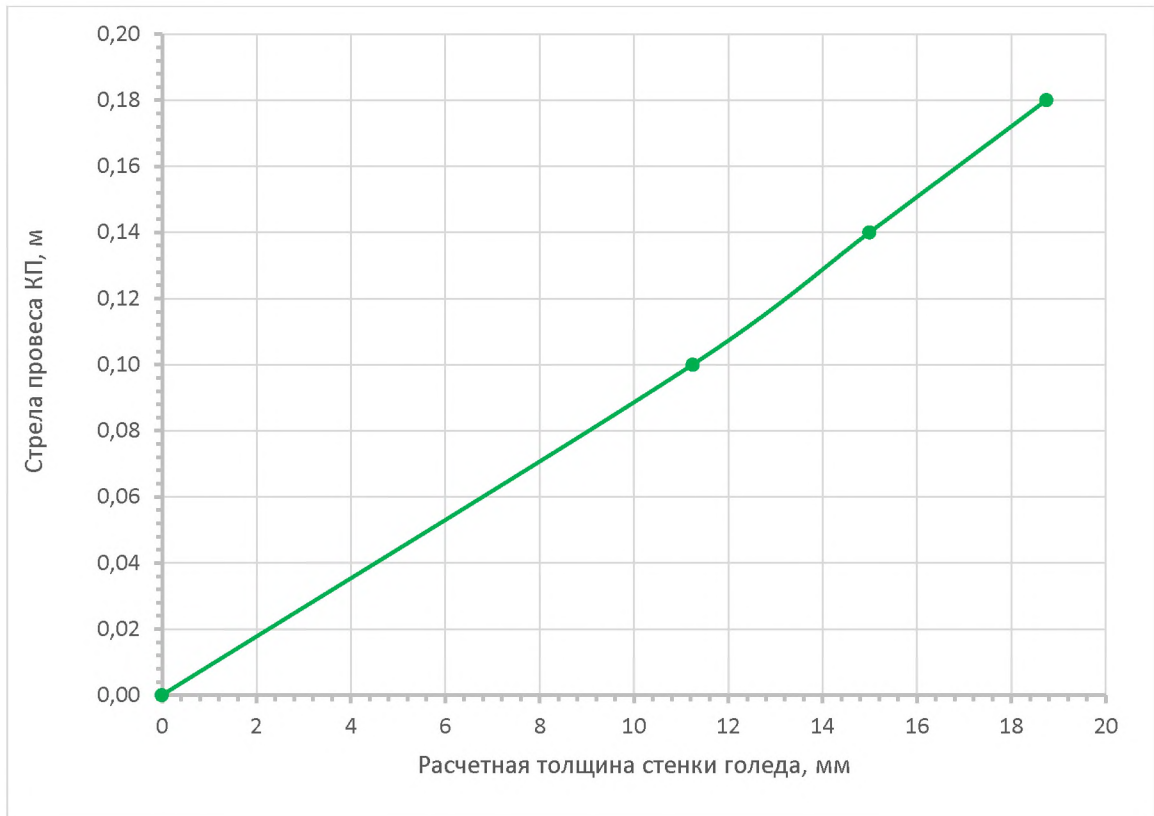


Рисунок 2.5 – Зависимость стрел (f) провеса контактного провода НлФ-100 от расчетной толщины стенки гололеда при длине пролета 65 м

3. Результаты расчета для контактной подвески М-120+2МФ-100+2А-185 (гололедный район III, $b_H = 0,015$ м) приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчета стрел провеса контактного провода для подвески М-120+2МФ-100+2А-185

b_{Γ} , мм	$F_{\Gamma(65 \text{ м})}$, М	$f_{\text{p}(65 \text{ м})}$, М
0	0,73	0
11,25	0,82	0,11
15	0,87	0,16
18,75	0,95	0,23

Зависимости стрел провеса несущего троса М-120 и контактного провода МФ-100 для контактной подвески изображены на рисунках 2.6 и 2.7.

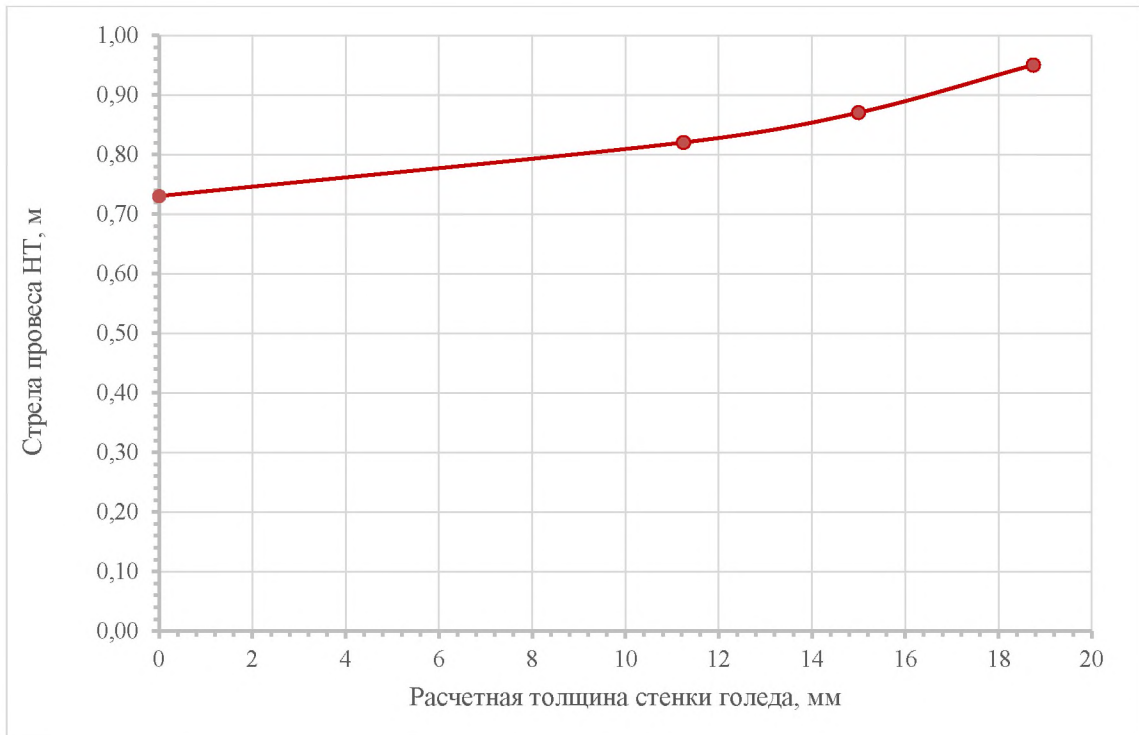


Рисунок 2.6 – Зависимость стрел провеса (F) несущего троса М-120 от расчетной толщины стенки гололеда при длине пролета 65 м

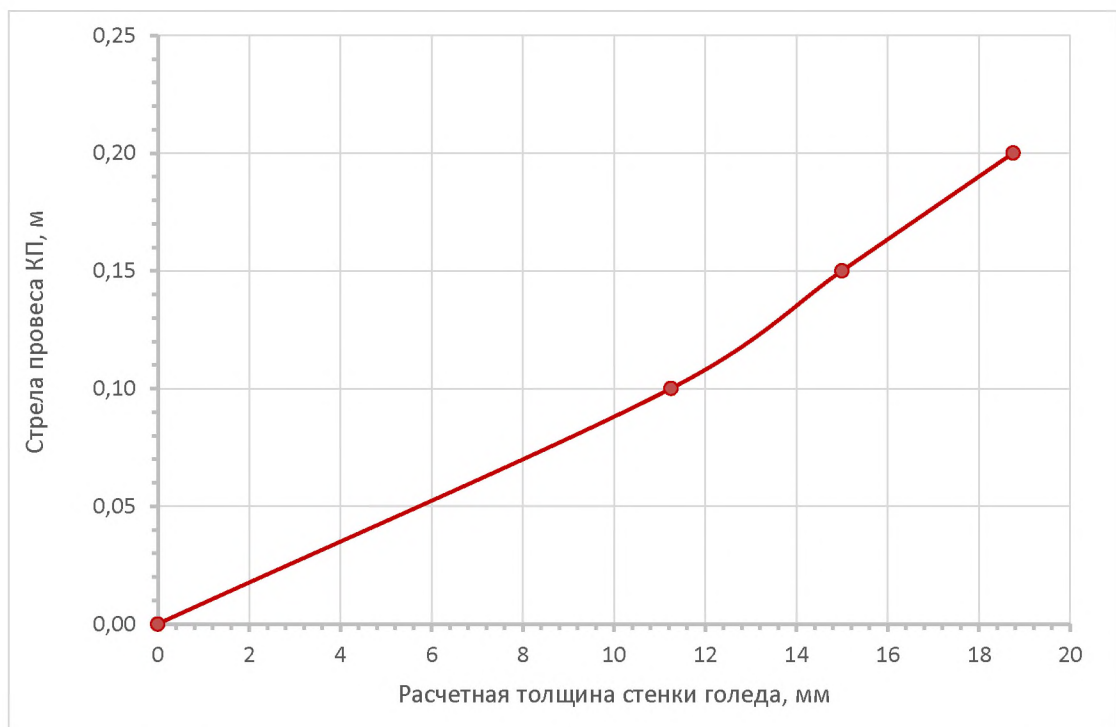


Рисунок 2.7 – Зависимость стрел (f) провеса контактного провода МФ-100 от расчетной толщины стенки гололеда при длине пролета 65 м

Из полученных графиков зависимости стрел провеса от расчетной толщины стенки гололеда следует, что наименьшими стрелами провеса несущего троса и контактного провода при максимальной толщине стенки гололеда $b_r = 18,75$ мм обладает контактная подвеска М95-2НЛФ100 на участке трассы «Е-Ч» с гололедным районом III ($F_r = 0,91$ м; $f_{xi} = 0,18$ м), что дает возможность применить данную подвеску для обеспечения безопасности движения поездов.

Данное исследование поможет правильно составить карту рисков отказов контактной сети на выбранных участках из-за гололедообразования, даст возможность оценить необходимость модернизации инфраструктуры и более точно обосновать экономические затраты на проект.

2.2 Установление критериев (сочетание факторов), способствующих возникновению аварий на контактной сети

В ситуациях гололедообразования факторы, ведущие к возможным авариям на участках контактной сети, подразделяются на две основные категории: климатические и эксплуатационные [20].

К климатическим факторам относятся:

- районирование дистанций по гололеду/ветру/температуре;
- относительная влажность воздуха;
- количество выпавших осадков;
- расчетная толщина стенки гололеда;
- среднее количество дней с гололедообразованием.

Информация о климатических условиях дирекций по энергообеспечению дополняется данными, полученными с использованием карт районирования по климатическим характеристикам [110]. При выборе параметров окружающей сре-

ды учитываются данные метеостанций по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Однако не все климатические факторы оказывают влияние на образование льда на устройствах контактной сети. Анализ данных показывает, что не все метеостанции, расположенные в границах железнодорожных вокзалов, предоставляют информацию по всем вышеуказанным параметрам, связанным с образованием гололеда. В таких случаях целесообразно определить среднее количество дней, в которые происходит образование гололеда, с применением математического моделирования.

К эксплуатационным факторам для определения вероятности возникновения гололеда относятся:

- длина электрифицированного участка железнодорожной магистрали, оборудованного средствами плавки гололеда;
- количество путей;
- анкерный участок;
- количество устройств для механического удаления гололеда с проводов контактной сети.

Информация о наличии эксплуатационных факторов на дистанции электропитания уточняется в виде формы статической отчетности АГО-9. Для подготовки и реализации мероприятий для предотвращения гололедообразования используется «Справка о наличии средств борьбы с гололедом и объезда контактной сети с повышенным нажатием токоприемника».

Климатические и эксплуатационные факторы, как правило, дублируют друг друга. Для их сокращения проводится полный корреляционный анализ. Для дальнейших расчетов берутся факторы, которые имеют низкий уровень корреляции. При оценке взаимосвязи факторов использовался коэффициент Пирсона [8, 13], с помощью которого сократилось количество климатических и эксплуатационных факторов для исследования автора.

Для правильной оптимизации факторов используем сеть Байеса [87, 105]. Ее простота заключается в том, что она наглядно показывает влияние факторов на

систему токосъема. Результатом будет вероятность возникновения отказа отдельных элементов контактной сети при условии гололедообразования.

Итак, сеть Байеса представляется собой графическую структуру и задается парой (A, B) , где $\langle A \rangle$ – вершины графа; $\langle B \rangle$ – ребра графа. Форма факторизации определяется марковским свойством байесовской сети:

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \prod x_j). \quad (2.4)$$

Для построения сети Байеса используем статистику об отказах устройств токосъема из-за гололедообразования. Результат моделирования байесовской сети показал, что не все факторы оказывают какое-нибудь влияние на возникновение отказов устройств контактной сети вследствие образования гололеда. С учетом принятого предположения о независимости воздействующих друг на друга факторов будет полезно использовать теорему Байеса, которая утверждает следующее отношение [92, 108]:

$$P(y | x_n) = \frac{P(y)P(x_1, \dots, x_n | y)}{P(x_1, \dots, x_n)}. \quad (2.5)$$

Используя предположение об условной независимости:

$$P(y | x_n) = P(x_i | y, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n), \quad (2.6)$$

для всех i это отношение можно упростить:

$$P(y | x_1, \dots, x_n) = \frac{P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i | y)}{P(x_1, \dots, x_n)}. \quad (2.7)$$

В формуле 2.7 $P(y|x_1, \dots, x_n)$ является константой, поэтому, с учетом некоторых входных данных, используем правило классификации:

$$\begin{aligned}
 P(y | x_1, \dots, x_n)^\infty &= \\
 &= P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i | y) \rightarrow y = \arg \max P(y) \prod_{i=1}^n P(x_i | y) \quad (2.8)
 \end{aligned}$$

Было проведено исследование (рисунок 2.8), по результатам которого выявлены значимые факторы, влияющие на вероятность возникновения отказов устройств на контактной сети при условии гололедообразования:

- 1) гололедный район дистанции электроснабжения;
- 2) ветровой район дистанции электроснабжения;
- 3) температурный район дистанции электроснабжения;
- 4) среднее количество дней с образованием гололеда;
- 5) влажность воздуха;
- 6) количество устройств механического способа удаления гололеда;
- 7) процентное соотношение длины участков контактной сети, оборудованных средствами очистки гололедообразования.

Для факторов были рассчитаны математические ожидания, которые позволят нам оценить влияние фактора на вероятность появления отказа. В таблице 2.4 факторы с существенным влиянием показаны серым цветом.

Таблица 2.4 – Математическое ожидание факторов по степени их влияния на вероятность появления отказа

Наименование фактора	Мат. ожидание
Гололедный район дистанции электроснабжения	2,49
Ветровой район дистанции электроснабжения	1,21
Температурный район дистанции электроснабжения	2,51
Среднее количество дней с образованием гололеда	2,14
Влажность воздуха	3,74
Количество устройств механического способа удаления гололеда	2,41
Процентное соотношение длины участков контактной сети, оборудованных средствами очистки гололедообразования	1,42

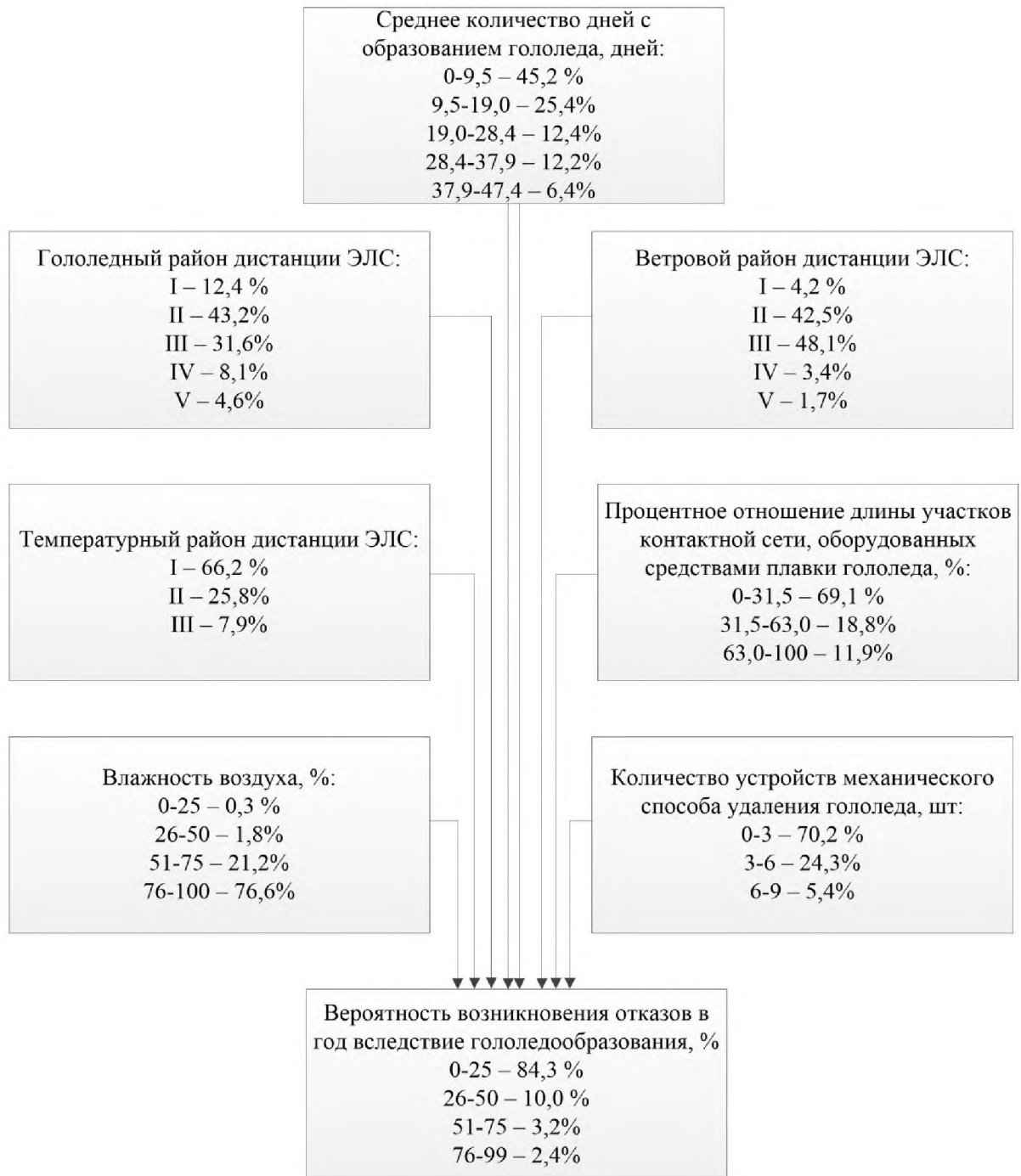


Рисунок 2.8 – Структура сети Байеса для определения вероятности отказов устройств контактной сети

По результатам таблицы 2.4 можно сделать следующие вывод; чем меньше математическое ожидание рассматриваемого фактора, тем больше влияние, оказываемое на вероятность появления отказа по причине гололедообразования. Из всех вышесказанных выделим следующие факторы:

– гололедный район дистанции электроснабжения;

- температурный район дистанции электроснабжения;
- среднее количество дней с образованием гололеда;
- влажность воздуха;
- количество устройств механического способа удаления гололеда;
- процентное соотношение длины участков контактной сети, оборудованных средствами очистки гололедообразования.

2.3 Математическая многофакторная модель в виде марковского процесса по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования

За надежную работу любой технической системы отвечают все этапы ее жизненного цикла. Возьмем за пример такой элемент тягового электроснабжения, как контактная сеть, на которую воздействуют токовые (тяговые), механические и климатические нагрузки. Контактная сеть должна обеспечивать бесперебойную эксплуатацию всех своих устройств, состоящих из последовательно и параллельно соединенных элементов, которые в процессе эксплуатации подвергаются старению, разрегулировкам и отказам. Элементы контактной сети, соединенные между собой последовательно, приводят к отказу всей системы при отказе одного из них [18, 26, 41].

Устройства контактной сети подвержены гололеду. Образование гололеда на устройствах контактной сети влияет на отказ системы. Обрыв струн может привести к повреждению токоприемника и т. д. Обеспечение работоспособности и надежного взаимодействия устройств контактной сети между собой при образовании гололеда является одной из главных проблем в отрасли железнодорожного транспорта [41, 54].

Рассмотрим виды состояния контактной сети и влияние ее надежности на работоспособность железнодорожной транспортной инфраструктуры с учетом гололедообразования (рисунок 2.9).

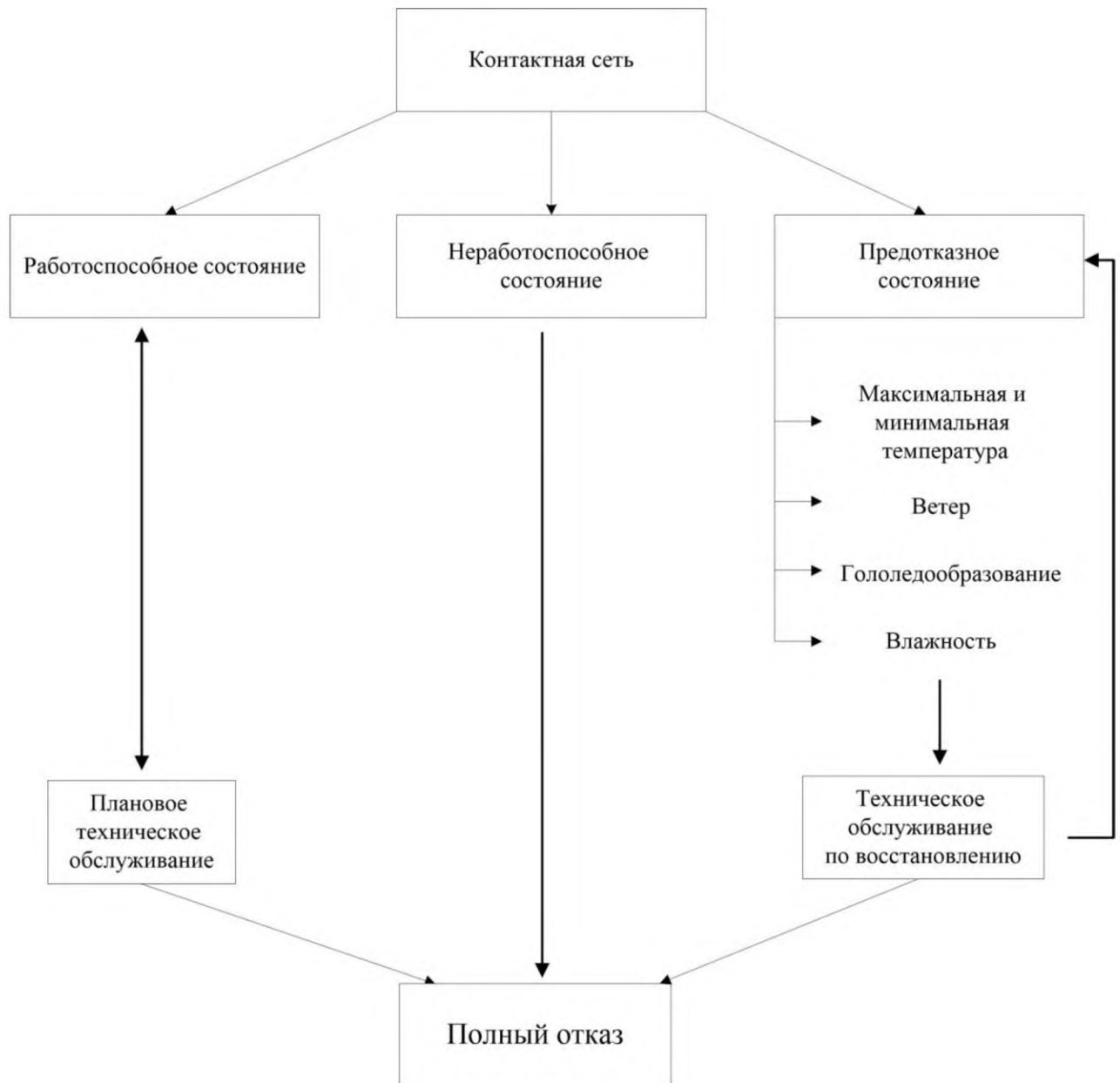


Рисунок 2.9 – Виды состояния контактной сети

Для возможности последующего применения устройств контактной сети можно выделить три вида состояний: работоспособное, предотказное и неработоспособное состояние [41, 85, 86].

Работоспособным называется такое состояние контактной сети, при котором значения всех параметров, характеризующих ее способность выполнять все заданные функции, соответствует требованиям нормативной документацией, а именно:

- 1) равномерная эластичность контактной подвески и постоянная масса ее по длине пролета, отсутствие резких изменений уклонов контактного провода в вертикальной плоскости и сосредоточенных масс на контактном проводе;
- 2) постоянное контактное нажатие при движении токоприемника;
- 3) допустимая стрела провеса контактного провода и несущего троса в середине пролета [40].

Для того чтобы поддерживать работоспособность и исправность всех элементов контактной сети при их эксплуатации, необходимо проводить своевременное техническое обслуживание. В ходе осмотра контактной сети оценивается состояние устройств с устранением повреждений при их обнаружении, а при проследовании электроподвижного состава во время обходов визуально оценивается качество токосъема.

Неработоспособным состоянием контактной сети называется такое состояние, при котором она не может выполнить хотя бы одну из требуемых функций, которые в нее заложены.

Предотказным состоянием называется состояние контактной сети, характеризующееся повышенным риском его отказа. Существует несколько климатических важных факторов, которые вызывают предотказное состояние контактной сети:

- 1) минимальная и максимальная температура окружающей среды;
- 2) гололедообразование;
- 3) атмосферное давление;
- 4) относительная влажность воздуха;
- 5) количество выпавших осадков.

Ликвидация отказа, вызванного процессом перевода контактной сети из частичного работоспособного состояния в работоспособное, производится путем технического обслуживания по восстановлению.

Существует такое предельное состояние контактной сети, когда ее дальнейшая эксплуатация недопустима, либо техническое обслуживание, восстановление работоспособного состояния и ремонт контактной сети также нецелесообразны. Переход в такое состояние приводит к полному отказу всей системы (отклонение параметров от норм, при котором использование данной системы невозможно) [41, 96].

Для оценки надежности работы системы используется участок железнодорожной магистрали между станциями «Е и Ч». Данный участок, как сложная система, функционирует дискретно в пространстве состояний и непрерывно во времени. Назначение такой системы заключается в том, чтобы обеспечить работоспособное состояние контактной сети при образовании гололеда на устройствах. Время между отказами отдельных элементов и время их работоспособности являются случайными величинами. С помощью метода «псевдосостояний» имеющий место в этом случае немарковский процесс сводится к марковскому, то есть когда будущее поведение системы зависит от настоящего и не зависит от предыстории процесса при введении следующих допущений [16, 41]:

1) потоки отказов и восстановлений элементов контактной сети ординарны, то есть в каждый момент времени может отказывать и восстанавливаться не более одного объекта [41];

2) функционирование устройств контактной сети является *случайным* процессом, то есть интенсивность появления отказа элемента контактной сети зависит от времени и представляет собой значение, равное среднему числу событий, наступивших в единицу времени [41].

На рисунке 2.10 представлен предполагаемый граф состояний и переходов контактной сети при условии гололедообразования для участков железнодорожной магистрали.

Система может находиться:

- в работоспособном состоянии (0);
- работать с пониженной эффективностью из-за предотказного состояния (неисправности) одного из элементов;

– в неработоспособном состоянии из-за полного отказа одного из элементов контактной сети [41].

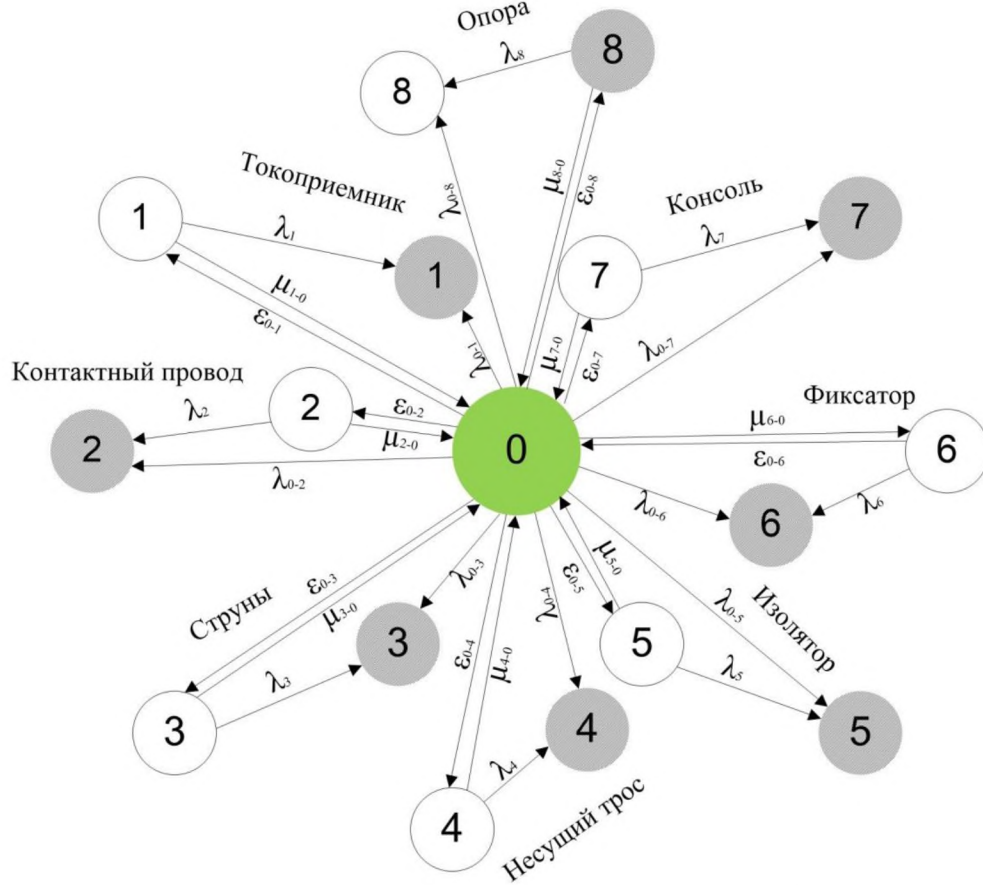


Рисунок 2.10 – Граф состояний и переходов контактной сети в состояние отказа при наличии гололедообразования для участков железнодорожной магистрали

Переход из одного состояния в другое характеризуется отказом или восстановлением только одного устройства контактной сети. Каждый элемент характеризуется средним временем между его отказами T_{oi} и интенсивностью отказов λ_{ij} ; средним временем восстановления T_{vi} и интенсивностью восстановления μ_{ji} , где i – состояние элемента перед отказом (после восстановления); j – состояние элемента после отказа. Исходя из решения этой системы и знания средних значений времени между отказами элементов контактной сети и времени их восстановления, могут быть рассчитаны основные показатели надежности [41, 120]:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{T_{\text{ПО}i}}, \quad (2.9)$$

где ε_{ij} – интенсивность предотказов;

$$\mu_{ij} = \frac{1}{T_{\text{В}i}}, \quad (2.10)$$

где μ_{ij} – интенсивность восстановлений.

Исходя из решения системы и знания средних значений между отказами устройств контактной сети и временем их восстановления, могут быть рассчитаны вероятности безотказной работы, при которых будет функционировать участок контактной сети со снижением эффективности или полностью прекратится движение поездов [41].

Для расчета надежности любых систем, с целью определения наиболее эффективных режимов эксплуатации, стратегий технического обслуживания и ремонтов, необходимо правильно составить структурную схему надежности – наглядное представление условий, при которых работает или не работает исследуемая система [41, 81].

На рисунке 2.11 представлен вариант последовательной структуры в виде работы элементов контактной сети при токосъеме, подвергающейся различным климатическим факторам, на основе которой будет выполнен расчет схемы надежности с восстановлением.

Рассмотрим работу устройств контактной сети. Система состоит из восьми объектов. С точки зрения надежности все элементы контактной сети имеют последовательную структуру, то есть последовательно соединяются элементы контактной сети, повреждение каждого из которых приводит к повреждению системы, а восстановление любого из этих элементов – к работоспособности объекта.

Предотказное и работоспособное состояние системы наступает тогда, когда произойдет частичный отказ или восстановление опоры контактной сети (8), консоли (7), фиксатора (6), изолятора (5), несущего троса (4), струны (3), контактного провода (2) и токоприемника (1).

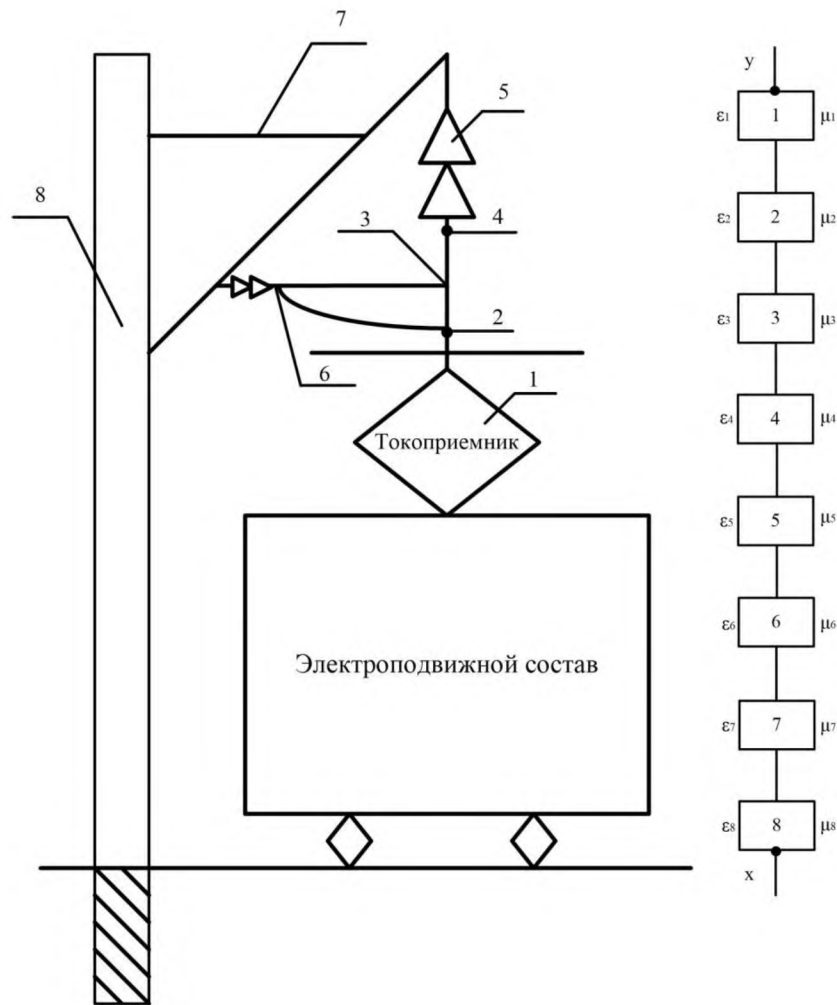


Рисунок 2.11 – Последовательная структурная схема надежности с восстановлением контактной сети при токосъеме

На основании структурной схемы надежности была разработана математическая многофакторная модель в виде марковского процесса по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования, которая позволит повлиять на повышение надежности мероприятия по предупреждению гололедообразования (рисунок 2.12).

В этом случае граф состояний и переходов контактной сети в состояние отказа по причине гололедообразования при последовательном соединении элементов с восстановлением будет иметь простой ветвящийся вид. При построении такого простого графа пользуемся несколькими правилами [41, 70]:

- построение начинаем с состояния, в котором вся контактная сеть работоспособна;
- каждое последующее состояние получается из работоспособного при повреждении одного из элементов контактной сети при условии гололедообразования.

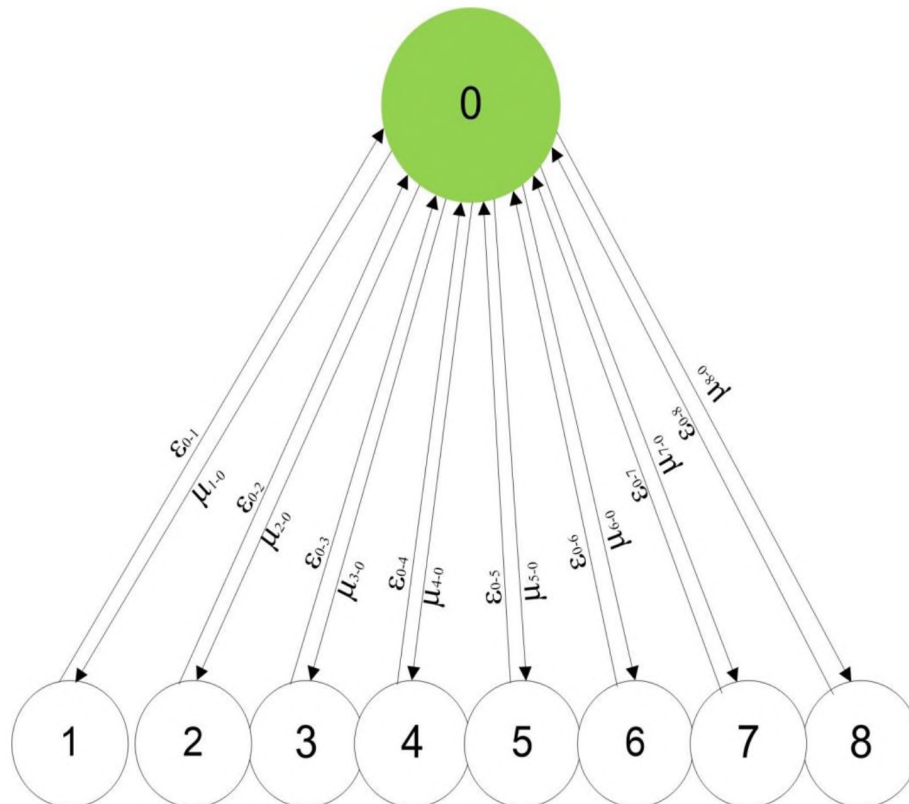


Рисунок 2.12 – Итоговый граф состояний по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования

С помощью математической многофакторной модели для соединенных между собой устройств контактной сети становится возможным:

– определить вероятность безотказной работы всей системы, вероятности предотказного состояния устройств контактной сети и построить график функции надежности за определенный период времени;

– по полученному графику определить финальную вероятность отказа контактной сети из-за гололедообразования на участках железнодорожных магистралей, тем самым уточнить предлагаемый расчет;

– оценить риск появления гололеда на участке контактной сети, где требуется планирование мероприятий по предупреждению гололедообразования.

Для верификации модели необходимо провести дополнительные исследования с целью определения факта возникновения неблагоприятных условий на участке контактной сети, которые могут привести к образованию гололеда.

При расчете надежности математической модели с восстановлением необходимо учитывать некоторые особенности системы.

После включения питания контактная сеть должна безотказно работать заданное время, перерывы в работе недопустимы. Для системы с восстановлением рассчитывается вероятность непрерывной безотказной работы (условная вероятность безотказной работы).

Возможность обратного перехода предполагается только из предотказного состояния в работоспособное. Поглощающее состояние в математической многофакторной модели не рассматривается [81].

Решить предлагаемый граф состояний возможно с помощью системы уравнений Колмогорова, которая включает в себя нахождение вероятностей в работоспособном состоянии контактной сети и предотказного состояния ее устройств, подвергшихся гололедообразованию.

Для решения такой системы нужно добавить еще одно уравнение, которое определяет нормировочное условие, поскольку сумма вероятностей всех состояний системы равна единице:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) = 1. \quad (2.11)$$

Составим такую систему по следующим правилам: слева от знака равенства производная от вероятности:

$$P_i(t) = \frac{dP_i(t)}{dt}, \quad (2.12)$$

Справа в уравнении стоит сумма произведений вероятностей всех переходов, входящих (входящие стрелки) в состояние системы на интенсивности состояния, умноженная на суммарную интенсивность переходов, выводящих из данного состояния систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = (-\varepsilon_{01} - \varepsilon_{02} - \varepsilon_{03} - \varepsilon_{04} - \varepsilon_{05} - \varepsilon_{06} - \varepsilon_{07} - \varepsilon_{08})P_0(t) + \\ + \mu_{10}P_1(t) + \mu_{20}P_2(t) + \mu_{30}P_3(t) + \mu_{40}P_4(t) + \mu_{50}P_5(t) + \mu_{60}P_6(t) + \mu_{70}P_7(t) + \mu_{80}P_8(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \varepsilon_{01}P_0(t) - \mu_{01}P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \varepsilon_{02}P_0(t) - \mu_{20}P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \varepsilon_{03}P_0(t) - \mu_{30}P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \varepsilon_{04}P_0(t) - \mu_{40}P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \varepsilon_{05}P_0(t) - \mu_{50}P_5(t); \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \varepsilon_{06}P_0(t) - \mu_{60}P_6(t); \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \varepsilon_{07}P_0(t) - \mu_{70}P_7(t); \\ \frac{dP_8(t)}{dt} = \varepsilon_{08}P_0(t) - \mu_{80}P_8(t); \end{array} \right.$$

Начальные условия решения системы:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= 1; \\ P_1(0) &= P_2(0) = \dots = P_8(0) = 0. \end{aligned}$$

В установившемся режиме эксплуатации $t \rightarrow \infty$. Чтобы найти финальные вероятности состояний, в уравнениях Колмогорова отбросим первое уравнение и найдем P_0 из последнего уравнения. Данная система принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_{01}P_0(t) - \mu_{01}P_1(t) = 0; \\ \varepsilon_{02}P_0(t) - \mu_{20}P_2(t) = 0; \\ \varepsilon_{03}P_0(t) - \mu_{30}P_3(t) = 0; \\ \varepsilon_{04}P_0(t) - \mu_{40}P_4(t) = 0; \\ \varepsilon_{05}P_0(t) - \mu_{50}P_5(t) = 0; \\ \varepsilon_{06}P_0(t) - \mu_{60}P_6(t) = 0; \\ \varepsilon_{07}P_0(t) - \mu_{70}P_7(t) = 0; \\ \varepsilon_{08}P_0(t) - \mu_{80}P_8(t) = 0. \end{cases}$$

Решение системы дифференциальных уравнений рассмотрим в программном обеспечении *MATLAB* и *MATLAB Simulink*.

Для исследуемого участка «Е-Ч» по известным значениям интенсивности отказов и восстановлений были рассчитаны вероятность безотказной работы системы, вероятности предотказного состояния устройств контактной сети и построен график функции надежности за 4 года наблюдения.

График функции надежности $P(t)$ наиболее точно показывает специфические черты закона распределения. Обычно вначале строят эту функцию, чтобы по ее форме можно было сделать предположение о виде закона распределения.

При построении графика функции надежности на оси абсцисс откладывается интервал наблюдения, а на оси ординат – вероятность безотказной работы.

Решение данной системы дифференциального уравнения приведено на рисунке 2.13.

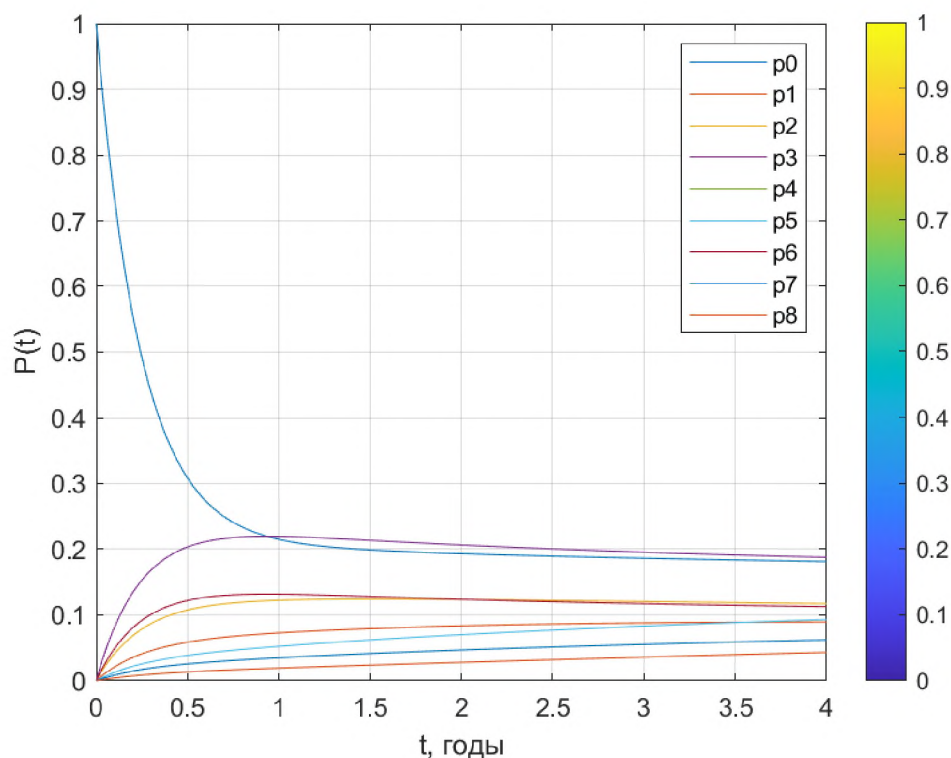


Рисунок 2.13 – Решение системы уравнений по определению вероятности отказа с помощью *MATLAB Simulink*

На графике показано изменение надежности, рассчитанное с помощью математической модели. По графику за 4 года наблюдения вероятность безотказной работы системы $P_0(t) = 0,183$. Можно определить финальную вероятность отказа из-за гололедообразования на всей железнодорожной магистрали «Е-Ч» $\pi_T = 0,817$. По полученным результатам такого расчета следует, что для исключения их отказа необходимо правильно спланировать сроки, время и тип мероприятий по предупреждению гололедообразования.

Чтобы проверить полученные результаты графика функции надежности, проведен расчет математической модели с помощью визуального графического моделирования сложных технических систем *MATLAB Simulink*, где система дифференциального уравнения может быть записана в виде функциональных блоков (рисунок 2.14).

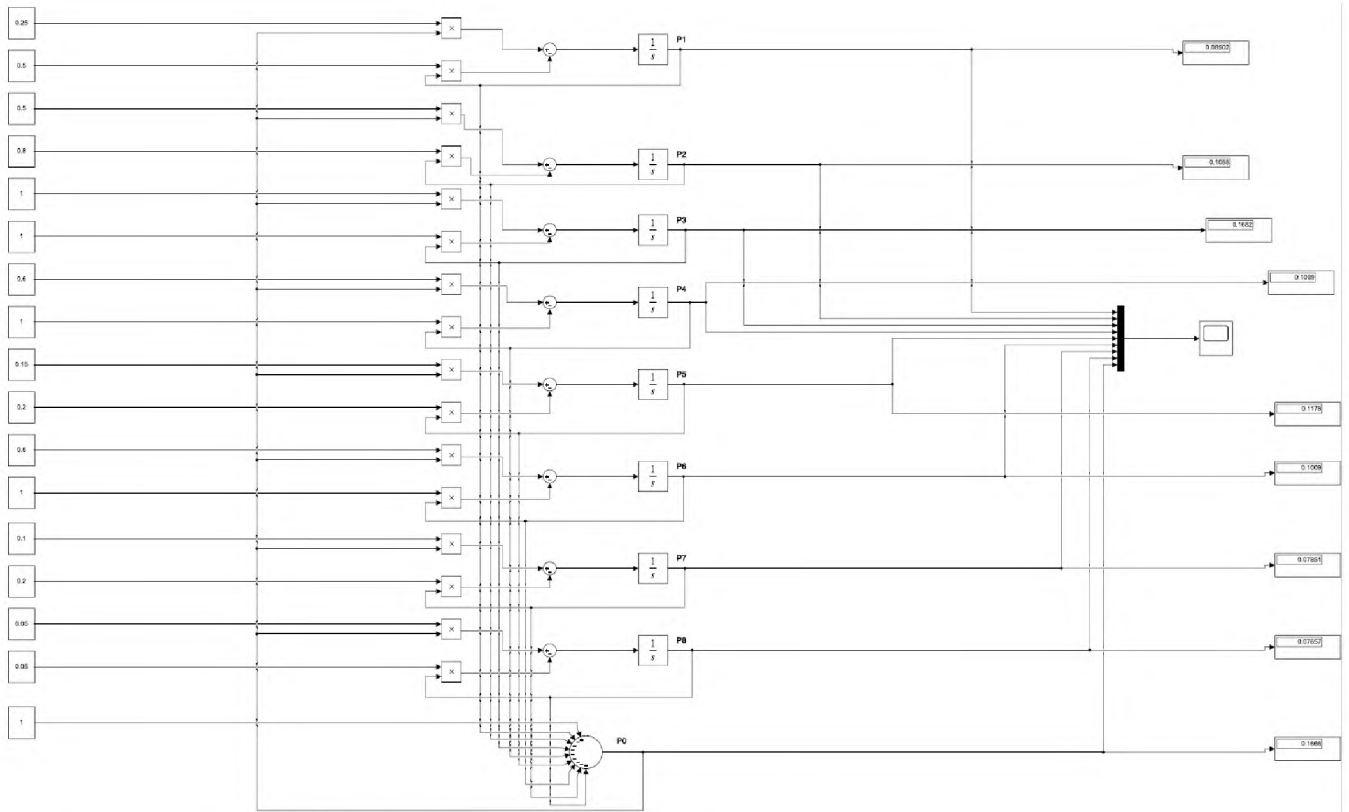


Рисунок 2.14 – Математическая модель *Simulink* процесса отказов устройств по причине гололедообразования

Выводы по второй главе

1. Произведена оценка стрелы провеса контактного провода на возможность повышения скорости движения на участке контактной сети «Е-Ч» в зависимости от расчетной толщины стенки гололеда. Из полученных графиков стрел провеса следует, что наименьшими стрелами провеса контактного провода обладает контактная подвеска М95-2НЛФ100. Существующая инфраструктура позволит обеспечить безопасность движения поездов на участке железнодорожной магистрали даже с учетом непростых климатических условий.

2. Сформулированы факторы, приводящие к отказам устройств контактной сети по причине гололедообразования. Для правильной оптимизации факторов использована сеть Байеса. В результате исследования выявлены значимые факторы, которые влияют на вероятность отказов устройств токосъема вследствие гололедообразования. Для каждого фактора было рассчитано математическое ожидание и сделан вывод: чем меньше математическое ожидание рассматриваемого фактора, тем больше влияние, оказываемое на вероятность появления отказа.

3. Разработана структурная схема надежности контактной сети с восстановлением при токосъеме, которая объясняет функционирование устройств контактной сети в условиях образования гололеда. По схеме был проиллюстрирован вариант последовательной структуры устройств контактной сети. Это позволяет построить математическую многофакторную модель и решить ее при принятых допущениях и упрощениях.

4. Предложена математическая многофакторная модель в виде марковского процесса по оценке риска отказов контактной сети из-за гололедообразования, математическая многофакторная модель, которая позволит определить уровень риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании и спланировать на дистанции электроснабжения необходимые мероприятия по предупреждению гололеда.

3 РАЗРАБОТКА МАТРИЦЫ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ И ОТРАЖЕНИЯ РИСКОВ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА УЧАСТКАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ

Матрица рисков – инструмент, позволяющий ранжировать и отражать риски для его анализа. При определенных шкалах частот и последствий матрица помогает установить величину риска и то, какие потери в него вовлечены [97].

Анализ риска – процесс использования информации для оценки риска. В процессе анализа риска можно использовать качественный и количественный подход [114].

Качественный подход основан на восприятии работы и представляет собой вероятность наступления рискового события и его негативных последствий. [115, 116].

Количественная оценка рисков – наиболее точный метод оценки рисков, так как он используется в том случае, когда можно сопоставить нежелательные события и связанные с ними риски. Такая оценка позволяет получить конкретный уровень риска, который можно сравнить в рамках выбранной количественной шкалы.

На основании методологии УРРАН целью построения матрицы, позволяющей ранжировать и отражать риск гололедообразования на участках контактной сети, является описание методов ее формирования, выбора масштаба, начальных и конечных значений шкал рисков, частот и последствий [97].

Результаты работы улучшат объективность данных, представляемых для поддержки принятия решения по применению мероприятий по предотвращению гололедообразования на участках железнодорожных магистралей за счет обоснованного формирования параметров матрицы рисков с применением числовых значений, полученных на этапе анализа рисков [65, 113].

3.1 Классификация рисков для оценки гололедообразования на контактной сети

Классификация рисков по оценке гололедообразования на участках железнодорожных магистралей представляет довольно сложную проблему, так как к настоящему времени еще не разработано общепринятой классификации рисков на контактной сети.

Основная классификация и их характеристика видов риска представлена на рисунке 3.1 [50].

Вид риска	Объект риска	Источник риска	Нежелательное событие
Индивидуальный	Человек	Условия жизнедеятельности человека	Заболевание, травма, инвалидность, смерть
Технический	Технические системы и объекты	Техническое несовершенство, нарушение правил эксплуатации	Авария, взрыв, катастрофа, пожар, разрушение
Экологический	Экологические системы	Антропогенное вмешательство в природную среду, техногенные чрезвычайные ситуации	Антропогенные экологические катастрофы, стихийные бедствия
Социальный	Социальные группы	Чрезвычайная ситуация, снижение качества жизни	Групповые травмы, заболевания, гибель людей, рост смертности
Экономический	Материальные ресурсы	Повышенная опасность производства или окружающей среды	Увеличение затрат на безопасность

Рисунок 3.1 – Классификация и характеристика видов риска

В рамках анализа риска рассматривается индивидуальный риск, который связан с вероятностью возникновения потенциальной угрозы в случае наступления опасной ситуации на проводах контактной сети. Пример индивидуального риска – риск возникновения пережога на проводах контактной сети при обледенении. Одним из важных аспектов является разделение данного вида риска на добровольный и вынужденный.

Добровольный риск связан с деятельностью, которую человек осуществляет по собственному желанию и в рамках запланированных мероприятий, а вынужденный – если человек рискует непроизвольно.

Технический риск – вероятность повреждения или отказа при эксплуатации устройств контактной сети, реализации технологических процессов, таких как гололед и другие неблагоприятные погодные явления.

Экологический риск характеризуется вероятностью возникновения возможного бедствия, которое может нарушить нормальную работу объектов контактной сети вследствие природных катаклизмов. Изменение экологической обстановки на определенной территории позволяет оценить изменение экологической ситуации и выявить зоны, подверженные опасностям или благополучию.

Социальный риск включает в себя анализ масштаба и степени негативного последствия, а также изменения, которое оказывает влияние на качество жизни людей. Оценка социального риска может быть проведена на основе анализа динамики смертности в различных группах населения.

Экономический риск определяется соотношением получаемых обществом пользы и вреда от определенных видов деятельности.

Приемлемый риск объединяет технические, экологические, социальные аспекты и является компромиссом между допустимым уровнем безопасности и финансовыми возможностями его достижения. Иными словами, это приводит к снижению индивидуального, технического и экологического рисков, однако не стоит забывать, какую цену придется заплатить за это и каким в итоге окажется социальный риск. Определение приемлемого уровня риска является необходимым шагом в этом процессе.

Оценка различных видов риска имеет большое значение для разработки оптимальных мероприятий по обеспечению безопасности и надежности железнодорожного транспорта в хозяйстве электрификации и электроснабжении [51, 112].

По вышеописанным видам рисков предлагается составить классификация рисков по оценке гололедообразования на участке железнодорожной магистрали (рисунок 3.2) [51].

Риск	Вид риска
Возникновение пережога или обрыв контактного провода по причине гололедообразования	Индивидуальный, социальный, технический, экологический, экономический
Повреждение токоприемника или других частей подвижного состава вследствие гололедообразования	Технический, экономический, социальный
Нарушение безопасности движения поездов из-за повреждения поддерживающих конструкций	Технический, экономический, социальный
Задержка поездов по причине гололедообразования	Экономический

Рисунок 3.2 – Классификация рисков, связанных с контактной сетью при условии гололедообразования

3.2 Определение перечня нежелательных последствий по оценке риска обеспечения безопасности движения поездов при гололеде

Для определения перечня нежелательных последствий рекомендуется использовать статические данные по аварийности и надежности технологической

системы, соответствующие специфике опасного производственного объекта или виду деятельности, а также логические методы анализа «дерева событий», «дерева отказов», имитационные модели возникновения аварий в человеко-машинной системе [60, 112].

Уровень риска рассчитывается для заданного интервала наблюдения. Частота f проявляется числом нежелательных событий, а значение c последствий представляет собой отношение продолжительности устранения отказа за интервал наблюдения к их количеству [62, 65, 87].

Величины f и c рассчитываются на этапе анализа риска. В подавляющем большинстве практически применимых случаев уровень риска представляет собой произведение частоты f возникновения нежелательного события и величины его последствий c [51, 65]:

$$R = f \cdot c \quad (3.1)$$

Выражение (3.1) принимается для оценки уровня риска гололедообразования, при этом чаще всего используется частота повреждения, поскольку вероятностная оценка всех возможных состояний очень затруднительна.

В случае представления риска как произведения частоты и последствий, риск будет иметь размерность последствий, отнесенную к величине интервала наблюдения. Например, если интервал наблюдения равен 1 году, а последствия – величина ущерба для одного отказа, то риск будет иметь размерность час/год (так как размерность частоты – 1/год) [59].

При полуколичественной или качественной оценке частот или последствий размерность риска, как правило, не выражается в физических величинах. В таких случаях может использоваться балльная оценка риска или качественная оценка (по принадлежности к одной из категорий риска).

Определен перечень критических нежелательных последствий для системы токосъема на основании статистических данных об отказах ее элементов и продолжительности устранения этих последствий при гололедообразовании [51]:

- риск повреждения поддерживающих конструкций (риск 1);
- риск повреждения контактной подвески (риск 2);
- риск повреждения токоприемника и др. (риск 3).

На основании статистических данных на участке контактной сети «Е-Ч» о количестве нежелательных событий [1, 2, 3, 4] (повреждения поддерживающих конструкций, контактных подвесок и инфраструктуры) и продолжительности устранения этих событий по причине гололедообразования за интервал наблюдения вычисляется частота их возникновения:

$$f = \frac{r}{T_{\text{н}}}, \quad (3.2)$$

где r – количество нежелательных событий данного вида за интервал наблюдения, $r > 0$;
 $T_{\text{н}}$ – интервал наблюдения (год, час).

Интервал наблюдения $T_{\text{н}}$ составляет 1 год.

По статистическим данным отказов устройств контактной сети от возникновения нежелательных событий по причине гололедообразования за заданный срок наблюдения определяется удельный размер последствий [51, 59]:

$$c = \frac{C_{\Sigma}}{r} = \frac{\sum_{i=1}^r c_i}{r}, \quad (3.3)$$

где C_{Σ} – продолжительность устранения отказа до возобновления

движения, час;

c_i – размер последствий нежелательного последствия.

Рассчитанные значения частоты возникновения отказов и величины ущерба заносятся в таблицы 3.1-3.3 для каждого участка контактной сети при разных значениях допустимого уровня риска.

Таблица 3.1 – Данные по повреждениям устройств контактной сети по причине гололедообразования на участке «Е-С»

Вид риска	Количество повреждений по причине гололеда	Продолжительность устранения повреждения, $\sum C$, час	Частота повреждения, f , 1/год	Величина ущерба для одного повреждения, c , час
Риск повреждения подерживающих конструкций из-за гололеда	3	1,4	3	0,47
Риск повреждения контактной подвески	4	4,68	4	1,17
Риск повреждения токоприемника	1	0,1	1	0,1

Для каждого вида риска вычислим уровень риска по формуле 3.1:

$$R_1 = 3 \cdot 0,47 = 1,41 \text{ часа};$$

$$R_2 = 4 \cdot 1,17 = 3,4 \text{ часа};$$

$$R_3 = 1 \cdot 0,1 = 0,1 \text{ часа}.$$

Таблица 3.2 – Данные по частичным отказам устройств контактной сети по причине гололедообразования на участке «С-Сн»

Вид риска	Количество повреждений по причине гололеда	Продолжительность устранения повреждения, $\sum C$, час	Частота повреждения, f , 1/год	Величина ущерба для одного повреждения, c
-----------	--	--	----------------------------------	---

Окончание таблицы 3.2

Риск повреждения поддерживающих конструкций из-за гололеда	2	0,76	2	0,38
Риск повреждения контактной подвески	3	4,29	3	1,43
Риск повреждения токоприемника	1	0,12	1	0,12

Уровень риска для каждого вида риска:

$$R_1 = 2 \cdot 0,38 = 0,76 \text{ часа};$$

$$R_2 = 3 \cdot 0,93 = 4,3 \text{ часа};$$

$$R_3 = 1 \cdot 0,12 = 0,12 \text{ часа}.$$

Таблица 3.3 – Данные по частичным отказам устройств контактной сети по причине гололедообразования на участке «Сн-Ч»

Вид риска	Количество повреждений по причине гололеда	Продолжительность устранения повреждения, $\sum C$, час	Частота повреждения, f , 1/год	Величина ущерба для одного повреждения, c , час
Риск повреждения поддерживающих конструкций из-за гололеда	2	0,7	2	0,35
Риск повреждения контактной подвески	2	0,65	2	0,325
Риск повреждения токоприемника	2	0,8	2	0,45

Уровень риска для каждого вида риска:

$$R_1 = 2 \cdot 0,35 = 0,7 \text{ часа};$$

$$R_2 = 2 \cdot 0,325 = 0,65 \text{ часа};$$

$$R_3 = 2 \cdot 0,45 = 0,9 \text{ часа}.$$

3.3 Определение шкал частот и последствий гололедообразования на участке железнодорожной магистрали

Шкалы матрицы формируются на основе заданной размерности $m \times n$, включая согласующий коэффициент μ , установленного допустимого уровня риска $R_{\text{доп}}$ и известных минимальных и максимальных значений частоты и удельного размера последствий в выборке временного ряда за несколько интервалов наблюдения ($f_{\min}, f_{\max}, c_{\min}, c_{\max}$) [97].

Для практического применения поле ячеек слишком малой размерности (где m или n равны 2) непригодно из-за малого количества степеней свободы в области частот или последствий. Поле ячеек большого размера (где m или n более 8) также не является лучшим решением, поскольку его восприятие усложнено большим количеством комбинаций интервалов частот и последствий. Соотношение m/n , значительно отличающееся от 1, создает дисбаланс между реализуемыми диапазонами значений частот и последствий. Таким образом, для технического применения, а именно для оценки уровня риска задержки поездов на участках железнодорожных магистралей, самым приемлемым является размерность 6×4 (7 шкал частот и 5 шкал последствий) [51].

На рисунке 3.3 представлено поле ячеек матрицы рисков размерностью $m \times n$, где обозначены шкалы, которые отображают значения интервалов частот и последствий. При этом метки шкал, соответствующие центру симметрии поля ячеек, имеют нулевые индексы. Максимальные значения индексов равны:

$$I = m / 2, J = n / 2, \quad (3.4)$$

где m – Количество строк в матрице;
 n – Количество столбцов в матрице.

Рассмотрим формирование шкал для участка контактной сети «Е-С» на основе указанного перечня нежелательных событий (см. таблицу 3.3). Определяем минимальные и максимальные значения частоты и удельного размера последствий для выборки на интервале наблюдения 2022 г. [51]:

$$\begin{aligned}f_{min} &= 1 \text{ 1/год}; \\f_{max} &= 4 \text{ 1/год}; \\c_{min} &= 0,1 \text{ часа}; \\c_{max} &= 0,75 \text{ часа};\end{aligned}$$

На первом этапе находим требуемые относительные диапазоны представляемых матрицей значений частот (A) и последствий (B) с учетом коэффициентов технологического запаса a_1, a_2, b_1, b_2 [51]:

$$A = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot f_{max}}{f_{min}}, \quad (3.5)$$

где $a_1 = 1,5$ – коэффициент запаса нижней границы диапазона частот;
 $a_2 = 2$ – коэффициент запаса верхней границы диапазона частот.

$$B = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot c_{max}}{c_{min}}, \quad (3.6)$$

где $b_1 = 1,5$ – коэффициент запаса нижней границы диапазона последствий;
 $b_2 = 2$ – коэффициент запаса верхней границы диапазона последствий.

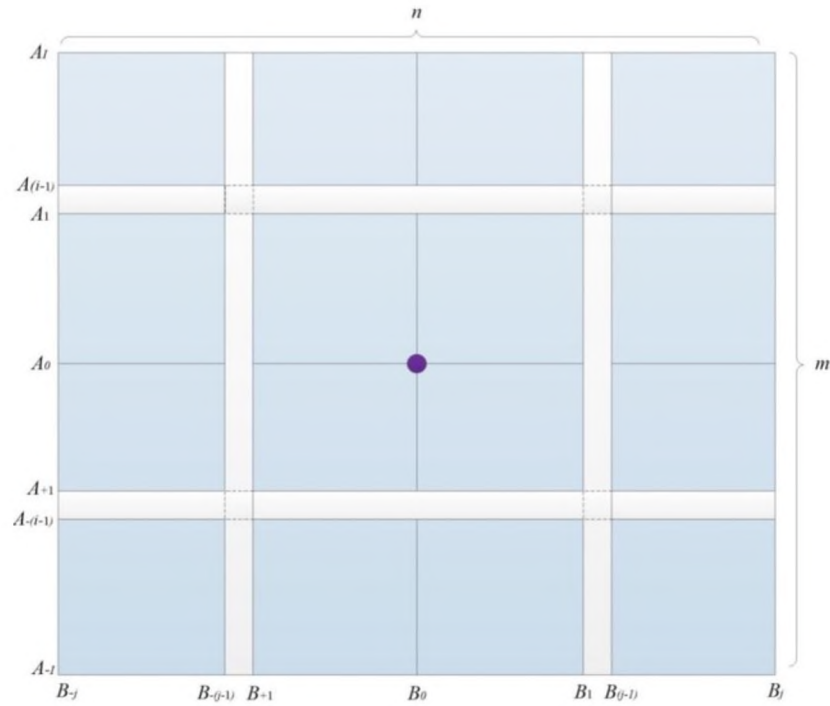


Рисунок 3.3 – Метки шкал частот и последствий поля ячеек $m \times n$

Фиксируются крайние значения шкалы частот A_{-I} и A_I , где $I = 6/2 = 3$:

$$A_{-I} = f_{\min} / a_1, \quad (3.7)$$

$$A_I = a_2 \cdot f_{\max}. \quad (3.8)$$

Рассчитаем данные значения шкалы частот по формулам (3.7-3.8):

$$A_{-I} = 1 / 1,5 = 0,67;$$

$$A_I = 2 \cdot 4 = 8.$$

Выполняется проекция крайних значений A_{-I} и A_I на шкалу последствий.

При этом используется свойство центрально-симметричного поля ячеек, заключающееся в том, что уровень R_0 риска в точке симметрии равен $R_{\text{доп}}/K$. Значит, произведение шкал A_0 и B_0 также равно $A_0 \cdot B_0 = R_0 = R_{\text{доп}}/K$ [51].

Уровень риска в верхнем правом углу поля ячеек равен:

$$R_{\max} = R_0 (k_f)^I (k_c)^J = R_0 K^{\frac{I+2J}{2\mu}} = R_{\text{доп}} K^{\frac{I+2J}{2\mu}-1}. \quad (3.9)$$

Уровень риска в нижнем левом углу поля ячеек равен:

$$R_{\min} = R_0 (k_f)^{-I} (k_c)^{-J} = R_0 K^{-\frac{I+2J}{2\mu}} = R_{\text{доп}} K^{-\frac{I+2J}{2\mu}-1}. \quad (3.10)$$

Проекция крайних значений A_{-I} и A_I на шкалу последствий:

$$B_{-J} = \frac{R_{\min}}{A_{-I}} = \frac{a_1 R_{\text{доп}} K^{-\frac{I+2J}{2\mu}-1}}{f_{\min}}, \quad (3.11)$$

$$B_J = \frac{R_{\max}}{A_I} = \frac{R_{\text{доп}} K^{\frac{I+2J}{2\mu}-1}}{a_2 f_{\max}}. \quad (3.12)$$

Определяем проекцию крайних значений на шкалу последствий по формулам (3.11-3.12):

$$B_{-2} = \frac{1,5 \cdot 0,1 \cdot 3,46^{\frac{3+2 \cdot 2}{2 \cdot 1,5}-1}}{1} \frac{1,5 \cdot 0,1 \cdot 0,055}{1} = 0,0578;$$

$$B_2 = \frac{0,1 \cdot 3,46^{\frac{3+2 \cdot 2}{2 \cdot 1,5}-1}}{2 \cdot 4} \frac{0,1 \cdot 18,107}{8} = 1,58.$$

Далее проверяем, находятся ли минимальное и максимальное требуемые значения последствий в пределах спроецированного интервала $B_{-2} \dots B_2$ по следующим неравенствам:

$$\frac{c_{\min}}{b_1} \geq B_{-j} \rightarrow \frac{0,1}{1,5} \geq 0,0578 - \text{верно};$$

$$b_2 c_{\max} \geq B_j \rightarrow 2 \cdot 0,75 \geq 1,58 - \text{верно}.$$

По результатам проверки оба неравенства выполняются, проводим расчет промежуточных значений уровней шкал.

Если задано нижнее значение шкалы, то остальные значения находим по формулам:

$$A_{i+1} = A_i \cdot K^{\frac{1}{2^\mu}}, \quad (3.13)$$

$$B_{j+1} = B_j \cdot K^{\frac{1}{\mu}}, \quad (3.14)$$

Рассчитаем недостающие значения шкал частот и последствий по начальным значениям A_{-3} и B_{-2} :

$$A_{-2} = A_{-3} \cdot K^{\frac{1}{2^\mu}} = 0,67 \cdot 3,46^{\frac{1}{3}} = 1,01;$$

$$A_{-1} = A_{-3} \cdot K^{\frac{2}{2^\mu}} = 0,67 \cdot 3,46^{\frac{2}{3}} = 1,53;$$

$$A_0 = A_{-3} \cdot K^{\frac{3}{2^\mu}} = 0,67 \cdot 3,46^{\frac{3}{3}} = 2,32;$$

$$A_1 = A_{-3} \cdot K^{\frac{4}{2^\mu}} = 0,67 \cdot 3,46^{\frac{4}{3}} = 3,51;$$

$$A_2 = A_{-3} \cdot K^{\frac{5}{2^\mu}} = 0,67 \cdot 3,46^{\frac{5}{3}} = 5,3;$$

$$B_{-1} = B_{-2} \cdot K^{\frac{1}{\mu}} = 0,058 \cdot 3,46^{\frac{1}{1,5}} = 0,17;$$

$$B_0 = B_{-2} \cdot K^{\frac{2}{\mu}} = 0,058 \cdot 3,46^{\frac{2}{1,5}} = 0,29;$$

$$B_1 = B_{-2} \cdot K^{\frac{3}{\mu}} = 0,058 \cdot 3,46^{\frac{3}{1,5}} = 0,67.$$

Полученные результаты шкалы частот и последствий для всех участков контактной сети представлены в таблицах 3.4-3.5.

Таблица 3.4 – Шкала частот на участке контактной сети «Е-Ч»

Значения шкалы частот	«Е-С	«С-Сн»	«С-Ч»
A_3	8	6,73	4
A_2	5,3	4,56	3,32
A_1	3,51	3,08	2,76
A_0	2,32	2,08	2,3
A_{-1}	1,53	1,4	1,92
A_{-2}	1,01	0,95	1,6
A_{-3}	0,67	0,64	1,33

Таблица 3.5 – Шкала последствий на участке контактной сети «Е-Ч»

Значения шкалы последствий	«Е-С	«С-Сн»	«С-Ч»
B_2	1,58	1,86	0,99
B_1	0,67	0,85	0,69
B_0	0,29	0,39	0,49
B_{-1}	0,17	0,18	0,33
B_{-2}	0,058	0,08	0,23

3.4 Разработка структуры математической матрицы для ранжирования и отражения риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании

Как ранее было сказано, оценивание риска может быть реализовано с помощью матрицы рисков, которая представляет собой таблицу с сочетанием возникновения события и тяжести последствий этого события и позволяет в наглядной форме проинформировать предприятие, принимающие решения об уровнях риска для данного события [97]. Пример матрицы приведен на рисунке 3.4.

Уровни частоты	Уровни риска			
	Частое	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Вероятное	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
Случайное	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый
Редкое	Непринимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
Крайне редкое	Непринимаемый в расчет	Непринимаемый в расчет	Нежелательный	Нежелательный
Маловероятное	Непринимаемый в расчет	Непринимаемый в расчет	Непринимаемый в расчет	Непринимаемый в расчет
	Незначительный	Несущественный	Критический	Катастрофический
	Уровни тяжести последствий			

Рисунок 3.4 – Стандартная матрица для определения уровня риска

Первой задачей при построении матрицы риска для оценки гололедообразования является выбор параметров шкалы рисков.

В настоящих рекомендациях существует 4 категории рисков:

- не принимаемый в расчет риск;
- допустимый риск;
- нежелательный риск;
- недопустимый риск.

При известном значении допустимого уровня риска $R_{\text{доп}}$ устанавливается граница между областями нежелательного и недопустимого риска. Границы между остальными областями значений риска не имеют точной привязки к допустимому уровню риска, поскольку условия определения данных границ в рассматриваемом случае не заданы.

Рекомендуется применить принцип *ALARP*, суть которого заключается в установлении областей значений риска для каждой категории риска, то есть в формировании шкалы рисков [59, 97, 51].

Построим 3 математические матрицы рисков для каждого участка контактной сети на магистрали «Е-Ч». Присвоим меткам шкал рассчитанные значения.

1. Участок контактной сети «Е-С».

Для того чтобы построить математическую матрицу рисков, необходимо перемножить значения частоты и тяжести последствий, которые соответствуют каждой ячейке, и назначить категорию в зависимости от результата. Откладываем на соответствующих осях значения частоты последствий и тяжесть последствий из таблицы 3.1. Результат матрицы рисков на участке «Е-С» показан на рисунке 3.5.

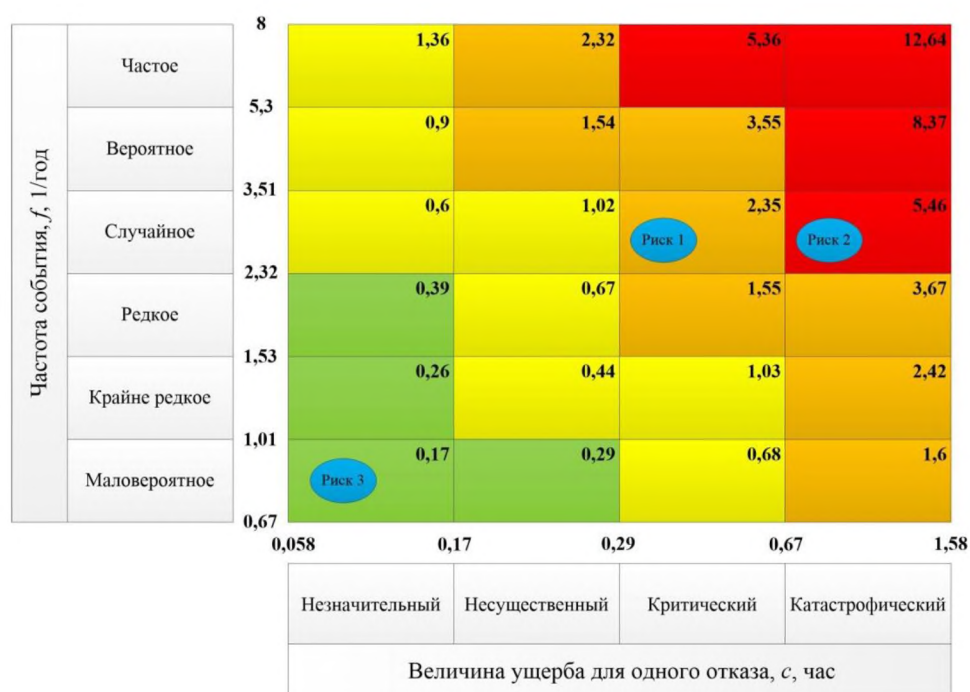


Рисунок 3.5 – Матрица рисков на участке «Е-С»

2. Участок контактной сети «С-Сн».

Откладываем полученные значения частоты последствий и тяжесть последствий из таблицы 3.2. Результат матрицы рисков на участке «С-Сн» показан на рисунке 3.6.

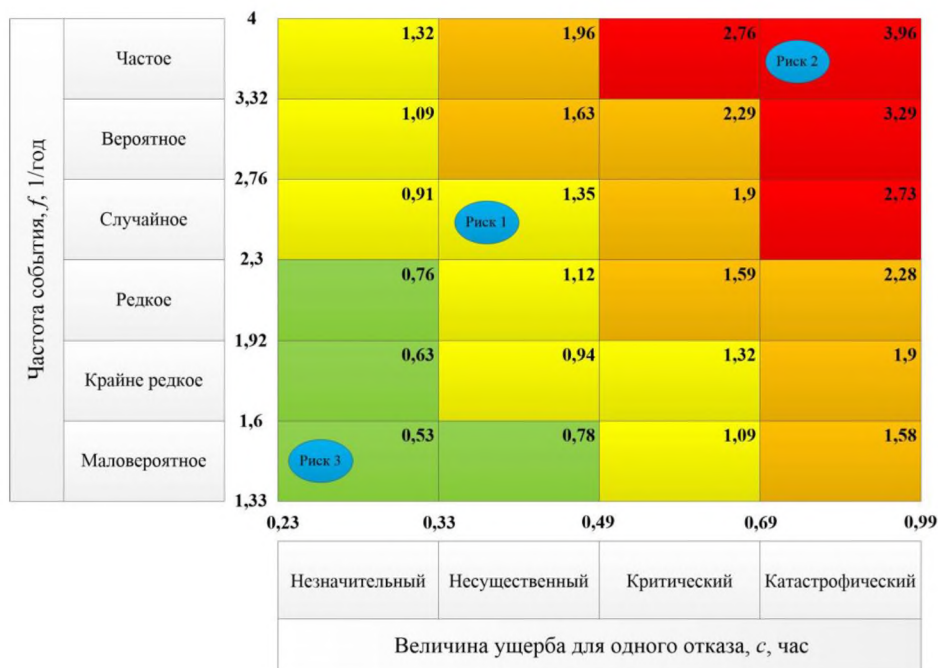


Рисунок 3.6 – Матрица рисков на участке «С-Сн»

3. Участок контактной сети «Сн-Ч».

Откладываем полученные значения частоты последствий и тяжесть последствий из таблицы 3.3. Результат матрицы рисков на участке «Сн-Ч» показан на рисунке 3.7.

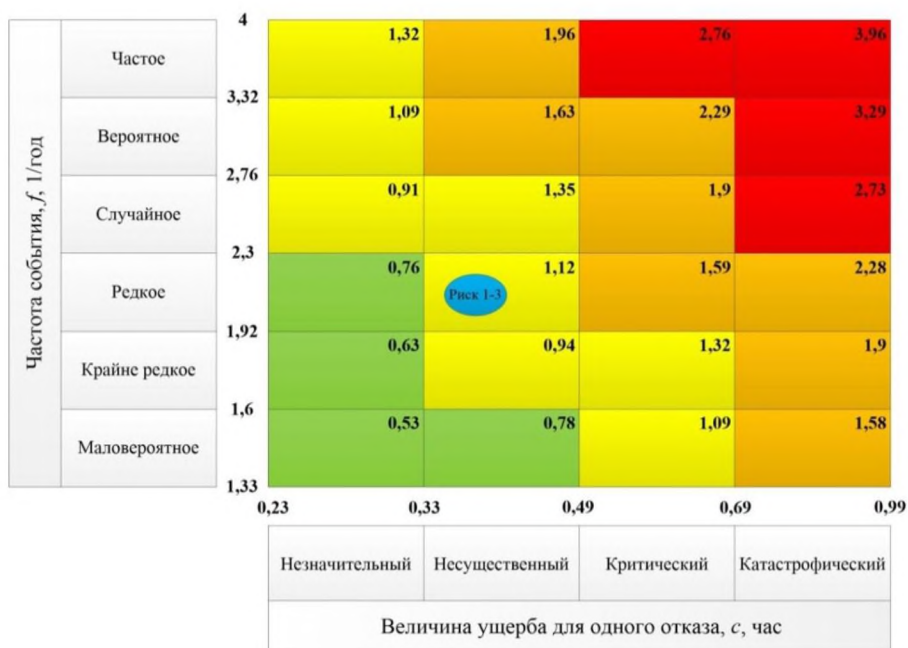


Рисунок 3.7 – Матрица рисков на участке «Сн-Ч»

Полученные матрицы будут являться инструментом для принятия решения при проектировании высокоскоростного участка контактной сети «Е-Ч» в части выбора типа контактной подвески, максимальных длин пролетов, анкерных участков, поддерживающих конструкций и др. [51].

С помощью матриц, предлагаемых автором, становится возможным обосновать необходимость применения специальных материалов для предотвращения гололедообразования, за счет которых будет исключено время профилактического подогрева контактной подвески, и, как следствие, снизятся эксплуатационные затраты [51].

По известному значению уровня риска на каждом участке железнодорожной магистрали «Е-Ч» необходимо спланировать сроки, время, выбрать тип мероприятий по предупреждению гололедообразования и не допустить задержку поездов из-за образования гололеда на устройствах контактной сети [51].

3.5 Расчет интегральной оценки уровня риска на участке контактной сети «Е-Ч»

При управлении рисками существует задача определения интегральной оценки для различного рода риска. Отсутствие единицы их измерения является одной из основных проблем при расчете интегральной оценки рисков. Наиболее оптимальной единицей измерения является денежная валюта. Она необходима с точки зрения анализа затрат и выгод, поскольку в конечном счете главным результатом управления рисками будет минимизация экономических потерь [59, 61, 112].

Для получения интегральной оценки рисков задается одномерная балльная шкала рисков с логарифмическим масштабом (рисунок 3.8) [97].



Рисунок 3.8 – Одномерная балльная шкала рисков

Размерность шкалы составляет 40 баллов, по 10 баллов на каждую категорию рисков. При разделении одной области значений рисков на 10 балльных интервалов в логарифмическом масштабе получим относительный шаг риска.

Заданные допустимые уровни и значения частоты и удельного размера ущерба рисков в денежных единицах за год наблюдения представлены в таблице 3.6. Всего видов рисков, которые подлежат интеграции, – 3.

Таблица 3.6 – Допустимые уровни риска и значения частоты и удельного размера ущерба

Вид риска	Допустимый уровень риска	Частота события	Удельный размер последствий события	Шаг риска K
Риск повреждения поддерживающих конструкций из-за гололеда	7500 рублей/год	0,031 1/год/км	1339,29 руб./км	16
Риск повреждения контактной подвески	9000 рублей/год	0,158 1/год/км	2451 руб./км	16
Риск повреждения инфраструктуры из-за скалывания льда	6000 рублей/год	0,012 1/год/км	1071,43 руб./км	16

Для каждого вида риска вычислим его уровень по формуле 3.2:

$$R_1 = 1339,29 \cdot 0,031 = 41,52 \text{ руб./км};$$

$$R_2 = 2451 \cdot 0,158 = 387,26 \text{ руб./км};$$

$$R_3 = 1071,43 \cdot 0,012 = 12,85 \text{ руб./км}.$$

Для рисков, уровень которых находится между указанными значениями, количество баллов определяется по формуле

$$B = 30 + \frac{10 \lg R - 10 \lg R_{\text{доп}}}{\lg K}. \quad (3.15)$$

Рассчитаем для каждого вида рисков его балльную оценку (результат округляется до целого значения):

$$B_1 = 30 + \frac{10 \lg 41,52 - 10 \lg 7500}{\lg 16} = 30 + \frac{16,2 - 38,6}{1,204} = 12;$$

$$B_2 = 30 + \frac{10 \lg 387,26 - 10 \lg 9000}{\lg 16} = 30 + \frac{25,88 - 39,54}{1,204} = 20;$$

$$B_3 = 30 + \frac{10 \lg 12,58 - 10 \lg 6000}{\lg 16} = 30 + \frac{11 - 37,78}{1,204} = 9;$$

Интегральная оценка рисков всех трех видов заключается в получении некоторого балла, который будет отражать общую оценку всех составляющих рисков:

$$B_{\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n (B_i \cdot \theta_i^{\xi})}{\sum_{i=1}^n \theta_i^{\xi}}, \quad (3.16)$$

- где n – количество интегрируемых рисков;
 B_i – балльная оценка i -го риска с уровнем R_i ;
 θ_i – весовой коэффициент i -го риска, учитывающий абсолютные потери в денежном выражении;

ξ – показатель учета абсолютных потерь в денежном выражении.

При $\xi = 0$ потери не учитываются, обеспечивается равновесовая интеграция балльных оценок, а при $\xi = 1$ определяется величиной связанных с ним денежных потерь.

Весовой коэффициент определяется на основе данных по оценкам рисков в денежном эквиваленте:

$$\theta_i = \frac{n \cdot R_i^{\ominus}}{\sum_{i=1}^n R_i^{\ominus}}, \quad (3.17)$$

где R_i^{\ominus} – эквивалентная оценка фактического риска.

Эквивалентное значение риска получается путем пересчета уровня риска в его оригинальных единицах в рубли. Определим весовые коэффициенты по формуле 3.17, отражающие денежные потери. Все риски выражены в рублях, дополнительного перевода не требуется.

$$\theta_1 = \frac{3 \cdot 41,52}{41,52 + 387,26 + 12,85} = 0,282;$$

$$\theta_2 = \frac{3 \cdot 387,26}{41,52 + 387,26 + 12,85} = 2,631;$$

$$\theta_3 = \frac{3 \cdot 12,85}{41,52 + 387,26 + 12,85} = 0,087;$$

Произведем интегральную оценку для трех видов риска по формуле 3.16.

$$B_{\Sigma} = \frac{12 \cdot 0,282 + 20 \cdot 2,613 + 9 \cdot 0,087}{0,282 + 2,613 + 0,087} \approx 32.$$

Полученный результат отложим на одномерной шкале риска (рисунок 3.9) и делаем вывод, что на участке контактной сети «Е-Ч» присутствует недопустимый риск гололедообразования.

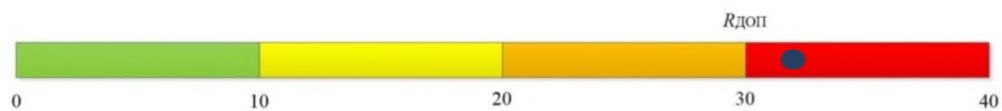


Рисунок 3.9 – Результат интегральной оценки риска

Выводы по третьей главе

1. Составлена универсальная классификация рисков для оценки гололедообразования для устройств контактной сети, которые могут получить повреждение вследствие образования гололеда.

2. Определен перечень нежелательных событий на основе статистических данных об отказах контактной подвески, поддерживающих конструкций и инфраструктуры на участке контактной сети «Е-Ч», который позволяет рассчитать шкалы частот и последствий гололедообразования на контактной сети.

3. Определены шкалы частот и последствий гололедообразования на участке железнодорожной магистрали «Е-Ч», по которым были разработаны матрицы рисков задержки поездов вследствие образования гололеда. Полученные матрицы помогут принять решение при проектировании высокоскоростного участка контактной сети «Е-Ч» в части выбора типа контактной подвески, поддерживающих конструкций.

4. Для каждого из трех участков магистрали «Е-Ч» определен риск повреждения контактной подвески. На основе полученных данных шкал частот и последствий разработана матрица, позволяющая ранжировать и отражать риски гололедообразования на железнодорожных магистралях: на участке «Е-С» ($R_{\text{уч}} = 3,4$); «С-Сн» ($R_{\text{уч}} = 4,3$); «Сн-Ч» ($R_{\text{уч}} = 0,98$). Это позволяет обеспечить требуемый уровень безопасности перевозочного процесса ($R_{\text{доп}} = 1,0$), а также сократить число повреждений устройств контактной сети по причине гололедообразования.

5. Произведен расчет интегральной оценки уровня риска на участке контактной сети «Е-Ч», который доказывает необходимость проведение мероприятий по предупреждению гололедообразования.

4 АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ НА УЧАСТКАХ КОНТАКТНОЙ СЕТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕСПЕРЕБОЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ В СЛОЖНЫХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

4.1 Мероприятия по предупреждению гололедообразования устройств контактной сети на исследуемом участке железнодорожной магистрали

Для осуществления профилактических мероприятий по предотвращению появления наледи на участках контактной сети необходимо проводить мониторинг образования гололедообразования на проводах контактных подвесок [83, 85].

Обнаружение гололедно-изморозевых отложений на раннем этапе является серьезной проблемой на железнодорожном транспорте. Для оперативного контроля над процессом удаления гололедообразования на контактной сети энергодиспетчер получает информацию о толщине стенки гололеда [71, 72].



Рисунок 4.1 – Мероприятия по предупреждению гололедообразования

Возможные мероприятия по предупреждению гололедообразования приведены на рисунке 4.1 [55, 118].

Необходимость применения мероприятий по предупреждению гололедообразования становится с каждым разом все более актуальной с развитием скоростного и высокоскоростного движения поездов.

Визуальный контроль за образование гололеда производится электромонтерами контактной сети с последующим уведомлением об этом энергодиспетчера.

Исследование гололеда на железнодорожной магистрали предполагает крайнюю необходимость в применении специализированных материалов для мониторинга наледи, размещаемых на электровозах и адаптированных к электромагнитному излучению токоприемниках. В связи с этим следует тщательно рассмотреть физические и электромагнитные свойства материалов с целью оптимизации их эффективности в условиях железнодорожной эксплуатации.

Для обеспечения эффективного контроля гололеда, распространяющегося по проводам с использованием высокочастотного сигнала, требуется внедрение приемно-передающей аппаратуры, исключающей возможные дополнительные помехи в работе устройств радиосвязи и контроля. Здесь следует провести глубокий анализ электромагнитных взаимодействий и технических параметров приемно-передающих устройств для обеспечения их оптимальной работоспособности в экстремальных климатических условиях.

Мероприятия, связанные с установкой различных датчиков на проводах контактной подвески, представляют собой сложную проблему, требующую более глубокого технического анализа. Определение оптимальных методов оценки гололедообразования подразумевает учет множества параметров, включая механические свойства материалов и характеристики контактного взаимодействия.

Разное расположение контактного провода и несущего троса на контактной сети – условия для формирования гололеда на проводах контактной подвески, что подразумевает необходимость более детального анализа термодинамических процессов, влияющих на данный процесс.

Подход, основанный на мониторинге изменений массы проводов и толщины гололеда через емкостные датчики, представляет собой перспективное решение для раннего обнаружения гололеда. Тем не менее целесообразно провести более глубокий анализ возможных методов калибровки и уточнения данных, получаемых от этих датчиков, с учетом влияния различных факторов окружающей среды (рисунок 4.2).

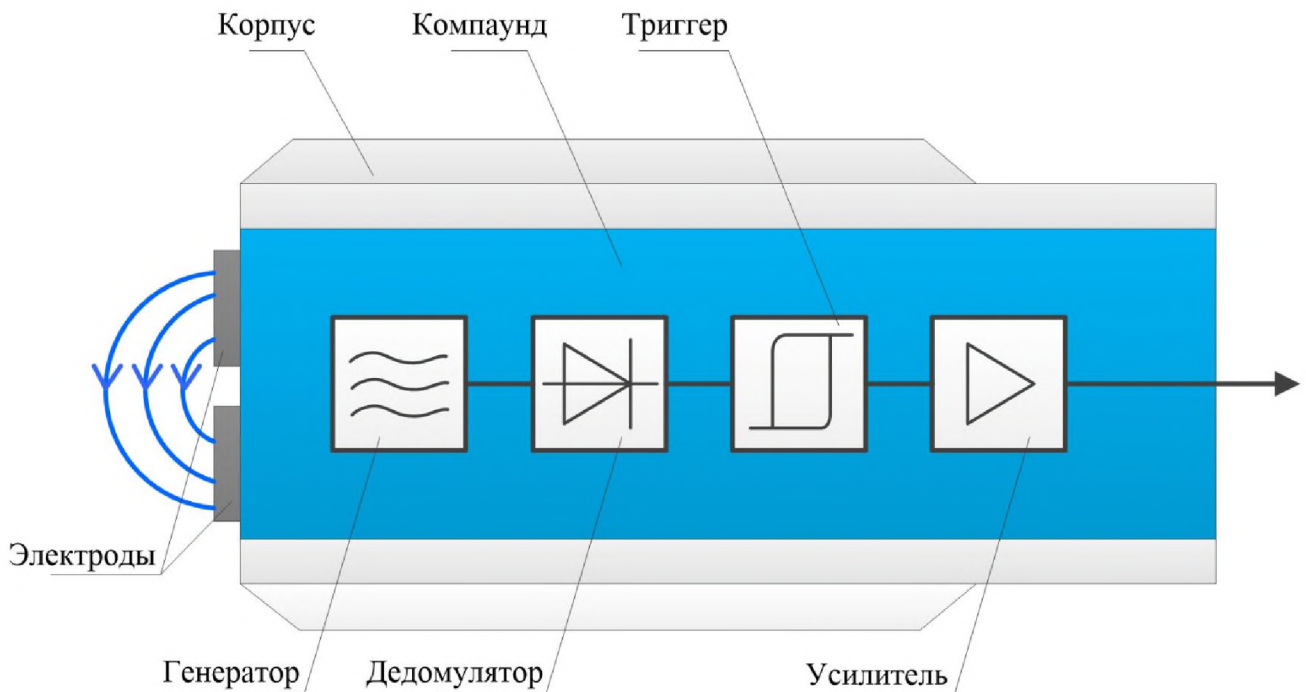


Рисунок 4.2 – Емкостной датчик для определения образования гололеда на проводах контактной сети

При выборе оптимального местоположения датчика важно обеспечить возможность передачи данных на диспетчерский пункт посредством каналов связи. Используемые каналы связи должны быть либо оснащены собственным источником электропитания, либо оборудованы преобразователем, который позволяет использовать напряжение контактной сети для питания устройств. Кроме того, передаваемая информация от датчиков не должна искажаться при прохождении электровоза, так как возможны помехи из-за электрической дуги.

Анализ различных методов показывает, что наиболее эффективным способом обнаружения гололедных отложений на рассматриваемом участке магистрали

«Е-Ч», где наблюдается высокий уровень риска, является термодинамический. Этот метод основан на измерении температуры провода, скорости и направления ветра на участке, где возможно образование гололеда.

Для оценки эффективности применения термодинамического метода в предотвращении образования гололеда на железнодорожных магистралях был использован комплект программно-технического обеспечения АИСКГН «БЛАЙС». Данный комплект включает в себя датчики-преобразователи нагрузки, датчики влажности, температуры и скорости ветра, а также передающий блок.

Связь между датчиками и передающим блоком осуществляется по радиоканалу (рисунок 4.3).



Рисунок 4.3 – Датчик-преобразователь нагрузки на проводах контактной сети

Приемно-передающий блок оборудован аккумулятором и солнечной батареей (рисунок 4.4). Частота обмена данными между диспетчерским пунктом и устройством приема-передачи определяется оператором и может быть изменена. Данные, передаваемые на энергодиспетчерский пункт, включают информацию о температуре окружающей среды и изменении массы проводов контактной подвески. Анализ этих параметров позволяет обнаружить начало процесса образования гололеда как на несущем тросе, так и на контактном проводе. На участках,

где наблюдается начало образования гололеда, предлагается использовать антиобледенительное вещество *Defroster RW* для предотвращения накопления льда на проводах контактной подвески.



Рисунок 4.4 – Устройство приема-передачи информации на диспетчерский пункт

В рамках исследования на участке «К-Ч» Южно-Уральской железной дороги был выбран анкерный участок, расположенный в зоне высокой интенсивности ветра. Установленный комплект аппаратуры в реальном времени обеспечивает передачу необходимой информации через *GSM-R* модуль.

Построим графики, отражающие зависимость распределения гололедной нагрузки на контактной сети в нормальном режиме и режиме «гололед с ветром» (рисунок 4.5).

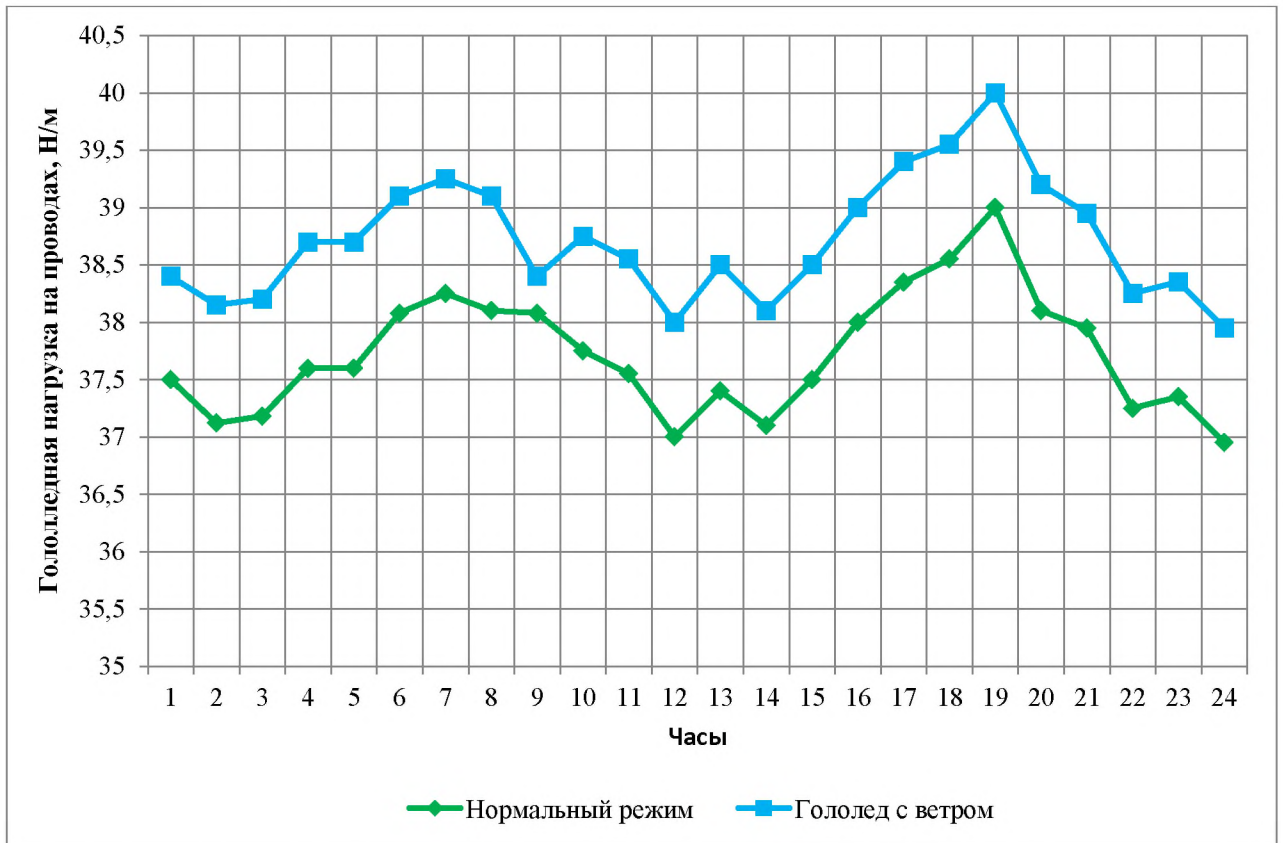


Рисунок 4.5 – Графики зависимости гололедной нагрузки на проводах контактной сети от времени

Проводимое исследование снизит вероятность повреждения устройства контактной сети в период гололедообразования.

Эффективное применение термодинамического способа раннего обнаружения гололеда на участке проектируемой железнодорожной магистрали «Е-Ч» позволит сэкономить ресурс силового и коммутационного оборудования на тяговой подстанции, а также электроэнергию благодаря использованию метода профилактического подогрева контактной подвески для борьбы с гололедообразованием.

4.2 Алгоритм управления рисками из-за гололедообразования на участках контактной сети

При оценке эффективности продления срока службы в сфере электрификации и электроснабжения основной акцент, в соответствии с методикой ОАО «РЖД», делается на обеспечении минимальной стоимости жизненного цикла (СЖЦ) объектов контактной сети. Эта задача становится приоритетной при принятии решений о целесообразности экономического продления определенного срока службы объектов систем электрификации и электроснабжения.

Методология УРРАН включает в себя 13 этапов жизненного цикла (рисунок 4.6), разделяя их на 3 большие группы [53, 54, 56].

В плане задействованных этапов жизненного цикла, связанных с предупреждением гололедообразования на контактной подвеске, будут проведены следующие мероприятия:

1. Анализ риска – использование информации для определения источников и количественной оценки риска задержки поездов при гололедообразовании на участке контактной сети. Анализ риска обеспечивает базу данных для оценки риска образования гололеда: типы мероприятий, срок и время по снижению и принятию риска; выявления возможных альтернативных решений проблемы гололедообразования на участке контактной сети; определения наличия риска и потенциальных последствий, которые могут наступить в результате возникновения гололеда на элементах контактной сети.

2. Проектирование и реализация – принятие решения при проектировании и реализации скоростной и высокоскоростной железнодорожной магистрали на участке контактной сети, в том числе при выборе типа контактной подвески, максимальных длин пролетов, анкерных участков, поддерживающих конструкций и др.



Рисунок 4.6 – Основные этапы жизненного цикла контактной подвески, подвергшейся гололедообразованию

Для контактной сети участков, расположенных с толщиной стенки гололеда более 15 мм, недопустимым уровнем риска, а также с интенсивной пляской проводов требуется предусматривать плавку гололеда, конструкции и типы контактных подвесок, препятствующие автоколебаниям.

При выборе контактного провода и несущего троса, поддерживающих конструкций следует учитывать характеристики прочности проводов и действующих в данном районе гололедных нагрузок, расчетную толщину стенки гололеда, уровень риска, срок службы проводов и снижение прочности в эксплуатации с установкой специальных материалов, которые позволят сократить время профилактического подогрева проводов. Профилактический подогрев является щадящим режимом, поэтому должен происходить в течение всего зимнего периода.

При расчете длины анкерных участков компенсированной цепной подвески необходимо учитывать реакцию струн и фиксаторов, а также расположение кривых в анкерном участке с учетом принятых конструктивных параметров контакт-

ной подвески. Важно, чтобы изменение натяжения компенсированного контактного провода в пределах изменения температуры не превышало $\pm 10\%$ от номинального натяжения контактных проводов, которое обеспечивают компенсаторы. Длина анкерного участка на прямых участках скоростного движения (161 км/ч и выше) не должна превышать 1400 м.

Чтобы обеспечить гололедоустойчивость выбранной контактной подвески, необходимо правильно рассчитать длины пролетов. Поэтому справочные значения толщины стенки гололеда в зависимости от номера гололедного района влияют на результат расчета. При выявлении высокого риска отказа при условии гололедообразования рекомендуется уточнить значение толщины стенки гололеда. От длины пролетов будет зависеть стоимость сооружения и эксплуатации контактной сети. Поэтому при проектировании длина пролетов устанавливается максимальной.

Для решения задачи по обеспечению безопасности бесперебойного движения поездов и принятию мер по предупреждению гололедообразования на участках железнодорожных магистралей в сложных метеорологических условиях необходимо разработать соответствующий алгоритм последовательно выполняемых действий [83].

На основании вышеизложенного был разработан и предложен алгоритм управления рисками при гололедообразовании на участках контактной сети с учетом предложенной структуры матрицы рисков (рисунок 4.7), который будет состоять из четырех блоков.

Первый блок в схеме будет отвечать за достоверность полученной и собранной информации. В связи с тем что сбор данных занимает достаточно много времени, разделим блок на два этапа.

На первом этапе алгоритма определяется расчетная толщина стенки гололеда на проводах контактной сети. Если наша толщина равна или превышает 15 мм, то принимается аргументированное решение о проектировании участка высокоскоростной магистрали в части выбора контактной подвески.

На втором этапе первого блока алгоритма проводится установление факторов, которые способствуют возникновению аварий на контактной сети по причине гололедообразования. С помощью метеорологических станций производится проверка, когда были зафиксированы неблагоприятные условия данных факторов. Таким образом, заканчивается выполняемая работа первого блока алгоритма.

Работа второго блока алгоритма включает в себя следующие расчеты:

- 1) определение вероятности возникновения каждого опасного фактора на контактной сети вследствие образования гололеда;
- 2) определение дисперсии климатических и эксплуатационных факторов по степени их влияния на вероятность гололедообразования;
- 3) оценка вероятности отказа на каждом участке, определение по графу состояний и переходов контактной сети финальную вероятность отказа из-за гололедообразования на участке железнодорожной магистрали.

Работа третьего блока включает в себя оценку риска задержки поездов, установление требований по корректировке математической матрицы для каждого климатического района.

Автором диссертации произведена оценка уровня риска на участке железнодорожной магистрали, выявлен недопустимый уровень риска повреждения контактной подвески. При определении уровня риска, несоответствующего требованиям нормативно-технической документации, предлагается принимать решение о применении мероприятий по предупреждению гололедообразования на участке контактной сети [94].

Четвертый блок алгоритма включает в себя расчет стоимости жизненного цикла. Результаты разработанной методики оценки рисков гололедообразования на контактной сети позволили выявить, какие мероприятия по предупреждению и предотвращению гололеда необходимо применить на участках железнодорожных магистралей, где требуется исключить гололедообразование.

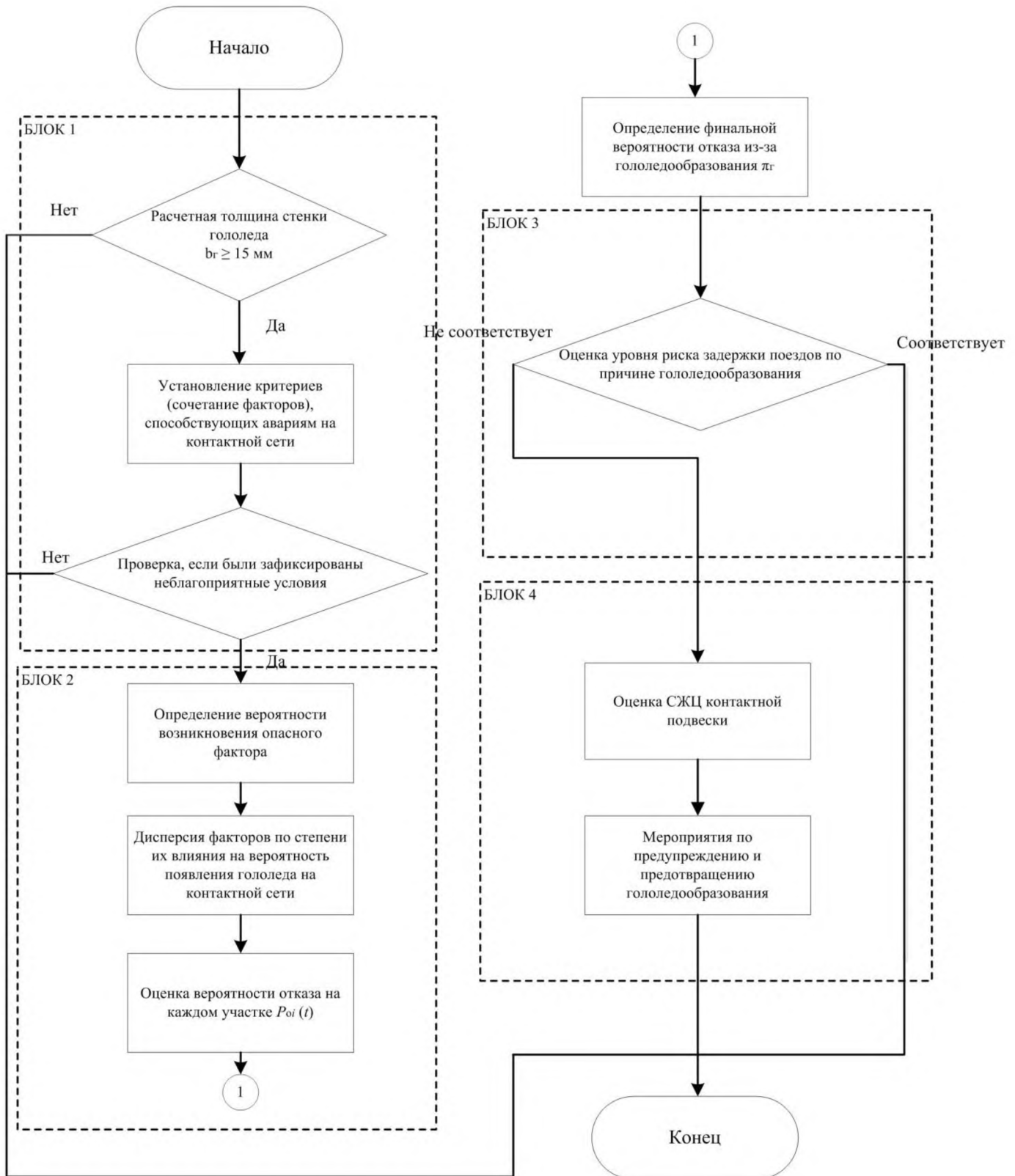


Рисунок 4.7 – Алгоритм управления рисками из-за гололедообразования на участках контактной сети

4.3 Расчет стоимости жизненного цикла контактной подвески с учетом выбора мероприятий по предупреждению гололедообразования

Непрерывный рост стоимости устройств контактной сети оказывает существенное воздействие на бюджет ремонтных работ, проводимых на инфраструктуре железнодорожного транспорта. При ограниченных финансовых ресурсах и сохранении их уровня год от года отмечается постепенное сокращение объемов работ. Вследствие этого возникают проблемы своевременности ремонтов различных элементов контактной сети, таких как участки пути и другие компоненты.

Стратегической целью инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» является эффективное сокращение стоимости жизненного цикла инфраструктурных объектов железнодорожного транспорта. Это стремление сопровождается высокой важностью обеспечения высокого уровня надежности и соответствия требованиям безопасности перевозочного процесса [48, 49, 60, 111].

В рамках методологии УРРАН осуществляется комплексный расчет стоимости жизненного цикла с целью обоснования экономической целесообразности мероприятий, направленных на уменьшение риска по обеспечению безопасности движения поездов на проводах и других устройствах контактной сети [57, 98].

Основу СЖЦ будут составлять затраты на приобретение контактной подвески и поддерживающих конструкций на участке железнодорожной магистрали, и затраты, связанные с восстановлением движения поездов в случае отказов устройств контактной сети вследствие гололедообразования [42, 74, 117].

Основой расчета стоимости жизненного цикла устройств контактной сети служат как единовременные (инвестиционные), так и текущие (эксплуатационные) расходы на протяжении всего срока службы. Важным фактором также являются ликвидационные расходы, связанные с выводом объекта из эксплуатации [12, 56].

Для оценки стоимости жизненного цикла участка железной дороги и контактной сети при применении мероприятий по предотвращению гололедообразования предлагается выполнить следующие шаги:

- определить структуру затрат на жизненный цикл контактной подвески;
- выявить факторы, влияющие на стоимость жизненного цикла;
- установить критерии для принятия окончательных решений по предупреждению гололедообразования на контактной подвеске.

Жизненный цикл контактной подвески в случае проведения мероприятий по предотвращению гололедообразования сопряжен с ценами на:

- разработку и проектирование (тип контактной подвески, тестирование, наладка);
- работы, направленные на ликвидацию последствий от отказов контактных подвесок по причине гололедообразования (антиобледенительное вещество *Defroster RW*);
- утилизацию контактной подвески.

Жизненный цикл контактной подвески в случае проведения мероприятий по предупреждению гололедообразования сопряжен с ценами на:

- разработку и проектирование (тип контактной подвески, тестирование, наладка);
- техническое обслуживание по восстановлению (датчики-преобразователи нагрузки на контактные провода, устройство приема-передачи информации на диспетчерский пункт, комплект программно-технического комплекса АИСКГН «БЛАЙС»);
- утилизацию контактной подвески.

К определению СЖЦ для вычисления затратных сумм на нужный год эксплуатации подходят при помощи коэффициента дисконтирования, позволяющего отслеживать скорость обесценивания стоимости основных фондов объектов контактной сети, зависящий от ставки дисконтирования [73, 75].

Коэффициент дисконтирования определяется из выражения:

$$\alpha_t = \frac{1}{(1 + E)^t} \quad (4.1)$$

где E – ставка дисконтирования.

Стоимость жизненного цикла сложных технических систем железнодорожного транспорта, в частности полной замены контактной подвески, определяется по формуле

$$\text{СЖЦ} = \text{Ц}_{\text{пр}} + \text{Ц}_{\text{у}} + \sum_{t=1}^T \text{Ц}_{\text{пто}} + \sum_{t=1}^T \text{Ц}_{\text{пвр}} + \sum_{t=1}^T \text{Ц}_{\text{по}}, \quad (4.2)$$

где $\text{Ц}_{\text{пр}}$ – цена на приобретение контактной подвески, руб.;

$\text{Ц}_{\text{у}}$ – цена на утилизацию, руб.;

$\text{Ц}_{\text{пто}}$ – цена на техническое обслуживание, руб.;

$\text{Ц}_{\text{пто}}$ – цена на плановые виды ремонта;

$\text{Ц}_{\text{по}}$ – цена, направленная на ликвидацию последствий от отказов по причине гололедообразования, руб.;

T – конечный год эксплуатации, лет;

t – текущий год эксплуатации, лет.

Стоимость жизненного цикла в случае применения мероприятий по предупреждению и предотвращению гололеда определяется по формуле

$$\text{СЖЦ} = \text{Ц}_{\text{пр}} + \text{Ц}_{\text{у}} + \sum_{t=1}^T \text{Ц}_{\text{пто}} + \sum_{t=1}^T \text{Ц}_{\text{по}}. \quad (4.3)$$

Годовые эксплуатационные расходы определяются из прямых материальных и трудовых затрат, а также расходов на содержание и эксплуатацию новой техники. Среднегодовую стоимость жизненного цикла оценивают по следующей формуле [84]:

$$СЖЦ_{сг} = \frac{СЖЦ}{\frac{1}{E} \cdot \left(1 - \frac{1}{(1+E)^T}\right)}. \quad (4.4)$$

В случае реконструкции в первую очередь вычисляется цена на приобретение контактной подвески:

$$Ц_{пр} = Ц_{нт} + Ц_{кп} + Ц_{стр} + Ц_{уст} + Ц_{дост}, \quad (4.5)$$

- где $Ц_{нт}$ – цена на приобретение несущего троса, руб.;
- $Ц_{кп}$ – цена на приобретение контактного провода, руб.;
- $Ц_{то}$ – цена на приобретение струн, руб.;
- $Ц_{шт}$ – цена на установку, руб.;
- $Ц_о$ – цена на доставку, руб.

Стоимость затрат на техническое обслуживание в случае применения мероприятий по предупреждению и предотвращению гололедообразования определяется по формуле

$$Ц_{то} = (Ц_{дт} + Ц_{ушт}), \quad (4.6)$$

- где $Ц_{дт}$ – цена на обслуживание датчиков-преобразователей, руб.;
- $Ц_{ушт}$ – цена на обслуживание устройства приема-передачи информации, руб.

После расчета цены на техническое обслуживание определяются приведенные затраты по формуле

$$Ц_{итго} = Ц_{то} \cdot \alpha. \quad (4.7)$$

Затраты на плановые виды ремонты определяются:

$$C_{\text{пвр}} = (C_{\text{тр}} + C_{\text{кр}}), \quad (4.8)$$

где $C_{\text{тр}}$ – цена на текущий ремонт контактной подвески, руб.;

$C_{\text{кр}}$ – цена на капитальный ремонт контактной подвески, руб.

Необходимо также учитывать появление аварийных ситуаций, связанных с отказами контактной подвески при условии гололедообразования (применение антиобледенительного вещества *Defroster RW*), поэтому при расчете стоимости жизненного цикла определяются затраты контактной подвески по следующей формуле:

$$C_0 = 24 \cdot t_{\text{от}} \cdot C_{\text{ав}}, \quad (4.9)$$

где $C_{\text{ав}}$ – цена на антиобледенительное вещество *Defroster RW*, руб.;

$$t_{\text{от}} = K_{\text{п}} \cdot \text{ФРВ}, \quad (4.10)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент простоя;

ФРВ – фонд рабочего времени.

$$C_{\text{ро}} = C_{\text{отказ}} \cdot 0,01, \quad (4.11)$$

где $C_{\text{отказ}}$ – цена на отказ.

После определения возможных затрат, вызванных отказом контактной подвески по причине гололедообразования, производится расчет приведенных затрат:

$$C_{\text{по}} = C_0 \cdot \alpha. \quad (4.12)$$

Цена, связанная с утилизацией контактной подвески, вычисляется по следующей формуле:

$$C_{\text{ут0}} = C_{\text{дем}} + C_{\text{вывоз}} + C_{\text{ут}}, \quad (4.13)$$

где $C_{\text{дем}}$ – цена монтажа, руб.;

$C_{\text{вывоз}}$ – цена вывоза, руб.;

$C_{\text{ут}}$ – цена утилизации, руб.

Далее определяются затраты, связанные с утилизацией в конце срока службы контактной подвески:

$$C_{\text{ут}} = C_{\text{ут0}} \cdot \alpha. \quad (4.14)$$

Итогом расчета СЖЦ в случае предупреждения и предотвращения гололедообразования при существующем уровне риска задержки поездов на рассматриваемом участке контактной сети получаются затраты, равные 201,8 млн руб.

Таким образом, при выполненном расчете СЖЦ целесообразно спроектировать участок контактной сети, применив мероприятия по предупреждению гололедообразования на основании существующего уровня риска.

Все четыре блока в алгоритме описывают этапы жизненного цикла контактной подвески из общего их количества, принятых в методологии УРРАН. Поэтому работа предложенного алгоритма управления рисками из-за гололедообразования будет учитывать ЖЦ на участке контактной сети.

Выводы по четвертой главе

1. Скорректирован дорожный оперативный план действий эксплуатационного персонала при образовании гололеда на устройствах контактной сети, по которому можно спланировать время и типы мероприятий по предупреждению гололедообразования на контактной сети.

2. Разработан алгоритм управления рисками из-за гололедообразования, при помощи которого возможно оценить состояние устройств контактной сети вследствие образования гололеда и возможные риски от их отказа, повысить надежность работы участка железнодорожной магистрали, где требуется исключить гололедообразования и оценить экономическую эффективность применяемых мероприятий по предупреждению гололедообразования.

3. Выполнен расчет стоимости жизненного цикла контактной подвески с применением мероприятий по предупреждению и предотвращению гололедообразования. Среднегодовая стоимость жизненного цикла составила 201,8 млн руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе применения методов теории вероятности, математической статистики, расчетов разработанной математической модели дано новое решение актуальной научно-технической задачи по методике оценки рисков гололедообразования.

Проведенные научные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. На основании проведенного статистического анализа устройств контактной сети по причине гололедообразования разработана структурная схема надежности контактной сети при токосъеме. Проведен риск-анализ, позволяющий применять методику оценки риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на различных участках контактной сети.

2. Разработанная математическая многофакторная модель в виде марковского процесса отказов устройств контактной сети позволяет определять риск по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на железнодорожных участках. Определена финальная вероятность отказа контактной сети из-за гололедообразования на рассматриваемом участке железнодорожной магистрали $\pi_r = 0,817$. Полученные результаты проверены на разработанной математической модели в *MatlabSimulink*.

3. Определен перечень нежелательных событий и установлены шкалы частот и последствий в матрице оценки риска для обеспечения безопасности движения поездов при гололедообразовании. Риск повреждения контактной подвески был признан недопустимым на двух участках («Е-С» – $R_1 = 3,4$; «С-Сн» – $R_2 = 4,3$). Это обосновывает необходимость пересмотра температурных режимов во II гололедном районе на этих участках, и их учет при проектировании и дальнейшей эксплуатации контактной сети.

4. Разработанный алгоритм управления рисками из-за гололедообразования

для рассматриваемого участка железнодорожной магистрали включает в себя необходимую последовательность действий по оценке риска задержки поездов, устанавливает требования по корректировке матрицы для каждого климатического района и определяет выбор необходимого мероприятия по предупреждению гололедообразования с учетом оценки стоимости жизненного цикла контактной подвески.

5. По итогам применения алгоритма управления рисками на участке «Е-Ч» предложено:

1) использовать на контактных подвесках комплект программно-технического комплекса АИСКГН «БЛАЙС» для раннего обнаружения образования гололеда на контактной сети;

2) наносить на провода во время эксплуатации антиобледенительное вещество *Defroster RW* для предотвращения отложения гололеда.

Перспектива дальнейшей разработки по теме исследования – применение программных средств на основе нейронных сетей, позволяющих самостоятельно проводить оценку вероятности возникновения гололедообразования на устройствах контактной сети для выбранных участков железнодорожных магистралей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ производственно-хозяйственной деятельности свердловской дирекции по энергообеспечению ТРАНСЭНЕРГО в 2019 году, филиала ОАО «РЖД». – М., 2019. – 148 с.
2. Анализ производственно-хозяйственной деятельности свердловской дирекции ТРАНСЭНЕРГО в 2020 году, филиала ОАО «РЖД». – М., 2020. – 197 с.
3. Анализ производственно-хозяйственной деятельности свердловской дирекции ТРАНСЭНЕРГО в 2021 году, филиала ОАО «РЖД». – М., 2021. – 205 с.
4. Анализ производственно-хозяйственной деятельности свердловской дирекции ТРАНСЭНЕРГО в 2022 году, филиала ОАО «РЖД». – М., 2022. – 184 с.
5. Андрюков, А. В. Анализ отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования / А. В. Андрюков // Инновационный транспорт. – 2023. – № 4(50). – С. 33-38.
6. Беляев, И. А. Устройства контактной сети на зарубежных дорогах / И. А. Беляев. – М. : Транспорт, 1991. – 192 с.
7. Беляев, И. А. Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении / И. А. Беляев. – М. : Транспорт, 1989. – 144 с. – ISBN 5-277-00549-8.
8. Бережная, Е. В. Математические методы моделирования экономических систем : учебное пособие / Е. В. Бережная, В. И. Бережной. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 2006. – 432 с.
9. Бродкорп, А. Планирование ремонта и технического обслуживания контактной сети с применением вычислительной техники / А. Бродкорп // Ж.-д. трансп. за рубежом. Сер. Электрификация. Автоматика и связь. АСУ : ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 1992. – Вып. 10. – С. 5-9.
10. Бунзя, А. В. Разработка устройства удаления гололеда с двойного контактного провода импульсно-резонансным методом на основе управляемого пре-

образователя : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Бунзя Андрей Вадимович. – Екатеринбург, 2007. – 185 с.

11. Вологин, В. А. Обеспечение надежного токосъема в зоне ИССО безувеличения габарита при повышении скорости движения / В. А. Вологин. – М., 2001. – 34 с.

12. Галкин, А. Г. Применение контракта жизненного цикла для инфраструктурного комплекса системы токосъема / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава // Транспорт Урала. – 2012. – № 3 (34). – С. 85-89.

13. Галкин, А. Г. Математическое моделирование и информационные технологии в задачах диагностики контактной сети электрифицированных железных дорог / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов. – Екатеринбург, 2012.

14. Галкин, А. Г. Модель комплексной транспортной услуги как перспектива развития грузовых перевозок / А. Г. Галкин, В. В. Зубков, Н. Ф. Сирина // Транспорт Урала. – 2018. – № 1 (56). – С. 7-11.

15. Галкин, А. Г. Обслуживание опор контактной сети / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев // Транспорт Урала. – 2008. – № 1 (16). – С. 60-64.

16. Галкин, А. Г. Основы теории надежности : конспект лекций / А. Г. Галкин, А. А. Ковалев. – Екатеринбург, 2010.

17. Галкин, А. Г. Теоретические принципы построения модели риск-анализа процессов содержания объектов инфраструктуры ОАО «РЖД» / А. Г. Галкин, С. А. Митрофанов // Известия Академии управления: теория, стратегии, инновации. – 2011. – № 3. – С. 29-39.

18. Галкин, А. Г. Методика проведения риск-анализа и прогнозирования показателей качества состояния контактной сети / А. Г. Галкин, А. Н. Митрофанов, С. А. Митрофанов // Вестник Самарского муниципального института управления. – 2011. – № 3 (18). – С. 172-182.

19. Галкин, А. Г. Теория и методы расчетов процессов проектирования и технического обслуживания контактной сети : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Галкин Александр Геннадьевич. – Екатеринбург, 2012. – 370 с.

20. Гликман, А. С. Прогнозирование аварийного состояния объектов [Элек-

тронный ресурс] / А. С. Гликман // Технауцпром. – URL: http://www.ftnp.ru/prognoz_avariy.htm (дата обращения 26.06.2019).

21. Гордон, Ш. Контактные подвески линий TGV / Ш. Гордон // Железные дороги мира. – 1991. – № 4. – С. 14-17.

22. ГОСТ Р 8.736–2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2013. – 24 с.

23. Демченко, А. Т. Пространственные контактные подвески / А. Т. Демченко. – М. : Транспорт, 1991. – 175 с.

24. Дитрих, Г. Подготовка и проведение работ по техническому содержанию контактной сети / Г. Дитрих // Ж.-д. трансп. за рубежом. Сер. Электрификация. Автоматика и связь. АСУ: ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 1992. – Вып. 10. – С. 9-14.

25. Добрынин, Е. В. Контроль обледенения проводов линий электропередач / Е. В. Добрынин, А. М. Батищев, М. А. Гузитаева // Нефть. Газ. Новации. – 2021. – № 9(250). – С. 89-93.

26. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог : учеб. для студентов вузов ж.-д. трансп. / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – М. : УМК МПС России, 2000. – 510 с.

27. Ефимов, А. В. Роль информации об отказах в управлении системой электроснабжения электрических железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин // Повышение эффективности и надежности устройств электроснабжения : сб. науч. тр. – М. : МИИТ, 1988. – Вып. 788. – С. 78-84.

28. Железные дороги мира : сборник статей. – М. : № 3, 2010. – С. 9-22.

29. Журкин, В. В. Контактная сеть высокоскоростной магистрали Москва – Санкт-Петербург: технические требования и основные технические решения / В. В. Журкин, Е. В. Кудряшов, В. В. Мунькин // Материалы V междунар. симпозиума «Элтранс-2009»: Электрификация, инновационные технологии, скоростное и высокоскоростное движение на железнодорожном транспорте. – СПб. : ПГУПС. – 2010. – С. 99-103.

30. Замышляев, А. М. Автоматизация процессов комплексного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта : дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06 / Замышляев Алексей Михайлович. – М., 2013. – 308 с.
31. Замышляев, А. М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте / А. М. Замышляев. – Ульяновск, 2013. – 143 с.
32. Замышляев, А. М. Применение алгоритмов искусственного интеллекта при прогнозировании опасных отказов в путевом комплексе / А. М. Замышляев, И. Б. Шубинский // Железнодорожный транспорт, – 2020. – № 12. – С. 38-43.
33. Замышляев, А. М. Развитие проекта УРРАН – построение системы управления техническими активами / А. М. Замышляев, И. Б. Шубинский // Железнодорожный транспорт. – 2020. – № 12. – С. 38-43.
34. Замышляев, А. М. УРРАН – система управления техническими активами на железнодорожном транспорте / А. М. Замышляев, И. Б. Шубинский, М. А. Бубликова // Труды АО «НИИАС». – М. : Изд-во Типография АО «Т8 Издательские Технологии». – 2021. – С. 67-82 с.
35. Игнатенко, И. В. Оценка уровня цифровизации электроэнергетической инфраструктуры железнодорожного транспорта / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Е. Ю. Тряпкин // Учетные записи Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2022. – № 7 (63). – С. 23-32.
36. Игнатенко, И. В. Системы мониторинга воздушных линий электропередач как способ увеличения пропускной способности и обнаружения гололедообразования / И. В. Игнатенко, Е. А. Воробьев // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы V Всероссийской национальной науч. конф. молодых ученых. – 2022. – С. 114-115.
37. Карпелевич, Ф. И. Элементы линейной алгебры и линейного программирования / Ф. И. Карпелевич, Л. Е. Садовский. – М. : Изд-во Физико-математической литературы, 1963. – 275 с.

38. Кисслинг, Ф. Контактные сети электрифицированных железных дорог. Проектирование. Расчет. Сооружение. Монтаж. Эксплуатация / Ф. Кисслинг, Р. Пушман, А. Шмидер. – М. : Сименс Россия, 2018. – 1176 с.

39. Ковалев, А. А. Анализ надежности устройств контактной сети на участке «Екатеринбург – Челябинск» / А. А. Ковалев, А. В. Андрюков // Инновационный транспорт. – 2021. – № 2 (40). – С. 54-58.

40. Ковалев, А. А. Оценка влияния стрел провеса контактного провода на возможность повышения скорости движения на участке контактной сети «Екатеринбург–Челябинск» / А. А. Ковалев, А. В. Андрюков // Транспорт Урала, 2023 – № 1 (76). – С. 116-119.

41. Ковалев, А. А. Исследование надежности работы устройств контактной сети железных дорог в условиях гололедообразования / А. А. Ковалев, А. В. Андрюков // Известия Транссиба. – 2023. – № 4 (56). – С. 9-18.

42. Ковалев, А. А. Определение стоимости жизненного цикла сложных технических систем / А. А. Ковалев, А. В. Микава, А. В. Окунев // Управление экономическими системами : электронный научный журнал. – 2013. – № 2 (50). – С. 15.

43. Ковалев, А. А. Прогноз эксплуатационной надежности опор контактной сети / А. А. Ковалев // Электрика. – 2008. – № 1. – С. 39.

44. Ковалев, А. А. Развитие инфраструктурного комплекса системы токосъема / А. А. Ковалев // Инновационный транспорт. – 2013. – № 2 (8). – С. 43-46.

45. Ковалев, А. А. Испытание компенсирующего устройства со встроенным тормозом при проведении по плавке гололеда на проводах контактной подвески / А. А. Ковалев, Н. В. Крапивин, А. А. Кардаполов // Инновационный транспорт. – 2020. – №2 (36). – С. 57-60.

46. Ковалев, А. А. Применение высокотехнологичного покрытия для защиты системы токосъема в условиях воздействия внешней среды / А. А. Ковалев, А. А. Кардаполов // Инновационный транспорт. – 2012. – №2 (3). – С. 8-11.

47. Ковалев, А. А. Разработка технологии борьбы с гололедообразованием на контактных проводах промышленного железнодорожного транспорта / А. А. Ковалев, Ф. С. Несмелов, А. А. Кардаполов // Промышленная энергетика. – 2011. – №10. – С. 26-29.
48. Ковалев, А. А. Определение максимальной продолжительности жизненного цикла консолей контактной сети / А. А. Ковалев, А. В. Микава // Транспорт Урала. – 2019. №4 (63). С. 86-90.
49. Ковалев, А. А. Теория и методы расчета стоимостных показателей системы токосъема на протяжении жизненного цикла : монография / А. А. Ковалев, А. Г. Галкин. – Екатеринбург : УрГУПС, 2015. – 115 с.
50. Ковалев, А. А. Оценка риска отказа участка контактной сети / А. А. Ковалев, Т. Т. Шаюхов // Транспортное дело России. – 2015. – № 5. – С. 142-145.
51. Ковалев, А. А. Разработка структуры матрицы рисков для оценки гололедообразования на участке контактной сети / А. А. Ковалев, А. В. Андрюков // Вестник транспорта Поволжья. – 2023. – № 6(102). – С. 7-15.
52. Комплексное внедрение инноваций на железнодорожном транспорте России / А. А. Ковалев, Ф. С. Несмелов, А. В. Микава, А. А. Кардаполов, Н. А. Исаков // Транспортное дело России. – 2013. – № 4. – С. 24-26.
53. Контракт жизненного цикла [Электронный ресурс] / ОАО «Скоростные магистрали». – М., 2012. – URL: <http://www.hsrail.ru/press-center/news/150.html> (дата обращения 26.06.2019).
54. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте (редакция 1.1). – М. : ОАО «РЖД», 2010. – 132 с.
55. Коптев, А. А. Монтаж контактной сети переменного тока / А. А. Коптев. – М. : Транспорт, 1965. – 148 с.
56. Кострикин, К. О. Стоимость жизненного цикла железнодорожного подвижного состава / К. О. Кострикин, И. А. Скок // Экономика железных дорог. – 2012. – № 1. – С. 32-41.
57. Кудряшов, Е. В. Технические решения и опыт адаптации контактной се-

ти КС-200 для скоростей движения 250 км/ч на экспериментальных анкерных участках / Е. В. Кудряшов, В. В. Журкин, А. Ю. Харитонов // Материалы III международного симпозиума. «Элтранс-2005»: Электрификация и развитие энергосберегающей инфраструктуры и электроподвижного состава на железнодорожном транспорте. – СПб. : ПГУПС, 2007. – С. 241-248.

58. Марквардт, К. Г. Контактная сеть : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1994 – 335 с.

59. Методика оценки рисков для контактной сети. – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 40 с.

60. Методика оценки эффективности продления срока службы основных средств хозяйства электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД» на основе методологии УРРАН. – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 57 с.

61. Методика расчета показателей надежности и безопасности функционирования контактной сети. – М. : ОАО «РЖД», 2012. – 61 с.

62. Митрофанов, С. А. Применение теории рисков для совершенствования показателей качества содержания контактной сети / С. А. Митрофанов, А. Г. Галкин // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1 (15). – С. 66-70.

63. Митрофанов, С. А. Анализ, планирование и управление производственно-экономической деятельностью функциональных филиалов ОАО «РЖД» / С. А. Митрофанов, А. Н. Митрофанов, А. Г. Галкин // Вестник СамГУПС. – 2015. – № 1 (27). – С. 33-36.

64. Митрофанов, С. А. Анализ и проблемы использования методики возникновения и предупреждения происшествий и событий на контактной сети» / С. А. Митрофанов, А. Н. Митрофанов // Актуальные проблемы проектирования и эксплуатации контактных подвесок и токоприемника электрического транспорта. Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием. – 2011. – № 1 – С. 101-109.

65. Митрофанов, С. А. Применение теории рисков для совершенствования показателей качества содержания контактной сети / С. А. Митрофанов, А. Н. Митрофанов, Д. В. Волгушев // Вестник Самарского муниципального института

управления. – 2011. – № 1 (16). – С. 168-177.

66. Мишарин, А. С. Высокоскоростной железнодорожный транспорт как ключевой фактор развития транспортной системы России / А. С. Мишарин // Транспорт Российской Федерации. – 2015. – № 2(57). – С. 7-10.

67. Мишарин, А. С. Транспортная стратегия Российской Федерации: цели и приоритеты / А. С. Мишарин // Инновационный транспорт. – 2015. – № 1(15). – С. 3-7.

68. Мишарин, А. С. Развитие скоростного и высокоскоростного железнодорожного транспорта / А. С. Мишарин // Железнодорожный транспорт. – 2013. – № 7. – С. 6-9.

69. Михеев, В. П. Контактные сети и линии электропередачи : учебник для вузов железнодорожного транспорта / В. П. Михеев. – М. : Маршрут, 2003. – 416 с.

70. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным: РД 50-690-89. Введены в действие 1991-01-01. – М. : Издательство стандартов, 1990. – 132 с.

71. Нормы по производству и приемке строительных и монтажных работ при электрификации железных дорог (устройства контактной сети). СТН ЦЭ 12 – 00. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 2000. – 88 с.

72. Нормы проектирования контактной сети. СТН ЦЭ 141–99. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 2001. – 253 с.

73. Окунев А. В. Надежность опор контактной сети на протяжении жизненного цикла / А. В. Окунев, Д. В. Яковлев // Инновационный транспорт. – 2017. – С. 112-119.

74. Окунев, А. В. Применение спиральной модели жизненного цикла для разработки инновационного программного продукта / А. В. Окунев, А. В. Микава, А. А. Ковалев // Инновации и инвестиции. – 2013. – № 4. – С. 19-23.

75. Окунев А. В. Определение стоимости жизненного цикла сложных технических систем / А. В. Окунев, А. В. Микава, А. А. Ковалев // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. – 2013. – № 50. – С. 15-19.

76. Окунев, А. В. Разработка комплексного подхода к диагностике опор контактной сети на этапе эксплуатации : дис. ... на соиск. уч. ст. канд. техн. наук / Окунев Александр Владимирович, 2020. – 266 с.

77. О методе обеспечения функциональной безопасности системы с одноканальной обработкой информации / И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг, А. С. Коровин, Н. Г. Пенькова // Надежность. – 2022. – Т. 22, № 3. – С. 44-52.

78. Определение токовых нагрузок воздушных линий электропередачи разной длительности с учетом климатических факторов / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, Е. Ю. Тряпкин [и др.] // Транспорт Азиатско-Тихоокеанского региона. – 2023. – № 1 (34). – С. 51–57.

79. Основные данные по климату СССР. Комплексные характеристики температуры и относительной влажности в совокупности за год. – Обнинск : ВНИИ-ГМИ-МЦД, 1975. – 106 с.

80. Панфиль, Л. С. Определение эксплуатационной надежности контактной сети : сб. науч. тр. / Л. С. Панфиль // Повышение надежности устройств энергоснабжения на Зап.-Сиб. ж. д. – М. : ВНИИЖТ, 1966. – Вып. 319. – С. 92-95.

81. Панфиль, Л. С. Эксплуатационная надежность контактной сети / Л. С. Панфиль // Ж.-д. трансп. Сер. Электрификация и энергетическое хозяйство: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. – 1973. – Вып 3 (77). – 16 с.

82. Порцелан, А. А. Борьба с гололедом на электрифицированных железных дорог. / А. А. Порцелан, И. В. Павлов, А. А. Неганов // М. : Транспорт, 1970. – 152 с.

83. ПМГ 96-2009 «ГСИ. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления». – М. : Стандартинформ, 2010. – 5 с.

84. Положение о корпоративной системе оплаты труда работников филиалов и структурных подразделений ОАО «РЖД». – М. : ОАО «РЖД», 2007. – С. 61.

85. Правила содержания контактной сети, питающих линий, отсасывающих линий и линий электропередачи. Утв распоряжением ОАО «РЖД» №753 от 25.04.2016.

86. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. ЦЭ-868. Департамент электрификации и электр

троснабжения. – М. : Трансиздат, 2001. – 184 с.

87. Применение байесовских сетей для совершенствования систем диагностики устройств электроснабжения железных дорог / А. С. Голубков, А. Н. Смердин, Г. Р. Ермачков, А. В. Рыжков // *Фундаментальные основы, теория, методы и средства измерений, контроля и диагностики : материалы XVIII междунар. молодежной науч.-практ. конф.* – 2017. – С. 173-182.

88. Применение вольтодобавочных устройств для плавки гололеда / Е. В. Добрынин, Т. В. Бошкарева, О. В. Табаков, К. В. Титоренко // *Наука и образование транспорту.* – 2019. – № 1. – С. 365-368.

89. Проект 32-07. Конструктивные решения устройств контактной сети для постоянного тока для скорости движения до 250 км/ч // ЗАО «Универсал – контактные сети». – СПб., 2007. – 205 с.

90. Проекты скоростного транспорта «РЖД» : ВСЖМ-1 [Электронный ресурс] / ОАО «Российские железные дороги» – М., 2012.

91. Пути повышения надежности токосъема при высоких скоростях движения / О. А. Сидоров, А. А. Орлов, А. И. Слатин, М. С. Михайлов // *Разработка и эксплуатация электротехнических комплексов и систем энергетики и наземного транспорта : материалы III междунар. науч.-практ. конф.* – 2018. – С. 306-310.

92. Разработка вероятностной модели прогнозирования отказов в работе системы токосъема вследствие гололедообразования на проводах контактной сети / А. Н. Смердин, А. В. Тарасенко, И. Е. Чертков, А. С. Голубков // *Известия Транссиба.* – 2021. – № 2(46). – С. 62-71.

93. Разработка контактной сети для ВСМ России / В. А. Иванов, А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, Е. В. Кудряшов // *Инновационный транспорта.* – 2011. – № 1 (1). – С. 16-21 с.

94. Разработка метода расчета жизненного цикла контактной подвески / А. В. Окунев, А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. В. Микава // *Транспорт Урала.* – 2013. – №3 (38). – С. 99-102.

95. Разработка устройств непрерывного контроля технического состояния контактной сети на основе современных технических решений / О. А. Сидоров, А.

Н. Смердин, Е. А. Бутенко [и др.] // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 4. – С. 118-124.

96. Распоряжение ОАО «РЖД» от 21.09.2011 № 2068р «Об утверждении стандартов и методик ОАО «РЖД», развитие системы управления безопасностью движения на основе анализа рисков, методов и инструментов технического аудита». – М., 2019. – 55 с.

97. Распоряжение ОАО «РЖД» от 22.09.2016 № 1946р «Об утверждении методических рекомендаций по построению матрицы рисков». – М., 2016. – 72 с.

98. Распоряжение ОАО «РЖД» от 27.12.2007 № 2359р «О методике определения стоимости жизненного цикла и лимитной цены сложных технических систем.

99. Розенберг, Е. Н. Определение опасности возникновения транспортных происшествий и событий на основе контроле состояния факторов, влияющих на их возникновение / Е. Н. Розенберг, А. М. Замышляев, Г. Б. Прошин // Надежность. – 2009. – № 3 (30). – С. 37-50.

100. Розенберг Е. Н. Построение систем и обеспечения безопасности движения поездов на ВСМ / Е. Н. Розенберг, А. В. Озеров // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 3– С. 34-41.

101. Розенберг Е. Н. УРРАН: Новая модель управления рисками / Е. Н. Розенберг // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2016. – № 2 (34). – С. 20-24.

102. Российская система управления и обеспечения безопасности движения поездов на ВСЖМ-1 Москва-Санкт-Петербург / Е. Н. Розенберг, А. Г. Баранов, А. Д. Сметанина, В. С. Лобанова // Железнодорожный транспорт. – 2023. – № 8. – С. 26-29.

103. Сердинов, С. М. Повышение надежности устройств электроснабжения электрифицированных железных дорог / С. М. Сердинов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1985 – 301 с.

104. Сидоров, О. А. Влияние поддерживающих конструкций на эксплуатационную надежность контактной подвески / О. А. Сидоров, О. А. Лукьянова, И.

Л. Саля // Фундаментальные исследования, методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике : материалы XVII междунар. молодежной науч.-практ. конф. – 2018. – С. 151-158.

105. Сидоров, О. А. Совершенствование вероятностных моделей прогнозирования отказов элементов инфраструктуры электроснабжения железных дорог / О. А. Сидоров, А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Известия Транссиба. – 2017. – № 3(31). – С. 123-132.

106. Смердин, А. Н. Совершенствование программно-аппаратного комплекса мониторинга и диагностики контактной сети / А. Н. Смердин, Е. А. Бутенко, Г. Р. Ермачков // Вестник транспорта Поволжья. – 2020. – № 5 (83). – С. 23-28.

107. Смердин, А. Н. Совершенствование методики исследования акустического загрязнения от подвижного состава железных дорог/ А. Н. Смердин, А. Е. Чепурко // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы XLI междунар. науч.-практ. конф. – 2017. – С. 316-318.

108. Смердин, А. Н. Совершенствование методики диагностирования устройств электроснабжения железнодорожного транспорта с помощью байесовских сетей / А. Н. Смердин, А. С. Голубков // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика : материалы XLI междунар. науч.-практ. конф. ; под ред. Б. М. Ибраева. – 2017. – С. 50-53.

109. Специальные технические условия. Проектирование участка Москва–Казань высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва–Казань–Екатеринбург со скоростями движения до 400 км/ч. – М., 2013. – 75 с.

110. П 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 74 с.

111. Стандарт ОАО «РЖД» 1.05.509.15-2008. Руководство по оценке стоимости жизненного цикла продукции (LCC)». – М., 2008. – 13 с.

112. Стандарт ОАО «РЖД» 02.038-2011. Риск-менеджмент в организации обеспечения безопасности движения» – М., 2011. – 15 с.

113. Стандарт ОАО «РЖД» 1.02.021-2009. Безопасность высокоскоростного железнодорожного транспорта. Требования по обеспечению безопасности тяго-

вых подстанций. – М., 2009. – 16 с.

114. Стандарт ОАО «РЖД» 1.02.035-2010. Управление ресурсами на этапах жизненного цикла, рисками и анализом надежности (УРРАН). Порядок определения допустимого уровня риска. – М., 2010. – 13 с.

115. Стандарт ОАО «РЖД» 02.037-2011. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Управление стоимостью жизненного цикла систем, устройств и оборудования хозяйств ОАО «РЖД». – М., 2011. – 4 с.

116. Стандарт ОАО «РЖД» 02.036-2014 Классификация инцидентов, вызывающих нарушения графика движения поездов. – М., 2014. – 8 с.

117. Ташевский, А. Г. Математические модели продолжительности жизненного цикла технических систем / А. Г. Ташевский // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 1 (190). – С. 169-178.

118. Технологические карты на работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог. – Кн. I. Капитальный ремонт. ЦЭ № 197-5/3. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 1997. – 311 с.

119. Требования к оценке надежности поддерживающих конструкций несущего и контактного провода / А. А. Ковалев, А. В. Окунев, А. В. Микава, Н. В. Крапивин // Транспорт Урала. – 2020. – №2 (65). – С. 98-102.

120. Хан, Г. Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – М. : Мир, 1969. – 345 с.

121. Чекулаев, В. Е., Восстановление контактной сети и воздушных линий / В. Е. Чекулаев, А. И. Зайцев. – М. : Транспорт, 1992. – 128 с.

122. Чучев, А. П. Контактная сеть с унифицированными параметрами / А. П. Чучев. – М. : ВПТИтрансстрой, 1988. – 14 с.

123. Чучев, А. П. Вклад ЦНИИС в электрификацию отечественных железных дорог / А. П. Чучев, В. П. Шурыгин // Транспортное строительство. – 1995. – № 11-12. – С. 19-22.

124. Шубинский, И. Б. Метод нормирования показателей надежности объектов железнодорожного транспорта / И. Б. Шубинский, Е. О. Новожилов // Надежность. – 2019. – Т.19, № 4(71). – С. 17-23.

125. Шубинский, И. Б. Основные научные и практические результаты разработки системы УРРАН / И. Б. Шубинский, А. М. Замышляев // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10. – С. 23-28.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РАСЧЕТ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МНОГОФАКТОРНОЙ МОДЕЛИ
В ПРОГРАММНОМ ОБЕСПЕЧЕНИИ *MATLAB*

Для решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) в *MATLAB* можно использовать численные методы. Программа может выполнять последовательность действий, сохраненных на диске в виде файлов. Такие файлы мы будем называть *M*-файлами. Основная часть работы в *MATLAB* связана с созданием, редактированием и выполнением *M*-файлов. Существует два типа *M*-файлов: файлы-сценарии (*M*-сценарии) и файлы-функции (*M*-функции).

Порядок решения дифференциального уравнения в программе *MATLAB*:

1) создается *M*-функция с описанием правых частей дифференциальных уравнений;

2) создается *M*-сценарий с выбранным решателем.

Создадим *M*-функцию для системы уравнений (рисунок А.1). Обозначим функцию переменной *du*.

```

1 function du=odu2(t,p)
2 du=[-3.25*p(1)+0.5*p(2)+0.8*p(3)+1*p(4)+1*p(5)+0.2*p(6)+1*p(7)+0.2*p(8)+0.05*p(9);
3     0.25*p(1)-0.5*p(2);
4     0.5*p(1)-0.8*p(3);
5     1*p(1)-1*p(4);
6     0.6*p(1)-1*p(5);
7     0.15*p(1)-0.2*p(6);
8     0.6*p(1)-1*p(7);
9     0.1*p(1)-0.2*p(8);
10    0.05*p(1)-0.05*p(9);]
11 end

```

Рисунок А.1 – *M*-функция системы уравнений

В записи на рисунке 2.13 отображается правая часть системы. Строки разделяются точкой с запятой. Символ *P* выступает в роли переменной. В круглых скобках записывается ее порядковый номер. Значению $P(1)$ соответствует $P_0(t)$, $P(2) - P_1(t)$ и т. д.

В *MATLAB* для решения обыкновенных дифференциальных уравнений предусмотрены специальные функции-решатели:

$$[t, P] = \text{ode23}(\text{'<имя функции>'}, T, pn);$$

$$[t, P] = \text{ode45}(\text{'<имя функции>'}, T, pn).$$

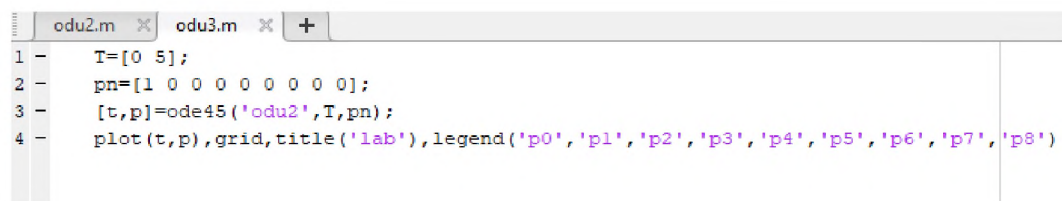
Входные параметры:

- 1) <имя функции> – строковая переменная, являющаяся именем M -файла, в котором вычисляются правые части ОДУ;
- 2) T – интервал интегрирования системы дифференциальных уравнений;
- 3) pn – вектор начальных условий для вероятностей состояний $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$, $P_3(t)$, $P_4(t)$, $P_5(t)$, $P_6(t)$, $P_7(t)$, $P_8(t)$.

Выходные параметры:

- 1) t – текущее время;
- 2) P – многомерный массив.

Повторив те же самые действия, что и для M -функции, создается M -сценарий в отдельном файле. Текст такого сценария представлен на рисунке А.2.



```

1 - T=[0 5];
2 - pn=[1 0 0 0 0 0 0 0 0];
3 - [t,p]=ode45('odu2',T,pn);
4 - plot(t,p),grid,title('lab'),legend('p0','p1','p2','p3','p4','p5','p6','p7','p8')

```

Рисунок А.2 – M -сценарий системы уравнений

В первой строке выражения задается интервал интегрирования от 0 до 4 (срок службы устройств контактной сети), который зависит от интенсивности отказов и восстановлений. Конкретные значения определяются методом последовательного приближения.

Во второй строке определяются начальные условия, которые задаются последовательностью 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.

Третья строка вызывает решатель *ode45*. С помощью функции *plot* задаются оси координат для построения графика функции надежности $P(t)$. Функция *grid* строит на графике сетку. *Title* выводит название графика, а функция *legend* служит для задания названий графикам функции.

Таблица А1 – Вероятности состояний устройств контактной сети на исследуемом участке железнодорожной магистрали

P_0	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8
1	0	0	0	0	0	0	0	0
0,9998	1,26e-05	2,41e-05	5,02e-05	3,01e-05	7,56e-06	3,01e-05	5,02e-06	2,51e-06
0,9997	2,51e-05	5,02e-05	0,0001	6,03e-05	1,51e-05	6,03e-05	1,01e-05	5,02e-06
0,9995	3,78e-05	7,53e-05	0,0002	9,04e-05	2,26e-05	9,04e-05	1,51e-05	7,53e-06
0,9993	5,02e-05	1,00e-04	0,0002	0,0001	3,01e-05	0,0001	2,01e-05	1,00e-05
0,9985	1,13e-04	2,26e-04	0,0005	0,0003	6,76e-05	0,0003	4,52e-05	2,26e-05
0,9977	1,76e-04	3,51e-04	0,0007	0,0004	0,0001	0,0004	7,03e-05	3,51e-05
0,9969	2,38e-04	4,76e-04	0,001	0,0006	0,00014	0,0006	9,53e-05	4,77e-05
0,9961	3,01e-04	6,01e-04	0,0012	0,0007	0,0002	0,0007	0,0001	6,02e-05
0,9920	6,13e-04	0,0012	0,0024	0,0015	0,0004	0,0015	0,0002	0,0001
0,9880	9,23e-04	0,0018	0,0037	0,0022	0,0006	0,0022	0,0004	0,0002
0,9840	0,0012	0,0025	0,0049	0,0030	0,0007	0,0030	0,0005	0,00024
0,9800	0,0015	0,0031	0,0061	0,0037	0,0009	0,0037	0,0006	0,0003
0,9604	0,0031	0,0061	0,0122	0,0073	0,0018	0,0073	0,0012	0,0006
0,9412	0,0045	0,0090	0,0181	0,0108	0,0027	0,0108	0,0018	0,0009
0,9226	0,0060	0,0119	0,0238	0,0143	0,0036	0,0143	0,0024	0,0012
0,9044	0,0074	0,0147	0,0293	0,0176	0,0045	0,0176	0,0030	0,0015
0,8202	0,0140	0,0277	0,0551	0,0330	0,0085	0,0330	0,0057	0,0028
0,7462	0,0199	0,0392	0,0775	0,0465	0,0121	0,0465	0,0081	0,0041
0,6811	0,0251	0,0492	0,0972	0,0583	0,0154	0,0583	0,0102	0,0052
0,6239	0,0298	0,0581	0,1143	0,0686	0,0183	0,0686	0,0122	0,0062
0,5570	0,0354	0,0685	0,1341	0,0805	0,0219	0,0805	0,0146	0,0074
0,5008	0,0402	0,0773	0,1506	0,0904	0,0251	0,0904	0,0167	0,0085
0,4537	0,0444	0,0847	0,1642	0,0985	0,0279	0,0985	0,0186	0,0095
0,4140	0,0480	0,0909	0,1754	0,1052	0,0304	0,1052	0,0203	0,0104
0,3748	0,0517	0,0971	0,1862	0,1117	0,0331	0,1117	0,0221	0,0114
0,3430	0,0549	0,1022	0,1948	0,1169	0,0355	0,1169	0,0237	0,0123
0,3171	0,0577	0,1063	0,2014	0,1208	0,0376	0,1208	0,0251	0,0131
0,2959	0,0601	0,1097	0,2066	0,1239	0,0396	0,1239	0,0264	0,0138
0,2774	0,0623	0,1126	0,2108	0,1265	0,0415	0,1265	0,0277	0,0146

0,2625	0,0643	0,1150	0,2140	0,1284	0,0433	0,1284	0,0288	0,0153
0,2506	0,0660	0,1170	0,2162	0,1297	0,0449	0,1297	0,0299	0,0159
0,2409	0,0675	0,1185	0,2178	0,1307	0,0464	0,1307	0,0309	0,0166
0,2323	0,0691	0,1199	0,2189	0,1313	0,0480	0,1313	0,0320	0,0172
0,2255	0,0704	0,1210	0,2195	0,1317	0,0494	0,1317	0,0330	0,0179
0,2201	0,0716	0,1218	0,2196	0,1318	0,0508	0,1318	0,0339	0,0185
0,2157	0,0727	0,1225	0,2195	0,1317	0,0522	0,1317	0,0348	0,0191
0,2117	0,0739	0,1231	0,2191	0,1315	0,0537	0,1315	0,0358	0,0198
0,2085	0,0749	0,1235	0,2185	0,1311	0,0551	0,1311	0,0367	0,0204
0,2060	0,0759	0,1239	0,2178	0,1307	0,0565	0,1307	0,0376	0,0210
0,2039	0,0768	0,1241	0,2169	0,1301	0,0578	0,1301	0,0385	0,0217
0,2019	0,0778	0,1243	0,2158	0,1295	0,0593	0,1295	0,0395	0,0224
0,2002	0,0787	0,1243	0,2147	0,1288	0,0608	0,1288	0,0405	0,0231
0,1989	0,0795	0,1244	0,2135	0,1281	0,0622	0,1281	0,0415	0,0239
0,1977	0,0803	0,1243	0,2123	0,1274	0,0636	0,1274	0,0424	0,0246
0,1965	0,0812	0,1243	0,2109	0,1265	0,0653	0,1265	0,0435	0,0254
0,1954	0,0820	0,1241	0,2094	0,1257	0,0669	0,1257	0,0446	0,0263
0,1944	0,0828	0,1239	0,2081	0,1248	0,0685	0,1248	0,0456	0,0271
0,1935	0,0834	0,1237	0,2067	0,1240	0,0700	0,1240	0,0466	0,0279
0,1927	0,0841	0,1235	0,2054	0,1233	0,0715	0,1233	0,0476	0,0288
0,1919	0,0847	0,1232	0,2042	0,1225	0,0729	0,1225	0,0486	0,0296
0,1911	0,0852	0,1230	0,2030	0,1218	0,0743	0,1218	0,0495	0,0304
0,1904	0,0857	0,1227	0,2018	0,1211	0,0757	0,1211	0,0504	0,0312
0,1897	0,0862	0,1224	0,2007	0,1204	0,0770	0,1204	0,0513	0,0320
0,1890	0,0866	0,1221	0,1996	0,1198	0,0783	0,1198	0,0522	0,0328
0,1884	0,0870	0,1217	0,1986	0,1191	0,0795	0,1191	0,0530	0,0335
0,1878	0,0873	0,1214	0,1976	0,1185	0,0807	0,1185	0,0538	0,0343
0,1872	0,0876	0,1211	0,1966	0,1180	0,0819	0,1180	0,0546	0,0351
0,1866	0,0879	0,1208	0,1957	0,1174	0,0831	0,1174	0,0554	0,0358
0,1860	0,0882	0,1204	0,1948	0,1169	0,0842	0,1169	0,0561	0,0366
0,1854	0,0884	0,1201	0,1939	0,1164	0,0853	0,1164	0,0569	0,0373
0,1849	0,0886	0,1198	0,1931	0,1159	0,0863	0,1159	0,0576	0,0381
0,1844	0,0888	0,1194	0,1923	0,1154	0,0874	0,1154	0,0583	0,0388
0,1839	0,0889	0,1191	0,1915	0,1149	0,0884	0,1149	0,0589	0,0395

0,1834	0,0891	0,1188	0,1908	0,1145	0,0894	0,1145	0,0596	0,0402
0,1829	0,0892	0,1184	0,1900	0,1140	0,0903	0,1140	0,0602	0,0410
0,1824	0,0893	0,1181	0,1893	0,1136	0,0913	0,1136	0,0609	0,0417
0,1819	0,0894	0,1177	0,1886	0,1132	0,0922	0,1132	0,0615	0,0424
0,1814	0,0895	0,1174	0,1879	0,1127	0,0931	0,1127	0,0621	0,0431

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**КОД ПРОГРАММЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ РИСКА ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ
НА УЧАСТКЕ КОНТАКТНОЙ СЕТИ**

Программа, написанная на языке программирования *Python*, предназначена для построения матрицы риска с целью определения величины гололедообразования на участках высокоскоростной магистрали. По данной программе с помощью матриц можно будет обосновать необходимость применения специальных материалов для предотвращения гололедообразования, за счет чего будет исключено время профилактического подогрева контактной подвески и, как следствие, снизятся эксплуатационные затраты.

Программный код:

```
print('Введите уровни частот:')#после ввода каждого числа нажимаем Enter. Дроб-
ные через точку
c=[]
for i in range(6):
    c.append(float(input()))
print('Введите уровни последствий:')#после ввода каждого числа нажимаем Enter.
Дробные через точку
p=[]
for i in range(4):
    p.append(float(input()))
print ('      |', end=")
for j in range(4):
    print('{:10.6f}'.format(p[j]), end=' ')
print()
print ('----- ')
for i in range(6):
    print('{:10.6f}'.format(c[i]), end=' | ')
    for j in range(4):
        print('{:10.6f}'.format(c[i]*p[j]), end=' ')
    print()
```


ПРИЛОЖЕНИЕ В

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023682341

**Определение риска гололедообразования на участке
контактной сети**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (RU)*

Авторы: *Андрюков Александр Владимирович (RU), Ковалев Алексей Анатольевич (RU)*

Заявка № 2023680817

Дата поступления 11 октября 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 24 октября 2023 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 429b6a0fe3653164d9f96183b73b4aa7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 18.02.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

АКТЫ

о внедрении результатов диссертационного исследования

ФОРАТЕК ЭНЕРГОТРАНССТРОЙ

620017, Россия, г. Екатеринбург, ул. Фронтовых бригад, 33, а/я 750. ИНН: 7716236962
Тел.: +7 (343) 346-15-20, факс: +7 (343) 376-15-20
<https://fets.ru>, e-mail: 1520@fets.ru

Акт

О внедрении программы для ЭВМ «Определение риска гололедообразования на участке контактной сети»

1. Разработчики: Андрюков Александр Владимирович, Ковалев Алексей Анатольевич.
2. Предмет внедрения: программный продукт для ЭВМ.
3. Место внедрения: АО «Форатек ЭнергоТрансСтрой».
4. Технико-экономический эффект: Программа позволяет обосновать необходимость мероприятий по предотвращению гололедообразования при проектировании контактной сети магистральных железных дорог РФ, что исключает ошибки и сокращает время при проектировании контактной сети.
5. Дата внедрения: 26.01.24 г.
6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применять указанный программный продукт при проектировании контактной сети во всех климатических районах.

Генеральный директор



Грехов К. А.

ФОРАТЕК ЭНЕРГОТРАНССТРОЙ

620017, Россия, г. Екатеринбург, ул. Фронтовых бригад, 33, а/я 750. ИНН: 7716236962
Тел.: +7 (343) 346-15-20, факс: +7 (343) 376-15-20
<https://fets.ru>, e-mail: 1520@fets.ru

Акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы

1. Разработчики: Андрюков Александр Владимирович, Ковалев Алексей Анатольевич.
2. Предмет внедрения: алгоритм управления рисками гололедообразования на участках железнодорожных магистралей.
3. Место внедрения: АО «Форатек ЭнергоТрансСтрой».
4. Техничко-экономический эффект: Результатом выполнения основных этапов разработанного алгоритма является наиболее достоверное принятие решения о необходимых мероприятиях по предупреждению гололедообразования при проектировании контактной сети магистральных железных дорог РФ, что в свою очередь, исключает ошибки на этапе проектирования и снижает затраты при эксплуатации.
5. Дата внедрения: 26.01.24 г.
6. Предложение о дальнейшем использовании: предлагается применять указанный алгоритм при проектировании контактной сети во всех климатических районах.

Генеральный директор



Грехов К. А.

