

На правах рукописи



Андрюков Александр Владимирович

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

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург
2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент
Ковалев Алексей Анатольевич

Официальные оппоненты:

Смердин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ОмГУПС), первый проректор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта»;

Игнатенко Иван Владимирович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ДВГУПС), проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Системы электроснабжения».

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)».

Защита диссертации состоится «21» июня 2024 года в 11:00 на заседании диссертационного совета 44.2.008.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС) по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д. 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационного совета.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» на сайте: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2024 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Колясов Константин Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 рубежом. Достижение вышесказанного невозможно без обеспечения высокого уровня безопасности и надежности перевозочного процесса.

Методология по Управлению ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН) учитывает, что управление безопасностью функционирования объектов на железнодорожном транспорте осуществляется на основе управления рисками. Для обеспечения безопасности движения поездов на участках контактной сети, специалисты проводят анализ риска с учетом статистических данных об отказах устройств контактной сети вследствие образования гололеда, происходивших 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, отклонений 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. Таким образом, тема диссертации является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Исследования 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 отображено 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, Е. В. Добрынина, И. В. Игнатенко, А. А. Ковалева, О. В. Кубкиной, А. Н. Смердина, Ф. Кисслинга, Р. Пушмана, А. Шмидера.

Теоретическую основу в области повышения надежности устройств контактной сети составляют работы М. П. Бадера, А. Л. Быкадырова, А. Г. Галкина, А. В. Ефимова, Б. Е. Дынькина, Ю. И. Жаркова, В. П. Михеева, С. А. Митрофанова, А. В. Окунева, Ю. Г. Семенова, О. А. Сидорова, Е. П. Фигурнова, М. В. Шевлюгина.

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

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ эксплуатационной надежности 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 из-за гололедообразования на участках контактной сети для обеспечения бесперебойного движения поездов в сложных метеорологических условиях, *отличающийся* тем, что на его основе становится возможным составить план 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 методы расчета конструкции контактной сети, 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 рисков, позволяющая ранжировать и отражать риск по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на участках контактной сети.

3. Алгоритм управления рисками из-за 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 так же актами внедрения результатов научно-исследовательской работы в АО «Форатекэнерготрансстрой», 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 изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях, совещаниях, семинарах: «Всероссийская научно-техническая конференция Транспорт Урала», г. Екатеринбург (УрГУПС, 2020); 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 иностранных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, степень ее разработанности. Представлены цель, направления и задачи исследования, а также описываются методические и теоретические основы. Сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, а также сведения по апробации и степени достоверности результатов исследования.

В первой главе проведен анализ надежности и отказов устройств контактной сети. Приведена статистическая оценка отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования в виде диаграммы и процентного соотношения. Анализ работы контактной сети в результате образования гололеда показывает, что количество отказов, несмотря на уменьшение, продолжает оставаться на высоком уровне, что свидетельствует о непринятии мер по предотвращению гололедообразования на проводах контактной сети и токоприемниках электроподвижного состава.

В соответствии с задачами по предупреждению возникновения нарушений устройств контактной сети по причине образования гололеда, поставленными функциональной стратегией обеспечения безопасности и надежности перевозочного процесса в ОАО «РЖД», осуществляется переход к систе-

ме обеспечения безопасности движения, направленной на прогнозирование и предупреждение транспортных происшествий и событий на раннем этапе.

Был проведен анализ диагностических нарушений и последствий нарушений с 2019 по 2022 гг., который состоит из следующих параметров:

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

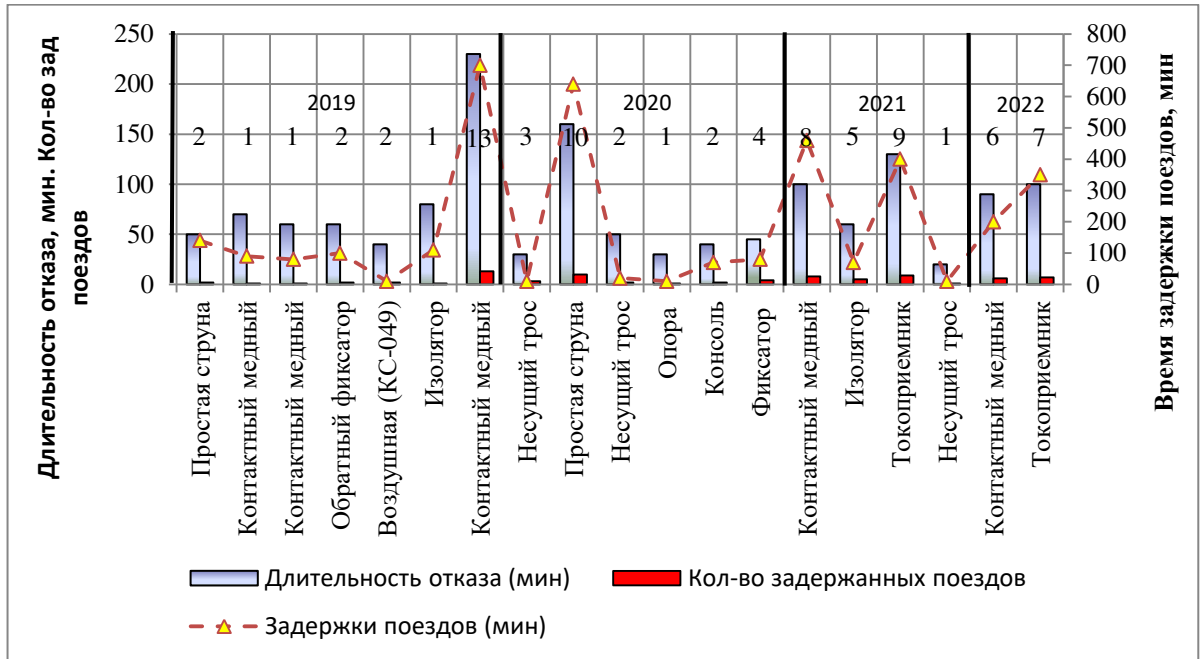


Рисунок 1 – Анализ диагностических испытаний и последствий нарушений устройств контактной сети вследствие образования гололеда

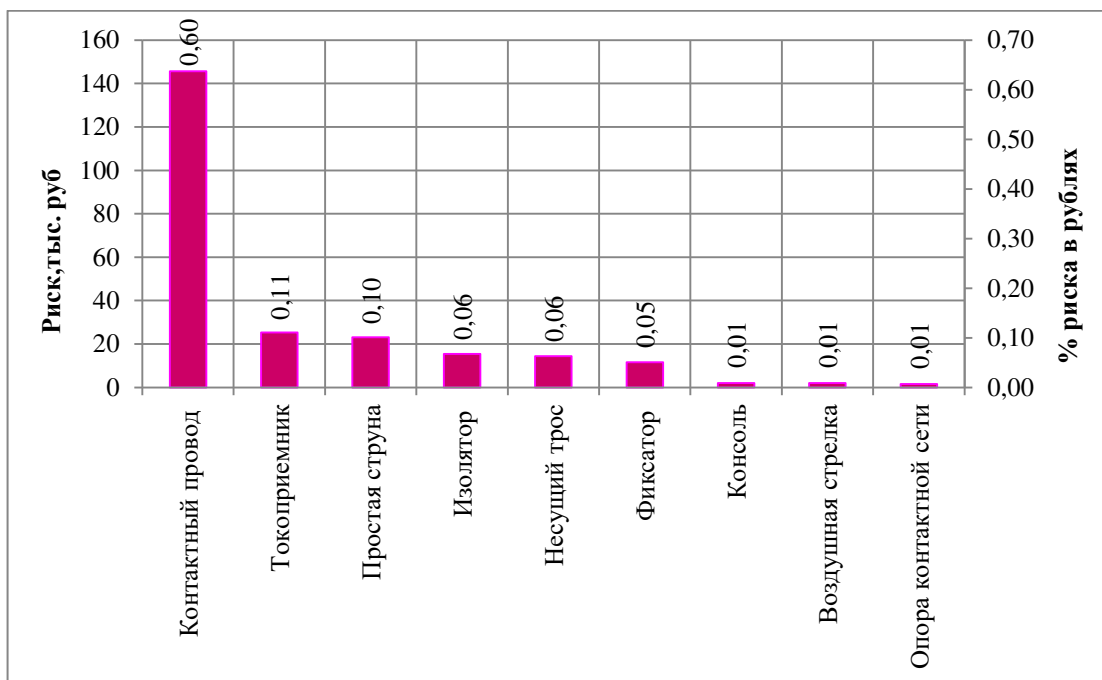


Рисунок 2 – Гистограмма рисков отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования

На рисунке 2 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.

На основании проведенного статистического анализа устройств контактной сети по причине гололедообразования становится возможным разработать структурную схему надежности контактной сети при токосъеме, по которой будет выполнен расчет последовательной структурной схемы надежности. Проведенный риск-анализ позволит разработать методику оценки рисков по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на контактной сети.

Во второй главе была разработана математическая многофакторная модель процесса отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования. Произведена оценка влияния стрел провеса контактного провода и несущего троса на возможность обеспечения безопасности движения поездов при образовании гололеда на участке контактной сети «Е-Ч», включающий в себя три климатических района. В результате проведенного исследования можно утверждать, что контактная подвеска М95-2НЛФ100 будет лучше способствовать для борьбы с гололедообразованием, а также позволит составить карту рисков отказов контактной сети на выбранных участках из-за гололедообразования, что даст возможность оценить необходимость модернизации инфраструктуры и более точно обосновывает экономические затраты на проект.

Были установлены сочетания факторов, способствующие возникновению аварий на контактной сети при гололедообразовании. Для определения вероятности возникновения гололеда на контактной сети все факторы были разделены на 2 группы.

– климатические (районирование по гололеду / ветру / температуре, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, среднее количество дней с образованием гололеда);

– эксплуатационные (количество устройств механического способа удаления гололеда, процентное отношение длины участков контактной сети, оборудованных средствами плавки гололеда).

Для правильной оптимизации факторов используется сеть Байеса (рисунок 3), которая применяется для моделирования отказов и явного представления влияющих факторов на контактную сеть. Результатом будет являться вероятность возникновения отказа отдельных элементов контактной сети при условии гололедообразования. Применена статистика об отказах устройств контактной сети по причине гололедообразования на рассматриваемых участках.

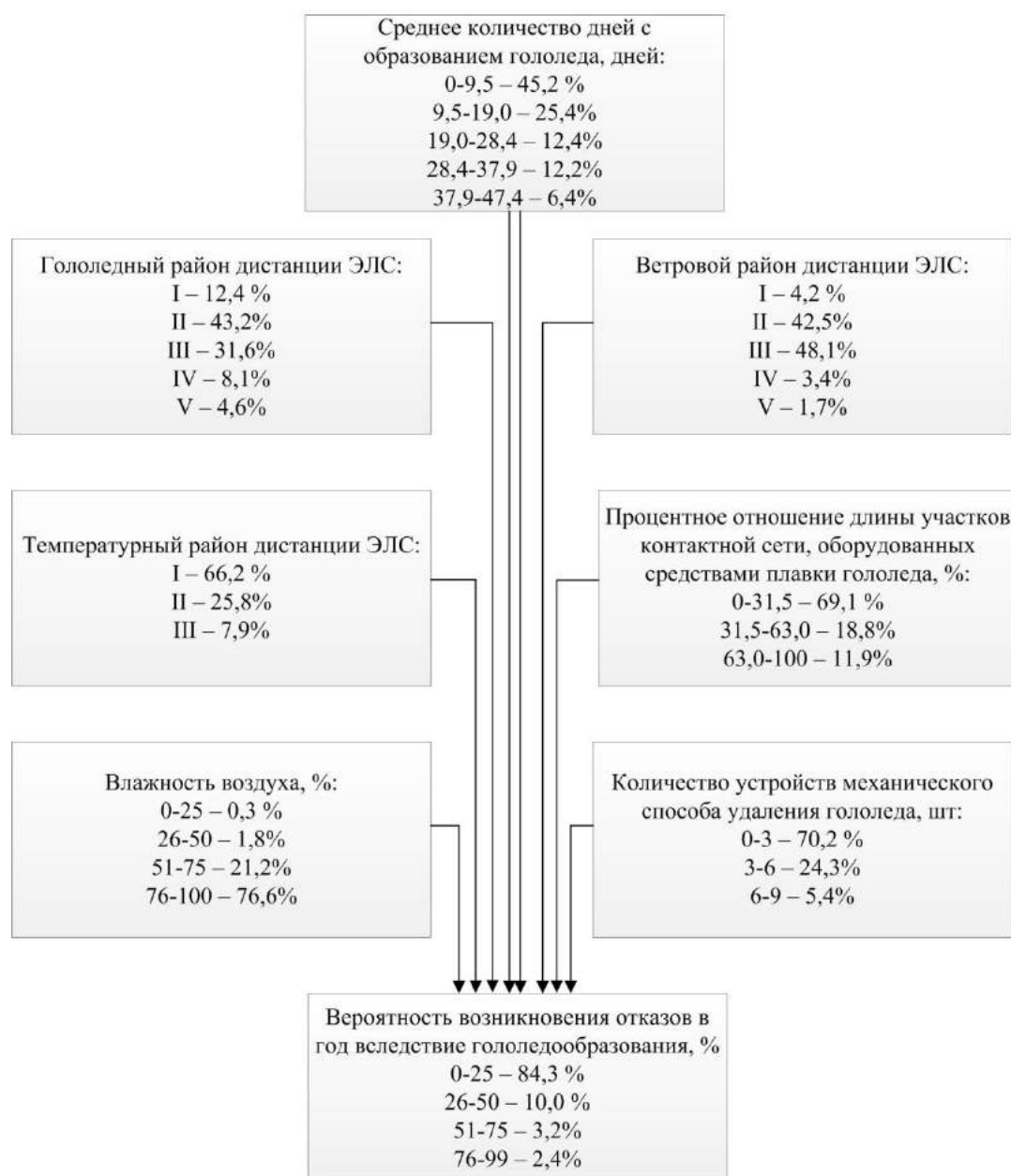


Рисунок 3 – Вероятность возникновения отказов при условии гололедообразования

Для каждого фактора было рассчитано математическое ожидание, которое позволяет оценить его влияние на появление отказа. По результатам расчета был сделан вывод, что на вероятность появления гололеда на элементах контактной сети влияют следующие факторы:

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

На рисунке 4 разработан 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;
- неработоспособном состоянии из-за полного отказа одного из элементов контактной сети.

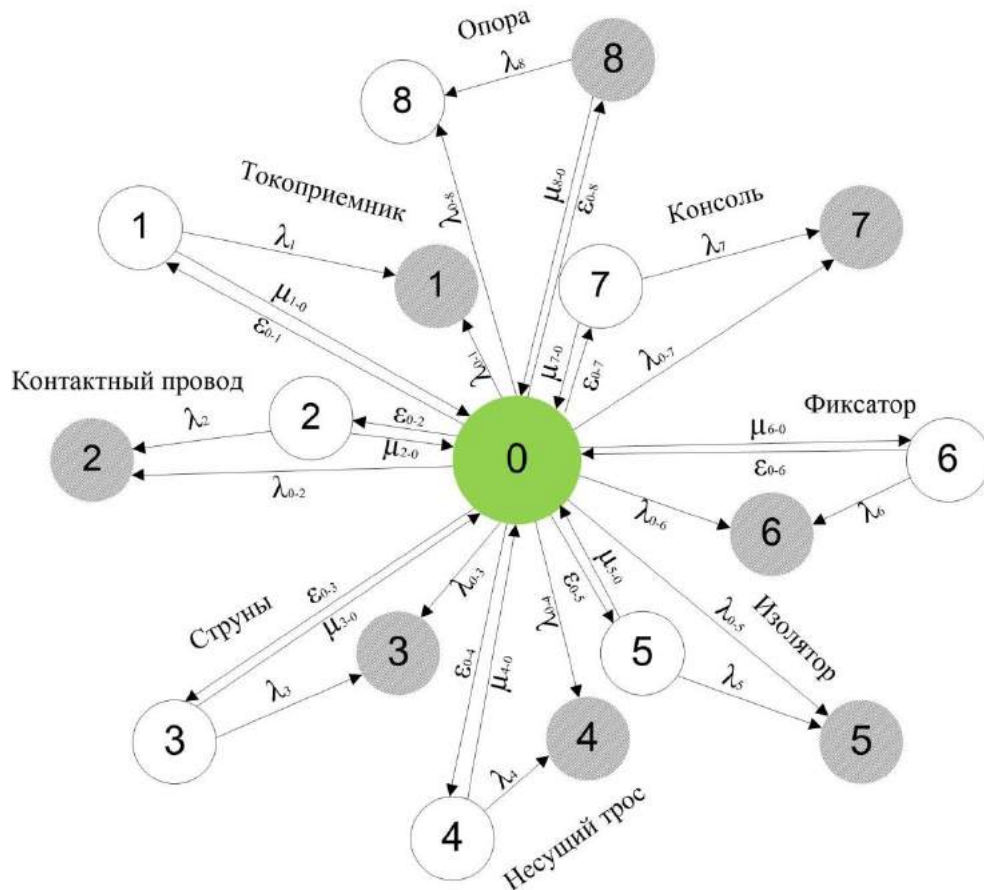


Рисунок 4 – Граф состояний и переходов контактной сети в состояние отказа при наличии гололедообразования для участков железнодорожной магистрали

На рисунке 5 представлен вариант последовательной структуры элементов контактной сети при токосъеме, подвергающихся воздействию различных климатических факторов. На основе ее будет выполнен расчет схемы надежности контактной сети с восстановлением при образовании гололеда. Рассмотрим работу устройств контактной сети. Система состоит из восьми последовательно-соединённых элементов, повреждение каждого из которых приводит к повреждению системы, а восстановление любого из этих элементов – к восстановлению ее работоспособности. предотказное и работоспособное состояние системы наступает тогда, когда произойдет частичный от-

каз или восстановление опоры контактной сети (8), консоли (7), фиксатора (6), изолятора (5), несущего троса (4), струны (3), контактного провода (2) и токоприемника (1).

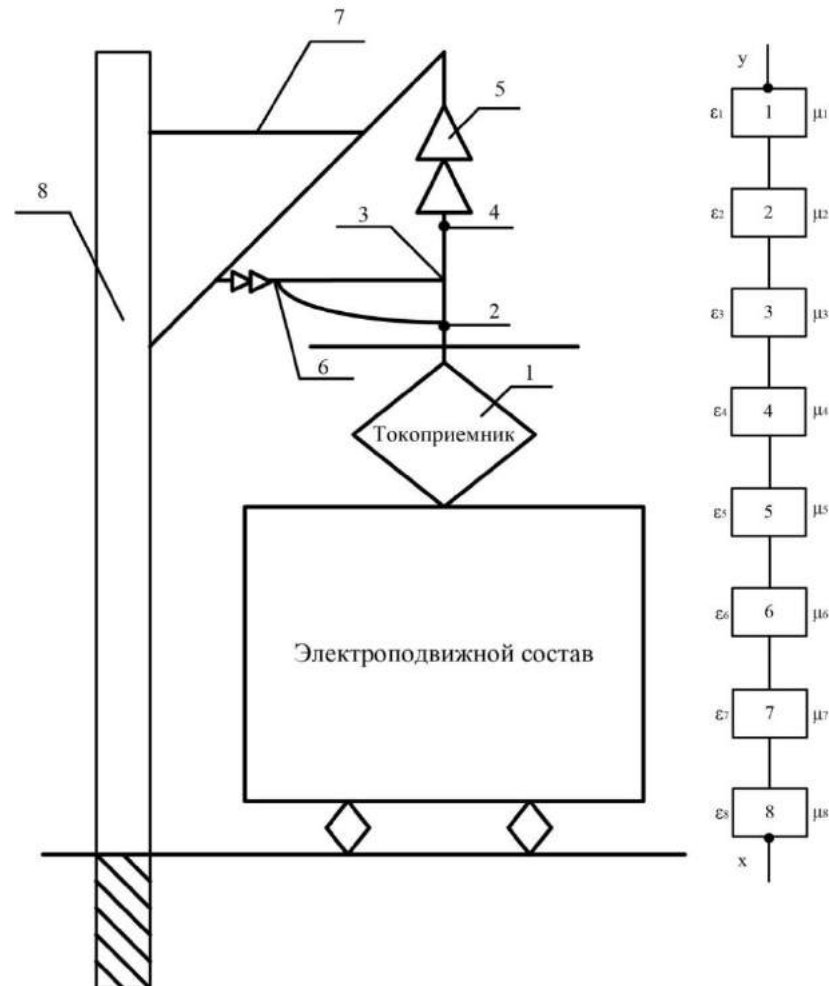


Рисунок 5 – Последовательная структурная схема надежности с восстановлением контактной сети при токоосъеме

На основании структурной схемы надежности была разработана математическая многофакторная модель в виде марковского процесса по оценке риска отказов контактной из-за гололедообразования, которая позволит повлиять на повышение надежности мероприятий по предупреждению гололедообразования (рисунок 6).

При расчете модели марковской цепи с восстановлением учитываются важные особенности системы. Контактная сеть должна работать заданное время и перерывы в ее работе недопустимы. Возможность обратных переходов из поглощающих состояний в работоспособное не рассматривается. Если же перерывы все-таки допускаются, то для таких систем определяются коэффициенты готовности или коэффициент оперативной готовности.

Для описания исследуемого процесса системы в каждом из состояний, составляется система уравнений Колмогорова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -\sum_{j=1}^8 \varepsilon_{0j} \cdot P_0(t) + \sum_{i=1}^8 \mu_{i0} \cdot P_i(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \varepsilon_{01} P_0(t) - \mu_{10} P_1(t); \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \varepsilon_{02} P_0(t) - \mu_{20} P_2(t); \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \varepsilon_{03} P_0(t) - \mu_{30} P_3(t); \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \varepsilon_{04} P_0(t) - \mu_{40} P_4(t); \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \varepsilon_{05} P_0(t) - \mu_{50} P_5(t); \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \varepsilon_{06} P_0(t) - \mu_{60} P_6(t); \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \varepsilon_{07} P_0(t) - \mu_{70} P_7(t); \\ \frac{dP_8(t)}{dt} = \varepsilon_{08} P_0(t) - \mu_{80} P_8(t). \end{array} \right. \quad (1)$$

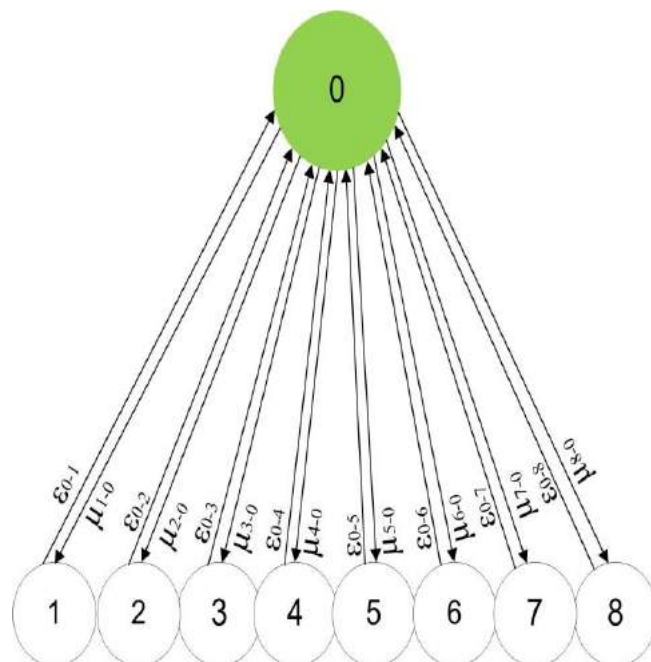


Рисунок 6 – Математическая многофакторная модель процесса отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования

Для решения системы уравнений зададимся начальными условиями:

$$P_0(t) = 1, \quad (2)$$

$$P_1(0) = P_2(0) = \dots = P_8(0) = 0. \quad (3)$$

Чтобы найти финальные вероятности состояний, в уравнениях Колмогорова отбросим первое уравнение и найдем P_0 из последнего уравнения системы уравнений, которая принимает следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{01} P_0(t) - \mu_{10} P_1(t) = 0; \\ \varepsilon_{02} P_0(t) - \mu_{20} P_2(t) = 0; \\ \varepsilon_{03} P_0(t) - \mu_{30} P_3(t) = 0; \\ \varepsilon_{04} P_0(t) - \mu_{40} P_4(t) = 0; \\ \varepsilon_{05} P_0(t) - \mu_{50} P_5(t) = 0; \\ \varepsilon_{06} P_0(t) - \mu_{60} P_6(t) = 0; \\ \varepsilon_{07} P_0(t) - \mu_{70} P_7(t) = 0; \\ \varepsilon_{08} P_0(t) - \mu_{80} P_8(t) = 0. \end{array} \right. \quad (4)$$

Для решения системы уравнений (3) был применен интеграл Лапласа. Структура системы уравнений позволяет решать задачу поэтапно. Тогда, вероятность безотказной работы системы устройств контактной сети вследствие образования гололеда в каждом из состояний будет равна:

$$P_i(t) = \sum_{k=1}^i \frac{\varepsilon_i \cdot \prod_{j=0}^i (S_k + \mu_{j-1})}{\prod_{j=0}^i (S_k - S_j)} \cdot e^{S_k t}, \quad (5)$$

где S_k – k -й корень многочлена, j – количество корней многочлена.

За рассматриваемый период наблюдения на интервале времени $t = 4$ года определяются значения работоспособного состояния всей системы и частично-работоспособного состояния устройств контактной сети. Чтобы учесть вероятность нахождения системы в состоянии отказа, нужно добавить ещё одно уравнение, которое определяет нормировочное условие, поскольку сумма всех вероятностей должна быть равна единице:

$$P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) = 1. \quad (6)$$

Система уравнений (3) была решена в программном обеспечении *Matlab*.

Для исследуемого участка железнодорожной магистрали по известным значениям интенсивности отказов и восстановлений устройств контактной сети были рассчитаны вероятности всех состояний системы и построен график функции надежности за 4 года наблюдения с помощью визуального графического моделирования сложных технических систем *MATLAB Simulink*. Решение данной системы приведено на рисунке 7. Сделан вывод, что за 4 года наблюдения вероятность безотказной работы системы контактной сети из-за образования гололеда составляет $P_0(t) = 0,183$.

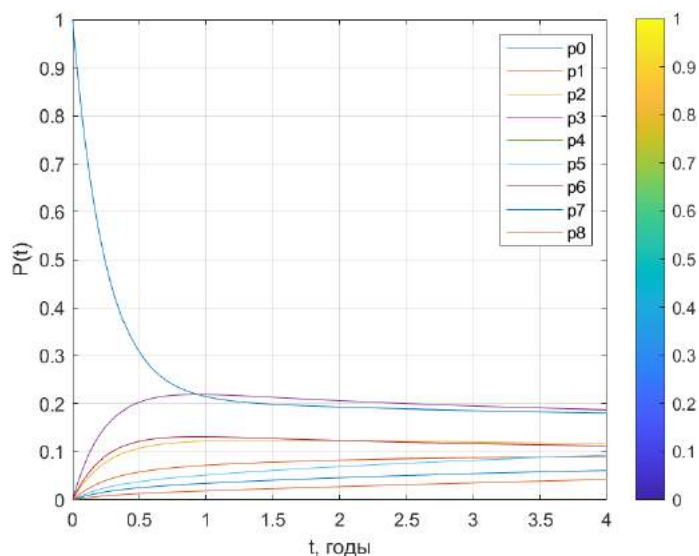


Рисунок 7 – Решение системы уравнений по определению вероятности отказа с помощью *MATLAB Simulink*

Определена финальная вероятность возникновения отказа из-за гололеда на всей железнодорожной магистрали $\pi_r = 0,817$. Чтобы уменьшить вероятность, нужно правильно спланировать вид мероприятий по предупреждению гололедообразования.

В третьей главе разработана матрица для оценки риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на участке контактной сети и произведено описание методов ее формирования, выбора масштабов и конечных значений шкал рисков, частот и последствий, а также вспомогательных элементов.

Предложена универсальная классификация рисков для оценки гололедообразования на контактной сети (таблица 1).

Таблица 1 – Классификация рисков, связанных с контактной сетью при условии гололедообразования

Риски, влияющие на безопасность движения поездов	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, индивидуальный, социальный
Задержка поездов по причине гололедообразования	Экономический

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

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

Сформированы шкалы частот и последствий по обеспечению безопасности движения поездов при гололеде на участках железнодорожной магистрали «Е–Ч». Определены минимальные и максимальные значения частоты и удельного размера последствий для выборки на интервале наблюдения за 2022 гг.

Относительные диапазоны значений частот и последствий:

$$A = \frac{a_1 \cdot a_2 \cdot f_{\max}}{f_{\min}}, \quad (7)$$

где a_1 – коэффициент запаса нижней границы диапазона частот;
 a_2 – коэффициент запаса верхней границы диапазона частот;
 f_{\max} – максимальное значение частоты последствий;
 f_{\min} – минимальное значение частоты последствий.

$$B = \frac{b_1 \cdot b_2 \cdot c_{\max}}{c_{\min}}, \quad (8)$$

где b_1 – коэффициент запаса нижней границы диапазона последствий;
 b_2 – коэффициент запаса верхней границы диапазона последствий;
 c_{\max} – максимальное значение удельного размера последствий;
 c_{\min} – минимальное значение удельного размера последствий.

Крайние значения шкалы частот:

$$A_{-I} = f_{\min} / a_1, \quad (9)$$

$$A_I = a_2 \cdot f_{\max}. \quad (10)$$

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

$$B_{-J} = \frac{a_1 R_{\text{доп}} K^{\frac{I+2J}{2\mu}-1}}{f_{\min}}, \quad (11)$$

$$B_J = \frac{R_{\text{доп}} K^{\frac{I+2J}{2\mu}-1}}{a_2 f_{\max}}. \quad (12)$$

Результаты расчета шкал частот и последствий гололедообразования приведены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2 – Шкала частот на участке контактной сети «Е-Ч»

Значения шкалы частот	«Е-С»	«С-Сн»	«Сн-Ч»
A_3	8,0	6,73	4,0
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 – Шкала последствий на участке контактной сети «Е-Ч»

Значения шкалы последствий	«Е-С»	«С-Сн»	«Сн-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

На основании полученных шкал частот и последствий были разработаны три математические матрицы рисков (пример одной из которых приведен на рисунке 8) для каждого участка контактной сети на железнодорожной магистрали «Е-Ч». По каждому участку магистрали был сделан вывод, что самым недопустимым является риск повреждения контактной подвески, так как вероятность повреждения от гололеда для проводов более существенна, чем, к примеру, для консолей и опор. Это говорит о том, что при полученном значении уровня риска повреждения контактной подвески на участках становится возможным обосновать применение специальных покрытий для предотвращения образования гололеда, за счет которых будет отсутствовать необходимость проведения профилактического подогрева контактной подвески, и, как следствие снизятся эксплуатационные затраты и риск отказа участка.

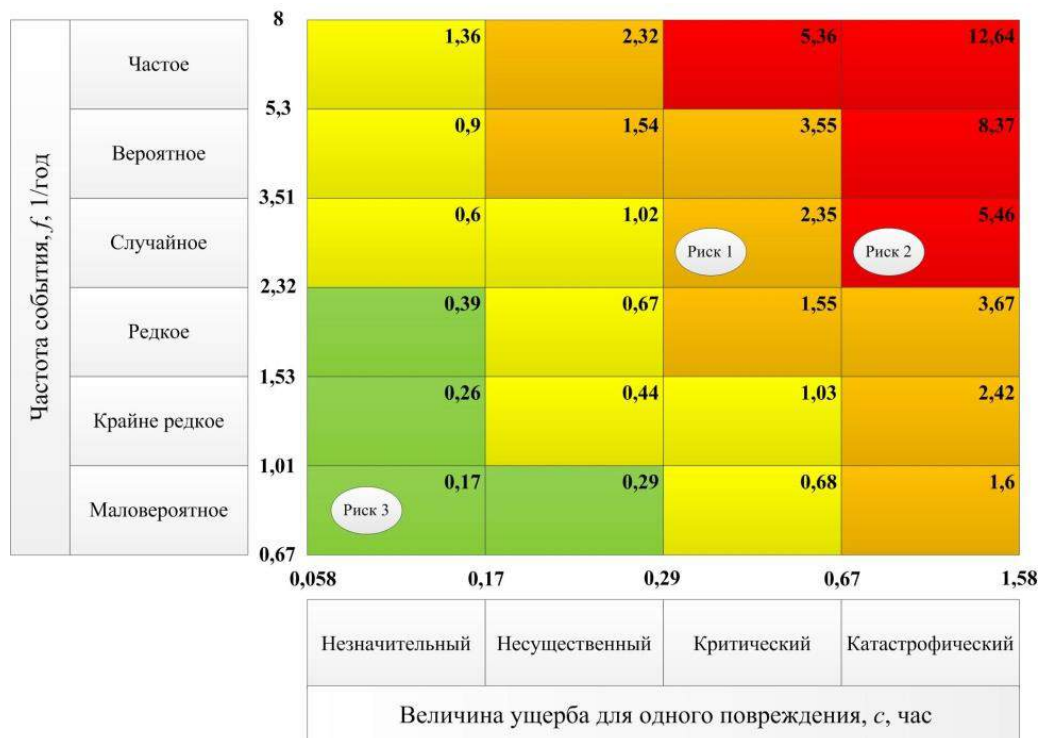


Рисунок 8 – Матрица рисков на участке «Е-С»

В четвертой главе был разработан алгоритм управления рисками гололедообразования на участках контактной сети для обеспечения движения поездов (рисунок 9).

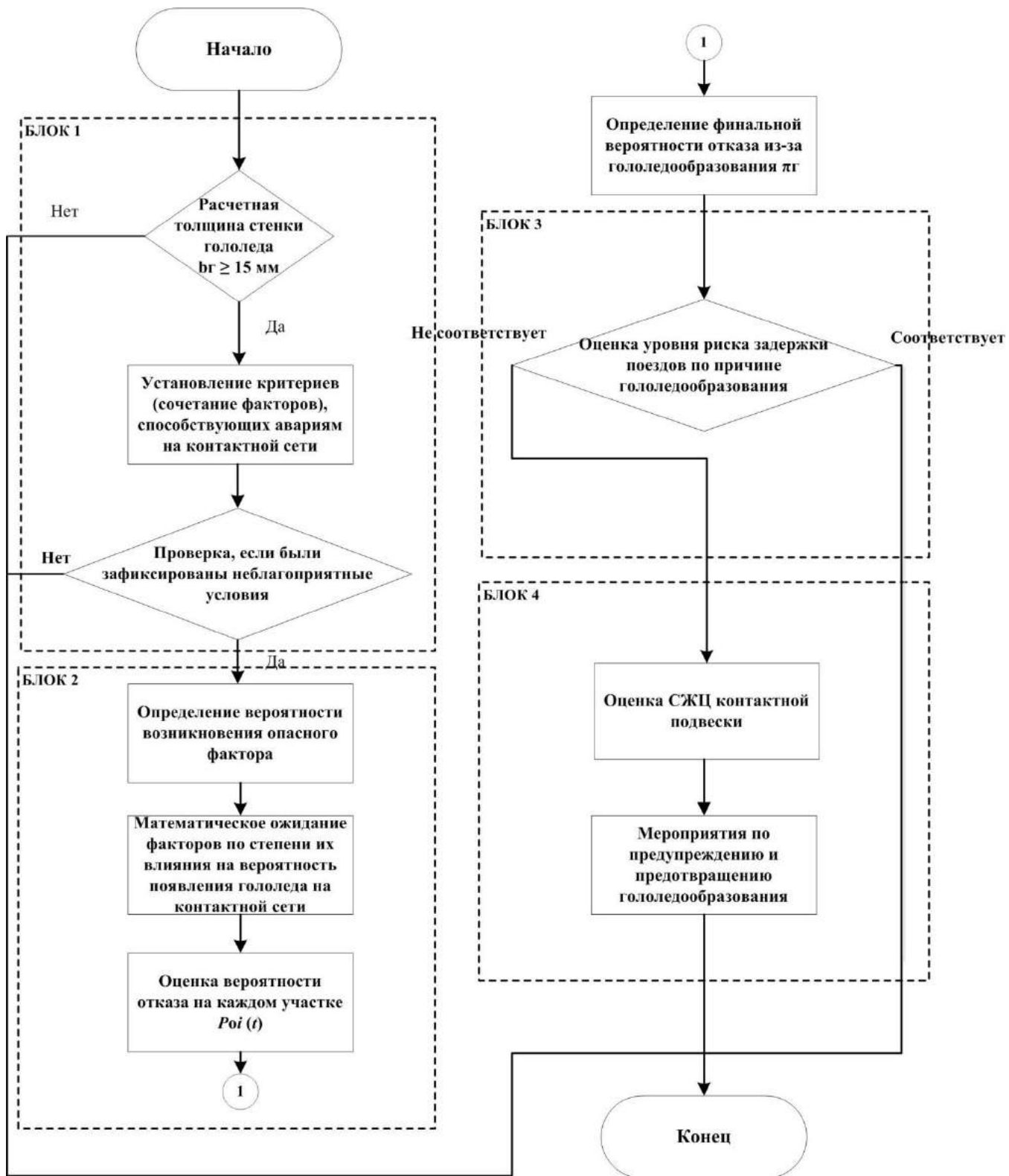


Рисунок 9 – Алгоритм управления рисками из-за гололедообразования на участках контактной сети

Результатом выполнения основных этапов разработанного алгоритма управления рисками из-за гололедообразования является принятие решения, направленного на применение мероприятий по предупреждению гололедообразования на исследуемом участке железнодорожной магистрали с учетом результатов и величины риска.

Разработанный алгоритм включает в себя ряд последовательно выполняемых мероприятий на исследуемом участке и разбивается на четыре основных блока:

1 блок: отвечает за достоверность полученной и собранной информации с помощью метеорологических станций.

2 блок: определяет финальную вероятность отказа на участке железнодорожной магистрали, на основании разработанной математической модели процесса отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования.

3 блок: выполняет оценку риска по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании, для этого строятся матрицы рисков для каждого климатического района участка контактной сети.

4 блок: осуществляет расчет стоимости жизненного цикла по исследуемому участку для экономического обоснования принятия решения о выборе необходимого мероприятия по предотвращению или предупреждению гололедообразования.

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 токоосеме. 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 $\pi_r = 0,8186$. 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» – $R_1 = 3,4$ час.; «С-Сн» – $R_2 = 4,3$ час.). 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 – разработка универсального алгоритма управления рисками по обеспечению безопасности движения поездов при гололедообразовании на участках контактной сети магистралей для скоростных и высокоскоростных железнодорожных магистралей.

Работы, опубликованные по теме диссертации

а) научные работы, опубликованные в изданиях, включенные в перечень ВАК Минобрнауки РФ:

1. 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.

2. 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.

3. 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.

б) научные работы, опубликованные в других изданиях:

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

5. Андрюков, А. В. Анализ отказов устройств контактной сети по причине гололедообразования / А. В. Андрюков // Инновационный транспорт. – 2023. – № 4 (50). – С. 33-38.

в) свидетельство о государственной регистрации программного продукта:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682341 Российская Федерация. Определение риска гололедообразования на участке контактной сети : № 2023680817 : заявл. 11.10.2023 : опублик. 24.10.2023 / А. В. Андрюков, А. А. Ковалев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения».

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Основные положения результатов проведенных исследований получены автором самостоятельно. Статья [5] подготовлена единолично. Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах заключается в следующем: [1] – проведена оценка влияния стрел провеса контактного провода на возможность повышения скоростей движения на участке железнодорожной магистрали; [2] – разработана математическая многофакторная модель процесса отказов устройств контактной сети с учетом гололедообразования в виде марковских цепей; [3] – разработана матрица рисков для оценки гололедообразования на участке контактной сети; [4] – проведен анализ надежности устройств контактной сети в виде диаграмм Парето на участке контактной сети; [6] – разработан программный код для расчета риска гололедообразования на контактной сети.

Подписано в печать 22.04.2024
Формат 60 x 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Заказ 24.

УрГУПС
620034, Екатеринбург, Колмогорова, 66
