

На правах рукописи



Окунев Александр Владимирович

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ДИАГНОСТИКЕ  
ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2019

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:**

Ли Валерий Николаевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», кафедра «Системы электроснабжения», профессор;

Смердин Александр Николаевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электроснабжение железнодорожного транспорта», доцент

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

Защита состоится «21» февраля 2020 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 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 разослан «18» декабря 2019 г

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, доцент



Тимухина  
Елена Николаевна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Одной из целей стратегии развития холдинга открытого акционерного общества «Российские железные дороги» до 2030 года поставлена задача сохранить лидирующие позиции в мире в части эффективности, безопасности, качества услуг инфраструктуры. Так, в сфере содержания и ремонта предусматривают внедрение системы комплексной диагностики и удаленного мониторинга инфраструктуры, проведение мероприятий по повышению энергетической эффективности, оптимизации технологических нормативов.

Согласно внедряемой методологии Управления ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН), управление безопасностью функционирования объекта железнодорожного транспорта должно осуществляться на основе управления рисками. Для оценки безопасности движения поездов на участках железных дорог предусмотрены расчеты по оценке риска с учетом произошедших отказов на рассматриваемом интервале времени. Повышение эффективности инфраструктурного комплекса осуществляется за счет совершенствования систем мониторинга и диагностики объектов эксплуатации на основе современных методов и систем, расширения практики планирования, обслуживания и ремонта по фактическому состоянию с учетом прогнозируемых предотказных состояний и рисков.

Несмотря на то, что доля отказов опор контактной сети составляет меньшую часть из общего числа отказов элементов контактной сети, одной из острых проблем является определение их технического состояния. Действующие подходы к определению технического состояния опорного парка, применяемые в настоящее время, предусматривают контроль одного параметра, который описывает техническое состояние железобетонных опор. Широкий выбор приборов диагностики железобетонных опор контактной сети никаким образом не повышает достоверность каждого из них в отдельности, что является не достаточным для постановки точного диагноза о техническом состоянии опор контактной сети и не дает достоверной информации о возможном её отказе. Более того, отсутствие прогнозирования предельных состояний не позволяет выявить систему отказов.

Организация комплексного подхода к диагностике, а также прогнозирование технического состояния в ходе текущей эксплуатации позволит более точно описать техническое состояние железобетонных опор. Основываясь на данных измерений нескольких параметров, необходимо сформировать мероприятия, направленные на принятие решений по замене или продлению срока службы опор контактной сети. Таким образом, тема диссертации является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретико-методологическую основу исследования в области повышения надежности железобетонных конструкций составляют работы таких ученых, как: А. А. Царьков, А. И. Гуков, В. И. Подольский, В. Н. Ли, В. П. Михеев, С. М. Скоробогатов, и других.

Проблемы контроля технического состояния и взаимодействия устройств контактной сети и токоприемников электроподвижного состава изложены в рабо-

тах таких ученых, как: А. Г. Галкин, А. А. Ковалев, А. Н. Смердин, В. Н. Яковлев, О. А. Сидоров, и других.

Способы технического обслуживания и подходы к эксплуатации объектов контактной сети отражены в работах таких иностранных ученых, как: Ш. Гордон, А. Д. Челлиа, Б. Шиманик, Г. Дитрих, Дех-Шу Сюй, К. Робинсон, П.К. Франковский, С. Такеюки, Т. Чади, Чунг-Хуэй Цай.

**Цель работы** разработка комплексного подхода к диагностике опор контактной сети на этапе эксплуатации.

**Задачи исследования:**

1. Выполнить анализ эксплуатационной надежности опор контактной сети на участках железных дорог;
2. Усовершенствовать процесс диагностики опоры контактной сети, на основе применения комплексного подхода. Разработать концепцию системы контроля состояния железобетонных опор контактной сети с использованием вероятностно-статистических подходов;
3. Разработать математическую модель отказа железобетонной опоры контактной сети;
4. Разработать алгоритм проведения комплексной диагностики опор контактной сети с учетом срока их эксплуатации;

**Область исследования.** Системы технического обслуживания и эксплуатации устройств электроснабжения. Техническая диагностика систем электроснабжения. Обеспечение безопасности движения поездного состава.

**Объект исследования.** Технология ремонта и технического обслуживания опор контактной сети.

**Предмет исследования.** Методы определения технического состояния опор контактной сети.

**Научная проблема** формулируется следующим образом:

Превышение нормативных сроков эксплуатации опор контактной сети ведет к значительному снижению ее несущей способности. Недостаточность информации о состоянии опоры не позволяет своевременно принимать решения по замене опоры или продлению срока ее эксплуатации, что приводит к появлению внеплановых затрат на этапе эксплуатации. На практике комплексный подход к определению технического состояния опоры контактной сети отсутствует.

**Научная новизна:**

1. Разработан комплексный подход к диагностике технического состояния опор контактной сети, учитывающий контроль нескольких измеряемых параметров, а так же применения метода статистического анализа совместно с теоремой Байеса и методом последовательного анализа;
2. Выполнена оценка риска задержки поездов с учетом частичных отказов опор контактной сети, по результатам постановки диагноза проведённой комплексной диагностики.
3. Разработана математическая модель процесса изменения несущей способности опор контактной сети;

4. Предложен к применению алгоритм организации комплексной диагностики и оценки необходимости продления срока службы опоры контактной сети, с учетом срока ее эксплуатации.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Разработанный механизм на основе контроля нескольких параметров одновременно позволяет наиболее достоверно установить диагноз о техническом состоянии железобетонных опор контактной сети и принять обоснованное решение о продлении срока службы опоры или ее замене. Для снижения ошибок при определении экономических затрат разработан программный продукт по определению стоимости жизненного цикла опор контактной сети.

**Методология и методы исследования.** Методологической основой исследования являлись основные положения теории надежности и теории вероятностей. Для решения поставленных задач использовались методы расчета конструкций контактной сети, теорема Байеса, математическое моделирование и математическая статистика.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Комплексный подход по определению технического состояния опор контактной сети, включающий в себя теорему Байеса и метод последовательного анализа;

2. Результаты расчета риска задержки поездов на рассматриваемом участке эксплуатации с учетом количества частичных отказов опор контактной сети;

3. Математическая модель изменения несущей способности железобетонных опор контактной сети;

4. Результаты принятия решений по продлению срока эксплуатации или замене опор контактной сети при реализации разработанного алгоритма;

**Реализация результатов работы.** Разработанный подход проведения комплексной диагностики опоры контактной сети внедрен в опытную эксплуатацию при проведении диагностических испытаний опор контактной сети Свердловской дирекции по энергообеспечению ТРАНСЭНЕРГО филиала ОАО «РЖД», для расчета стоимости жизненного цикла в опытную эксплуатацию внедрен программный продукт по расчету стоимости жизненного цикла в ООО «Наилучшие доступные технологии». Получены акты о внедрении.

**Степень достоверности результатов** подтверждается сравнением результатов теоретических и экспериментальных исследований, при этом расхождение результатов не превышает 3%. Обоснованность результатов подтверждается корректным применением методов математического и физического моделирования.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях, совещаниях, семинарах: «Инфраструктура железных дорог: эксплуатация электроподвижного состава, систем электроснабжения, автоматики и телемеханики», г. Екатеринбург (УрГУПС, 2013); НТС «Развитие инфраструктурного комплекса системы токосъема», г. Екатеринбург (УрГУПС, 2013, 2014); Региональная конференция «Энергетика, электропривод, энергосбережение и экономика предприятий, организаций, учреждений», г. Екатеринбург (РГППУ, 2015); Региональная конференция «Развитие систем электроснабжения, автоматики и телемеханики», г. Екатеринбург (УрГУПС, 2017);

IX Международный симпозиум «Прорывные технологии электрического транспорта Элтранс-2017» (ПГУПС, 2017); Международная НПК «Будущее транспорта России» (УрГУПС, 2018); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов» (ОмГУПС, 2018); заседание кафедры «электроснабжение железнодорожного транспорта» (ОмГУПС, 2018); Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Влияние надежности устройств электроснабжения на работу транспорта» (УрГУПС, 2019); десятый международный симпозиум «*Eltrans 10.0*» (ПГУПС, 2019).

Результаты диссертационной работы в полном объеме заслушаны и одобрены на заседании кафедры «Электроснабжение транспорта» УрГУПС (Екатеринбург, 2019).

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в ведущих изданиях из перечня, рекомендованных ВАК при Министерстве образования и науке Российской Федерации.

Общий объем публикаций по теме диссертационного исследования составляет 6,25 печатных листов, из которых автору принадлежат 4,0 печатных листа.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 266 страницах, содержит 145 страниц основного текста, 29 рисунков, 28 таблиц и 5 приложений на 121 странице, 119 наименований библиографического списка, включая 5 наименований иностранных источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается выбор темы, актуальность темы и проблемы исследования. Обозначены цель, объект, предмет и задачи исследования, а также описываются методические и теоретические основы. Сформулирована научная новизна исследования, практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, и сведения по апробации результатов исследования.

**В первой главе** проведен анализ существующих подходов к диагностике и эксплуатации. Выполнен анализ эксплуатационной надежности опор контактной сети на отдельных участках полигона Свердловской железной дороги за период 2013 – 2018 годов.

Выполнена оценка основных факторов, влияющих на продолжительность срока эксплуатации железобетонных опор контактной:

1. Метеоусловия. Значительные колебания температур в диапазоне от  $-30^{\circ}\text{C}$  до  $+30^{\circ}\text{C}$  негативно отражаются на целостности бетонного слоя. Зафиксировано появление трещин, а также повреждения опор в виду штормовых погодных условий.

2. Расположение опор на межподстанционной зоне. При проходе электроподвижного состава, образующиеся анодные зоны создают необходимые условия для протекания электрической коррозии в подземной части железобетонных опор. Отсутствие защиты от токов утечки приводит к увеличению скорости электриче-

ской коррозии металлической арматуры в стенках бетона опоры на глубине примерно 1 – 0,5 м в грунте. Что в конечном счете приводит к падению опор.

3. Нарушение действующих правил установки (выправки) опор. Пренебрежение действующих инструкций приводит к частичному или полному разрушению опор контактной сети из-за повышенных механических нагрузок.

4. Несогласованная работа служб электрификации и пути. Нарушение габарита приближения строений, выявляется после проведения больших объемов путевых работ по выправке железнодорожного пути. Таким образом, отсутствие согласованности в работе смежных служб, приводит не только к увеличению трудозатрат, вызванных установкой новых опор контактной сети и переводом нагрузки на них и выполнением демонтажа «старых», но и может привести к нарушению безопасности движения поездов.

5. Эксплуатация опор более 40 лет. По состоянию на 2018 год объем замененных опор, находящихся в эксплуатации более 40 лет и принятых к учету после обновления составляет только 0,9 % на полигоне Свердловской железной дороги. Также в эксплуатации находятся 44,5 % от общего парка металлических опор и 9,7 % от общего количества железобетонных опор, которые эксплуатируются свыше 50 лет. Более того, ежегодно вновь выявляются около 500 дефектных опор.

Повышение безопасности движения поездов и разработка комплексных мероприятий, направленных на диагностику и первоочередную замену выявленных острodefектных опор, а также своевременное обновление опорного парка является основной задачей. Для оценки перспективы использования существующих методов диагностики опор и решения задач исследования, автором выполнена классификация основных приборов, применяемых в настоящее время по сети железных дорог:

- по скорости получения информации;
- по скорости обработки полученных данных;
- по точности измерений;
- по объему выполняемых работ;

Выполнен анализ факторов, влияющих на стоимость жизненного цикла железобетонных опор контактной сети.

**Во второй главе** разработан подход к комплексной диагностике железобетонных опор контактной сети на основе теоремы Байеса и метода последовательного анализа (рисунок 1).

Реализация этапов подхода комплексной диагностики представлена ниже:

**1 этап.** Рассмотрен перегон контактной сети, на котором установлены 227 опор. Каждую из них диагностировали пятью приборами для выявления диагноза «D». Более подробно приведены особенности постановки диагноза «исправна» и «не исправна» при помощи выбранных приборов.

**1. УК-1401** - определяет прочность бетона по скорости «V» ультразвука диагноз неисправности определяется по исследованиям показателя П1 и П2 отношение к нормативному моменту менее 1,0;

**2. ПК-2** - оценивает коррозионное состояние опор контактной сети. Определение диагноза «исправна» осуществляется в пределах значений сопротивления

«R» заземления от 1000 Ом до 10 кОм остальные значения относятся к диагнозу «не исправна»;

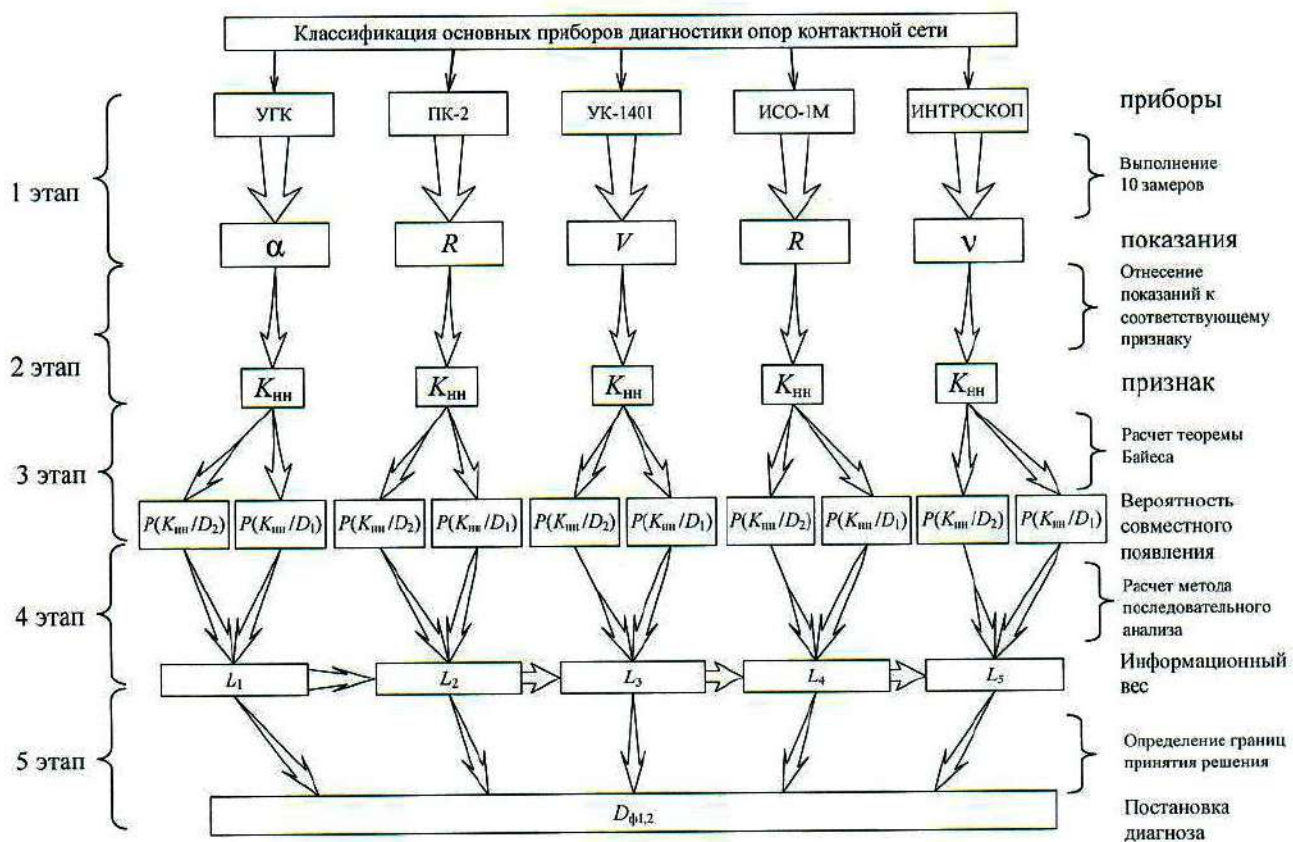


Рисунок 1 – Структурная схема формирования подхода к комплексной диагностике опор контактной сети:

$\alpha$  – угол наклона опоры;  $R$  – сопротивление цепи «консоль-рельс»;  $V$  – скорость распространения ультразвука в бетоне;  $v$  – частота затухания колебаний в железобетонной опоре;  $K_{нн}$  – признак «не норма» описывает техническое состояние до проведения измерений приборами контроля;  $D_1$  – диагноз, определяющий количество значений нормированной величины измеряемых параметров;  $D_2$  – диагноз, определяющий количество значений не входящих в границы нормированной величины измеряемых параметров;  $P(K_{нн}/D_i)$  – вероятность появления признака не норма  $K_{нн}$  у опоры с состоянием  $D_i$ ;  $L_i$  – информационный вес, определяемый как для показаний одного прибора диагностирования так и нескольких приборов;  $D$  – расчетный диагноз технического состояния железобетонной опоры контактной сети.

**3. ИСО-1М** - контролирует цепь заземления железобетонных опор контактной сети. Определение диагноза «исправна» и «не исправна» выполняется аналогично прибору ПК-2;

**4. УГК** - замеряет угол наклона опор « $\alpha$ » контактной сети. Диагноз «не исправна» определяется одним из следующих пунктов:

1. Наклон опоры относительно вертикали в сторону, противоположную действию основных нагрузок, превышает 2 %;
2. Наклон опор в сторону пути;
3. Наклон анкерных опор после передачи на них нагрузки в сторону, противоположную действию нагрузок от анкерки, превышает 0,5 %, или 50 мм на всю высоту опоры;



4. Наклон опоры в сторону действия основных нагрузок;

5. Наклон опор в сторону поля превышает 200 мм, в сторону пути – 30 мм на всю высоту опоры;

6. Наклон анкерных опор в сторону, противоположную действию нагрузок от анкерки превышает 100 мм, а в сторону действия нагрузок – 50 мм на всю высоту опор.

**5. ИНТРОСКОП** - выполняет оценку состояния опор контактной сети виброакустическим методом (параметр  $\nu$ ) диагноз «не исправна», ставится если параметр « $\nu$ » находится вне интервала основной высокой частоты 600-750 Гц.

**2 этап.** Приняты следующие допущения:

1. показания ( $V, R, \alpha, \nu$ ) приборов контроля состояния опор, формируют количественный показатель, диагноза  $D$  «исправен/неисправен», для оценки состояния опор;

2. все диагностируемые опоры имеют признак  $K_{\text{НН}}$  – не норма, для определения вероятности совместного события с диагнозом «исправен/неисправен».

Заключение о техническом состоянии железобетонной опоры (финальный диагноз  $D_{\text{ф}}$ ) как объекта диагностирования, будет представлять следующую зависимость:

$$D_{\text{ф}} = K_{\text{НН}} (\alpha, V, R_{\text{кр}}, \nu), \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол наклона опоры, град;

$V$  – замеренная скорость распространения ультразвуковой волны в бетоне, мкс;

$R_{\text{кр}}$  – сопротивление консоль-рельс, Ом;

$\nu$  – замеренная частота колебаний, Гц.

**3 этап.** Применим теорему Байеса для определения вероятности совместного появления состояния  $D_i$  и признака  $K_{\text{НН}}$ :

Принимая допущение от том, что состояние исследуемых опор характеризуется некоторым признаком  $K_{\text{НН}}$  – не норма, который проявляется во всех опорах не зависимо от поставленного диагноза  $D_i$  (опора исправна/неисправна). Появление признака  $K_{\text{НН}}$  является случайным, но статистически зависимым от наличия диагноза  $D_i$ , вероятность их совместного появления определяется по формуле:

$$P(D_i K_{\text{НН}}) = P(D_i) \cdot P(K_{\text{НН}} / D_i) = P(K_{\text{НН}}) \cdot P(D_i / K_{\text{НН}}). \quad (2)$$

Вероятность совместного появления диагноза  $D_i$  и признака  $K_{\text{НН}}$  «Не норма» находится по следующей формуле:

$$P(D_i / K_{\text{НН}}) = P(D_i) \frac{P(K_{\text{НН}} / D_i)}{P(K_{\text{НН}})}, \quad (3)$$

где  $P(D_i)$  – априорная вероятность диагноза, определенная по статистическим данным;

$P(K_{\text{НН}} / D_i)$  – вероятность появления признака  $K_{\text{НН}}$  у опоры с состоянием  $D_i$ ;

$P(K_{\text{HH}})$  – вероятность появления признака  $K_{\text{HH}}$  во всех опорах независимо от состояния. Расчет вероятностей представляет собой выполнение 3 этапа.

**4 и 5 этапы.** Для дальнейших расчетов применяется метод последовательного анализа. Допустим, что у опоры  $N^*$  имеется признак  $K_{\text{HH}}$  (продольные трещины), причем признак  $K_{\text{HH}}$  при диагнозе  $D_2$  (исправное состояние опоры) встречается чаще, чем при диагнозе  $D_1$  (неисправное состояние опоры). При этом если

$$\frac{P(K_{\text{HH}} / D_2)}{P(K_{\text{HH}} / D_1)} > A, \text{ то } N^* \in D_2, \quad (4)$$

где  $A$  – верхняя граница принятия решения о исправности опоры контактной сети.

В противном случае, когда чаще встречается признак  $K_{\text{HH}}$  при диагнозе  $D_1$ , то принимается решение:

$$\frac{P(K_{\text{HH}} / D_2)}{P(K_{\text{HH}} / D_1)} < B, \text{ } N^* \in D_1, \quad (5)$$

где  $B$  – нижняя граница принятия решения о неисправности опоры контактной сети. Отношение вероятностей (отношения правдоподобия) составляются последовательно:

$$B < \frac{P(K_{\text{HH}} / D_2)}{P(K_{\text{HH}} / D_1)} < A \quad (6)$$

Если в результате первой проверки условие (6) не выполняется, то необходима следующая проверка. Тогда отношение правдоподобия будет иметь вид:

$$B < \frac{P_1(K_{\text{HH}} / D_2)}{P_1(K_{\text{HH}} / D_1)} \cdot \frac{P_n(K_{\text{HH}} / D_2)}{P_n(K_{\text{HH}} / D_1)} < A, \quad (7)$$

где  $n$  – номер прибора.

Расчеты повторяются до тех пор, пока значение отношения не выйдет за одну из указанных границ ( $A$  или  $B$ ).

Указанные границы  $A$  и  $B$  определяют исходя из допускаемой вероятности ошибок первого  $\alpha$  и второго  $\beta$  рода, которые считаются заданными:

$$\frac{1-\beta}{\alpha} \geq A, \quad (8)$$

$$B \geq \frac{\beta}{1-\alpha}. \quad (9)$$

В практических расчетах можно принимать  $\alpha = \beta = 0,05 \dots 0,10$ . Значения  $\alpha$  и  $\beta$  можно выбрать из экономических соотношений. Для наиболее точной постановки диагноза,  $\alpha$  и  $\beta$  в работе были выбраны равными 0,05.

Результаты расчета метода последовательного анализа графически приведены на рисунке 4. На рассматриваемом участке выявлено 18 неисправных опор.

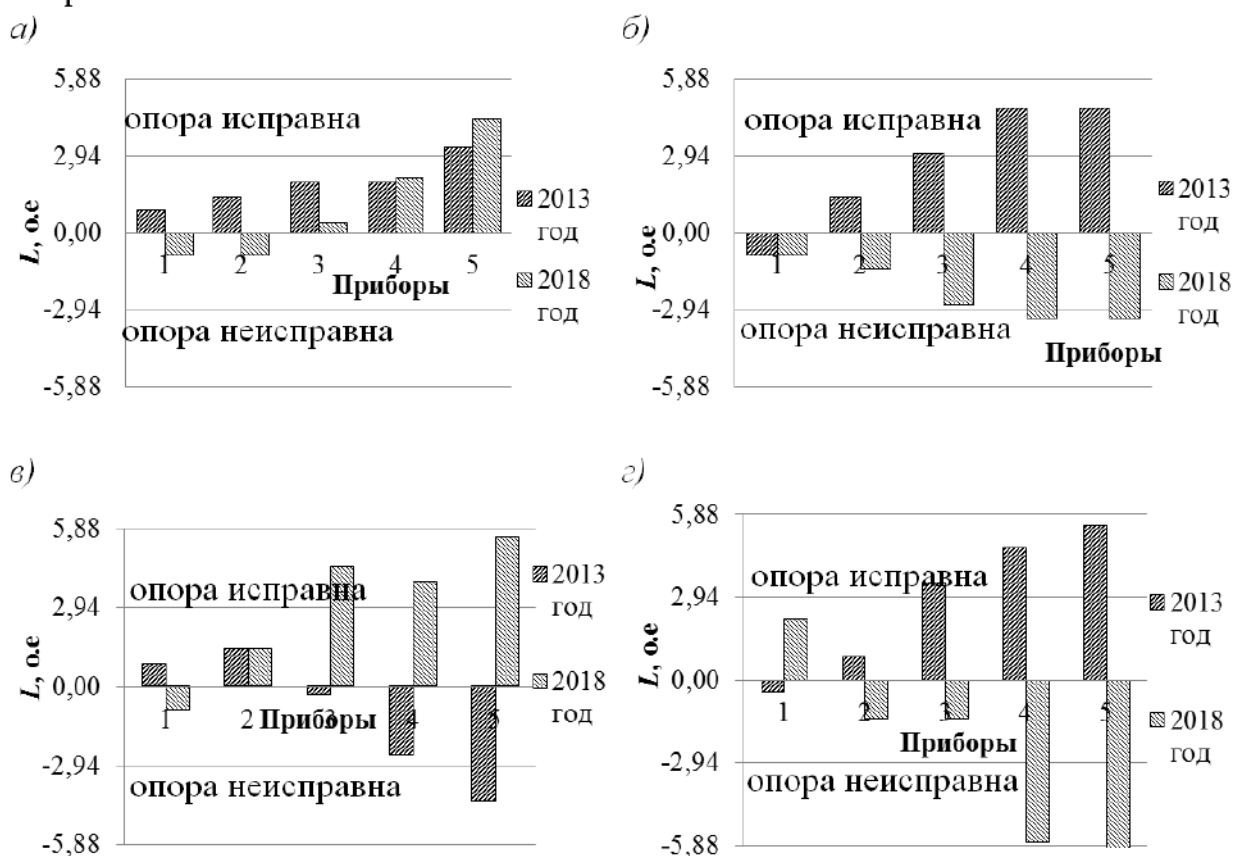


Рисунок 2 – Результаты расчета постановки финального диагноза для опоры 1 (а), опоры 2 (б), опоры 6 (в) и опоры 227 (з)

Методология УРРАН включает в себя «Методику оценки рисков для контактной сети» не учитывает «частичный отказ», и «Методику расчета показателей надежности и безопасности функционирования контактной сети» которая позволяет учитывать «частичный отказы» при определении надежности.

Риск включает сочетание двух составляющих: 1) вероятности возникновения события или сочетания событий, ведущих к опасности или частоты возникновения таких событий; 2) последствий возникновения (ущерба) данных событий.

Объединение указанных методик позволит оценить состояние опорного парка еще не отказавших опор, но уже принятых неисправными по результатам комплексной диагностики, а так же выполнить оценку риска на выбранном участке эксплуатации. В итоге расчет будет выполняться следующим образом:

$$r_i^{\text{KC}} = r_i^{\text{oKC}} + k_i^{\text{чрсKC}} \cdot r_i^{\text{чрсKC}}, \quad (10)$$

где  $r_i^{\text{oKC}}$  – количество отказов контактной сети  $i$ -го участка;

$k_i^{\text{чрсКС}}$  – коэффициент частичного работоспособного состояния контактной сети;  
 $r_i^{\text{чрсКС}}$  – количество частичных работоспособных состояний контактной сети – отклонений от нормируемых параметров, угрожающих безопасности движения поездов и надежности процесса токосъема токоприемников, оцениваемых 400 баллами.

На основании известных данных по влиянию «частичных отказов» на безопасность движения, значение коэффициента частичного работоспособного состояния принимается  $k_i^{\text{чрсКС}} = 0,33$ .

Интенсивность отказов, вычисляется по формуле

$$\lambda = r / T_{\text{наб}}, \quad (11)$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов;  
 $r$  – количество отказов;  
 $T_{\text{наб}}$  – интервал наблюдения, лет.

Подставляя значение  $r_i^{\text{КС}}$  в формулу 11 вместо  $r$ , рассчитаем интенсивности отказов на выбранном участке с учетом частичных работоспособных состояний опор контактной сети:

$$\lambda = r_i^{\text{КС}} / T_{\text{наб}}, \quad (12)$$

Интенсивность отказов опоры контактной сети определяется по формуле:

$$\lambda_1 = \lambda \cdot k_{\text{вес}}, \quad (13)$$

где  $k_{\text{вес}}$  – весовой коэффициент.

Определим интенсивность отказов опор контактной сети на исследуемом участке железной дороги по формуле:

$$\lambda_1^{\text{э}} = \frac{\lambda_1}{n} \cdot k^k \cdot k^c, \quad (14)$$

где  $k^k$  – переводной коэффициент;  $k^c$  – коэффициент, который учитывает срок эксплуатации контактной подвески;  $n$  – количество опор контактной сети на участке.

Величина ущерба для одного отказа определяется по формуле

$$C = \frac{C_{\Sigma}}{r_i^{\text{КС}}}, \quad (15)$$

где  $C_{\Sigma}$  – продолжительность устранения отказов до возобновления движения, определяется как общая продолжительность простоя участка по формуле:

$$C_{\Sigma} = \eta_{\text{тр}} \cdot r_i^{\text{КС}} \quad (16)$$

где  $\eta_{\text{тр}}$  – норма времени на восстановление опор контактной сети,

$$\eta_{\text{тр}} = 2 \text{ чел.} \cdot \text{ час.}$$

Уровень риска для одной неисправной опоры определяется по формуле

$$R = \lambda_1^3 \cdot C. \quad (17)$$

Уровень риска для участка определяется по формуле:

$$R_{\text{уч.}} = R \cdot n \quad (18)$$

Величина риска для рассматриваемого участка в целом, с учетом частичных отказов, составила 0,394. Так как допустимый риск по участкам эксплуатации принят не более 0,1, то риск от падения опоры является недопустимым, в таком случае необходимо выполнить частичную или полную замену опор на исследуемом участке.

**В третьей главе** разработана математическая модель процесса изменения несущей способности опор контактной сети.

На основе результатов измерений, проводимых при комплексной диагностике за первые три года, приняты значения несущей способности железобетонных опор контактной сети. Для того чтобы проследить динамику процесса снижения несущей способности, на рассматриваемом перегоне, из общего числа опор были выбраны электрокоррозионноопасные. В ходе испытаний выявлено, что в течение срока эксплуатации, значения несущей способности не переходят в предыдущее состояние. Это значит, что деструктивные процессы, влияющие на несущую способность опор контактной сети необратимы. На основании выше сказанного сделано допущение о том, что железобетонная опора контактной сети является невозстанавливаемым объектом. Поэтому накопления микроповреждений в бетоне приводит к постепенному отказу железобетонных опор.

Значение несущей способности опоры контактной сети определяется как величина прочности по отношению к приложенной нагрузке. Процесс изменения несущей способности опор контактной сети будет определяться, как способность воспринимать приложенную к ней нагрузку в течение срока эксплуатации.

Применена таблица распределения несущей способности по показаниям прибора УК-1401 (Таблица 1).

Таблица 1 – Несущая способность опор в зависимости от показателя П2

—	Показатель П2							
	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45
Несущая способность стоек (кратность по отношению к нормативному моменту)	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2	1,1	1	0,9
Состояния опоры, относительно несущей способности	0	1	2	3	4	5	6	7

Снижение несущей способности по отношению к нормативному моменту ниже «1» является недопустимой величиной, поэтому принимается допущение о том, что значения, характеризующие несущую способность, менее указанной величины, являются характеристикой поглощающего состояния опоры контактной сети «7». Соответственно значения равные 1,6 или более характеризуют исправное состояние «0». Все остальные значения, находящиеся на интервале между 1,6 и 1,0 принимаются как предотказные состояния «6 – 1». Тогда модель процесса изменения несущей способности железобетонной опоры контактной сети, можно представить в виде графа состояний и переходов (Рисунок 3):

Значения интенсивностей  $\varepsilon_0 - \varepsilon_6$  характеризуют постепенный отказ – поэтапное снижение несущей способности переходом из исправного состояния в каждое последующее состояние. Значения интенсивностей  $\lambda_0 - \lambda_6$  характеризуют внезапный переход из исправного и предотказных состояний в состояние отказа.

Для определения вероятностей нахождения опоры в каждом из состояний, составляется система уравнений Колмогорова:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_0(t)}{dt} = -(\varepsilon_0 + \lambda_0)P_0(t) \\ \frac{dP_1(t)}{dt} = \varepsilon_0 P_0(t) - (\varepsilon_1 + \lambda_1)P_1(t) \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = \varepsilon_1 P_1(t) - (\varepsilon_2 + \lambda_2)P_2(t) \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = \varepsilon_2 P_2(t) - (\varepsilon_3 + \lambda_3)P_3(t) \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = \varepsilon_3 P_3(t) - (\varepsilon_4 + \lambda_4)P_4(t) \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = \varepsilon_4 P_4(t) - (\varepsilon_5 + \lambda_5)P_5(t) \\ \frac{dP_6(t)}{dt} = \varepsilon_5 P_5(t) - (\varepsilon_6 + \lambda_6)P_6(t) \\ \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_0 P_0(t) + \lambda_1 P_1(t) + \lambda_2 P_2(t) + \lambda_3 P_3(t) + \lambda_4 P_4(t) + \lambda_5 P_5(t) + (\varepsilon_6 + \lambda_6)P_6(t) \end{array} \right. \quad (19)$$

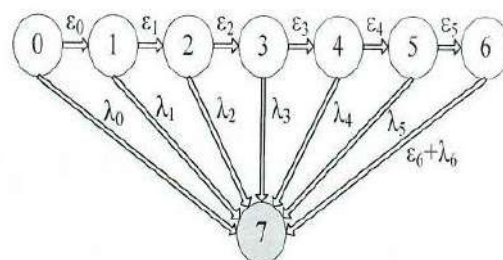


Рисунок 3 – Граф состояний и переходов для железобетонной опоры контактной сети

Задаваясь начальными условиями: при  $t_0 = 0$ ,  $P_0 = 1$ , получаем вероятность нахождения системы в состоянии  $P_0(0)$ :

$$P_0(0) = e^{-K_0 t}, \quad (20)$$

Подставляя решение (20) во второе уравнение системы (19), определяем вероятность нахождения опоры в следующем состоянии  $P_1(t)$ :

$$P_1(t) = \frac{\varepsilon_0}{Z_1 - Z_0} e^{-Z_0 t} + \frac{\varepsilon_0}{Z_0 - Z_1} e^{-Z_1 t} \quad (21)$$

Тогда, в общем виде вероятность нахождения опоры контактной сети в каждом из состояний имеет вид:

$$P_n(t) = \frac{\varepsilon_0 \cdot \dots \cdot \varepsilon_{n-1}}{(Z_1 - Z_0) \cdot \dots \cdot (Z_{n-1} - Z_0)} \cdot e^{(-Z_0 t)} + \frac{\varepsilon_0 \cdot \dots \cdot \varepsilon_{n-1}}{(Z_0 - Z_n) \cdot \dots \cdot (Z_{n-1} - Z_n)} \cdot e^{(-Z_n t)}, \quad (22)$$

где коэффициенты  $Z_i$  определяется по формуле:

$$Z_i = \varepsilon_i + \lambda_i, \quad (23)$$

где  $i = 1, 2, 3 \dots n$  - состояния железобетонной опоры.

На интервале времени три года определяются значения постепенных и внезапных отказов для каждого состояния, после чего рассчитываются вероятности нахождения опор контактной сети в каждом из предотказных состояний. Исключая вероятность нахождения опоры в состоянии отказа, то есть в седьмом состоянии, определяются значения функции надежности:

$$F(t) = P_0(t) + P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) \quad (24)$$

Полученная математическая модель позволяет описать процесс снижения несущей способности опоры контактной сети и определить оставшийся срок эксплуатации.

Построение матриц переходных вероятностей подтверждает стационарность процесса снижения несущей способности опор контактной сети, соответственно и определение сроков достижения предельных величин. При сравнении прогнозируемых значений с экспериментальными значениями несущей способности, погрешность не превысила 3 %.

На рисунке 4 визуально изображен процесс снижения надежности  $F(t)$  железобетонных опор контактной сети при эксплуатации на исследуемом участке.

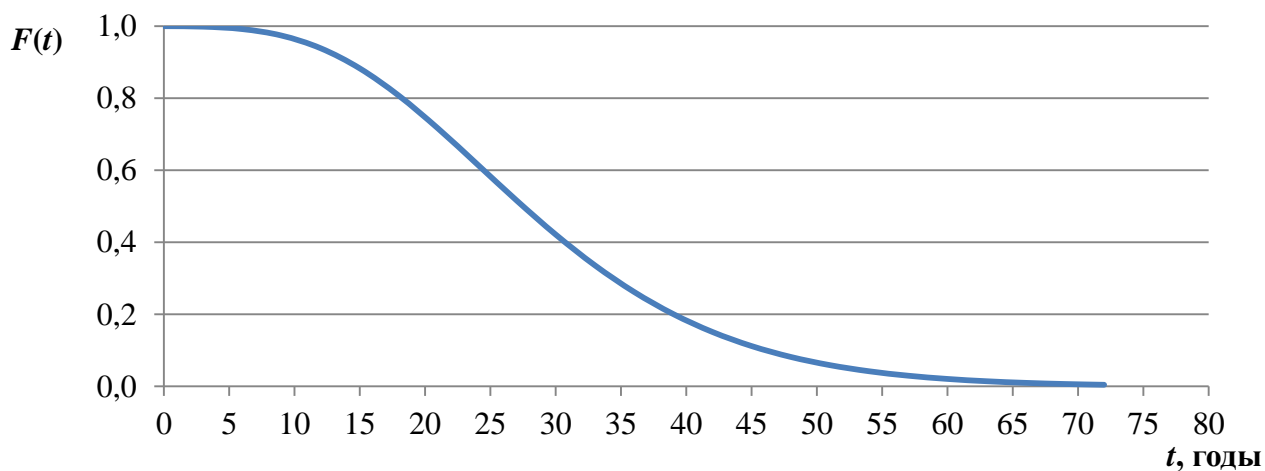


Рисунок 4 – Процесс снижения надежности железобетонных опоры контактной в ходе эксплуатации

**В четвертой главе** разработан алгоритм проведения комплексной диагностики опор контактной сети с учетом срока их эксплуатации.

Блок-схема алгоритма комплексной диагностики приведена на рисунке 5 и включает в себя применение программного обеспечения, для снижения ошибок при выполнении расчетов.

Целью алгоритма является качественная обработка результатов измерений с последующей оценкой стоимости жизненного цикла участка эксплуатации. В итоге становится возможным принятие обоснованного решения по замене опоры контактной сети или продлению ее срока эксплуатации.

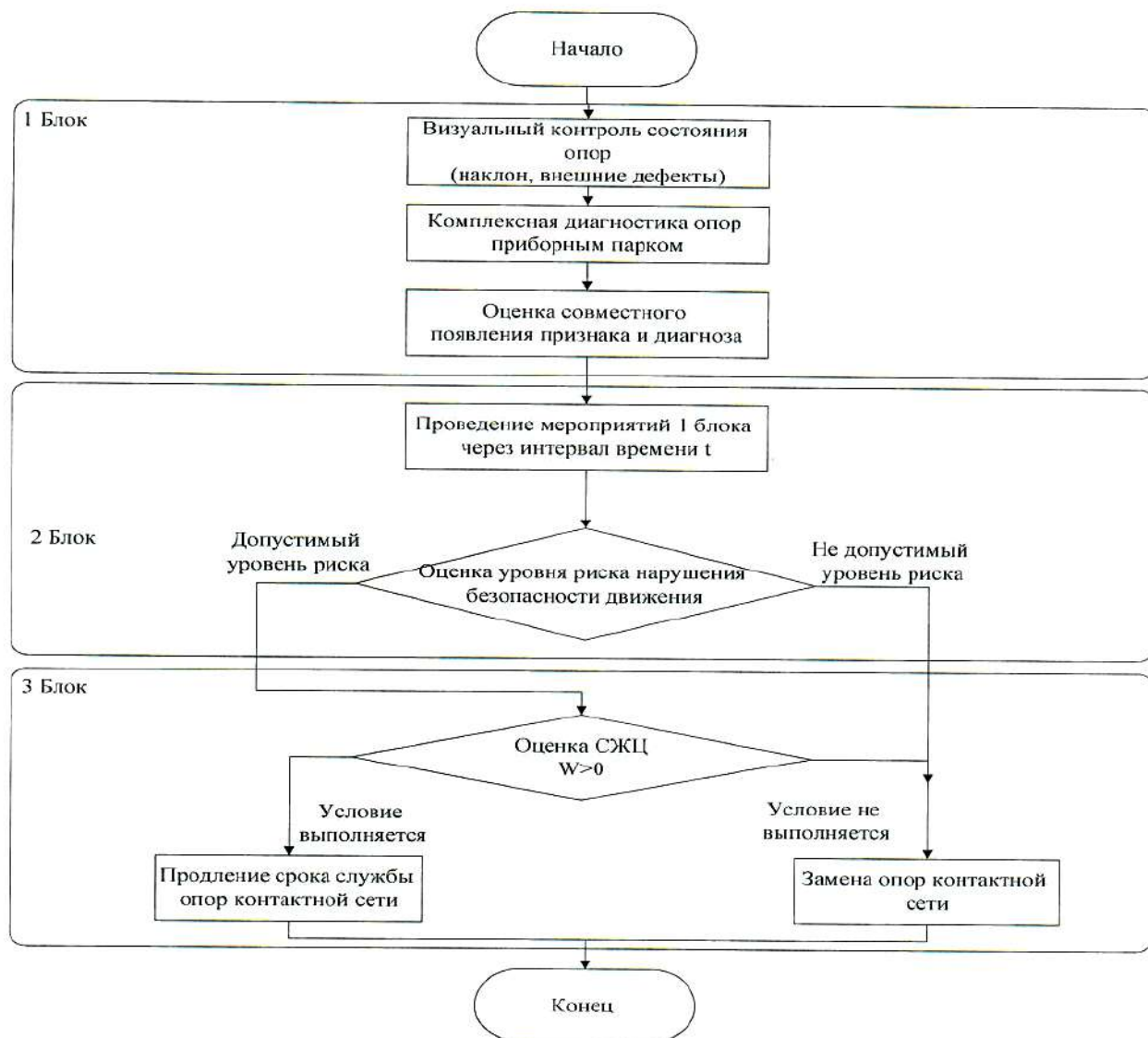


Рисунок 5 – Блок-схема организации комплексной диагностики опоры контактной сети с учетом ее срока эксплуатации.

Разработанный алгоритм комплексной диагностики включает в себя ряд последовательно выполняемых мероприятий по оценке технического состояния железобетонных опор по рассматриваемому участку эксплуатации и условно разбивается на три основных блока:

1 блок: включает в себя получение экспериментальных данных о состоянии опор контактной сети, выполняется постановка диагноза об исправности или не исправности опор по рассматриваемому участку;

2 блок: выполняется оценка риска по участку с учетом частичных отказов;

3 блок: осуществляется расчет стоимости оставшегося жизненного цикла по участку, для экономического обоснования принятия решения о продлении срока



эксплуатации опор или замене на новые. Экономическое обоснование производится на основании условия:

$$\begin{cases} \text{при } W < 0 \text{ выполняется замена} \\ \text{при } W > 0 \text{ выполняется продление срока службы} \end{cases}, \quad (25)$$

где  $W$  – определяется по формуле:

$$W = \overline{СЖЦ}_3 - (1 + k_{\text{мод}}) \cdot \overline{СЖЦ}_\Pi, \quad (26)$$

где  $\overline{СЖЦ}_3$  – среднегодовая стоимость жизненного цикла в случае замены, руб.;

$\overline{СЖЦ}_\Pi$  – среднегодовая стоимость жизненного цикла в случае продления срока службы, руб.;

$k_{\text{мод}} \in [0; 0,2]$  – коэффициент модернизации.

Результатом выполнения основных этапов разработанного алгоритма комплексной диагностики является принятие решения, направленного на полную замену опор контактной сети, либо продление срока службы, с учетом результатов экономического расчета и величины риска на исследуемом участке эксплуатации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе применения методов теории вероятности, математической статистики, расчетов разработанной математической модели, а также инструментального контроля с применением приборов диагностики на объектах эксплуатации дано новое решение актуальной научно-технической задаче по комплексной диагностике опор контактной сети.

Проведенные научные исследования позволяют сформулировать следующие выводы:

1. Анализ существующих отечественных и зарубежных подходов к определению технического состояния, а также анализ эксплуатационной надежности железобетонных опор контактной сети в границах Свердловской железной дороги позволил определить перспективу развития комплексного подхода к диагностике железобетонных опор.

Подход к комплексной диагностике содержит в себе контроль нескольких параметров совместно с методами статистического анализа и теории вероятности.

2. Разработан новый подход к комплексной диагностике нескольких параметров железобетонных опор контактной сети. Совместное применение теоремы Байеса и метода последовательного анализа позволяет наиболее достоверно определить техническое состояние, задаваясь необходимым уровнем точности (коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ , равные 0,05), который указывает на границы принятия решений. Комплексная диагностика выбранного участка показала неисправность 18 опор контактной сети. По результатам проведения комплексной диагностики опор для

управления безопасностью на выбранном участке, применен новый подход к оценке риска задержки поездов от падения опоры, который составил 0,394 час/год, учитывающий не произошедшие отказы опор контактной сети, а выявленные неисправные опоры, при наличии которых не допускается эксплуатация участка железной дороги.

3. Разработана математическая модель процесса изменения несущей способности опор контактной сети, которая подтверждается результатами экспериментальных исследований. Определен ряд нормативных значений несущей способности, изменяющихся в пределах от 1,6 до 1, что характеризует возможность опоры воспринимать приложенные нагрузки.

На основе математической модели исследован процесс снижения несущей способности опор контактной сети. Полученные численные результаты расчетов прогнозируемых значений сошлись с результатами эксперимента в пределах 3%.

4. Предложен алгоритм комплексной диагностики опоры контактной сети, который позволил сформировать систему контроля технического состояния опор контактной сети. Определена стоимость жизненного цикла рассматриваемого участка эксплуатации: для случая продления срока службы – 16,6 млн руб, для случая полной замены опор контактной сети – 13,7 млн руб.. Руководствуясь результатами диагностики и экономическим обоснованием, значительно упрощается процесс разработки мероприятий по повышению надежности и безотказности перевозочного процесса. По итогам исследования предложено на рассмотренном участке эксплуатации выполнить полную замену опор контактной сети (проведение капитального ремонта).

## **СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **а) научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации:**

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

2. **Окунев, А.В.** Комплексный подход к диагностике опор контактной сети / А.В. Окунев // Транспорт Урала. – 2018. – № 4 (59). – С. 91–96.

3. **Окунев, А.В.** Определение предельных состояний опор контактной сети на основе математического моделирования изменения их несущей способности / А.В. Окунев, А.Г. Галкин, А.А. Ковалев // Известия Транссиба. – 2019. – № 3.

### **в) научные работы, опубликованные в других изданиях:**

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

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

6. **Окунев, А.В.** Проблематика обслуживания опор контактной сети на протяжении жизненного цикла / А.В. Окунев // Современный научный вестник. – 2014. – № 2 (17). – С. 23;

7. **Окунев, А.В.** Оценка состояния опор контактной сети на протяжении жизненного цикла / А.В. Окунев, А.А. Ковалев // Инновационный транспорт. – 2015. – № 3 (17). – С. 23-29;

8. **Окунев, А.В.** Разработка автоматизированной системы по определению стоимости жизненного цикла участка реконструкции контактной сети / А.В. Окунев // Инновационный транспорт. – 2016. – № 4 (22). – С. 23-26;

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

10. **Окунев, А.В.** Разработка стратегии обслуживания опор контактной сети / А.В. Окунев // Инновационный транспорт. – 2018. – № 1 (27). – С. 63-66;

#### г) патенты:

11. **Окунев, А.В.** Расчет стоимости жизненного цикла сложных технических систем / А.В. Микава, А.Г. Галкин, А.А. Ковалев, А.В. Окунев // А.с. 2013613993 Рос. Федерация, 2013.

### ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Основные положения и результаты исследований автором получены самостоятельно. Статьи [2, 6, 8, 10] подготовлены единолично. Личный вклад автора в научных работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: [1] – выполнен анализ основных подходов в создании объектов эксплуатации и инфраструктуры; [3] – проведен анализ надежности работы устройств контактной подвески; [4] – рассмотрены основные модели при разработке программных продуктов, предложена спиральная модель; [5] – определены основные этапы по рассмотрению стоимости жизненного цикла устройств контактной сети; [7] – сформирован принцип оценки состояния опор контактной сети; [9] – разработана классификация опор контактной сети по надежности; [11] – разработан программный код программного продукта по расчету стоимости жизненного цикла сложных технических систем.

**Окунев Александр Владимирович**

**РАЗРАБОТКА КОМПЛЕКСНОГО ПОДХОДА К ДИАГНОСТИКЕ  
ОПОР КОНТАКТНОЙ СЕТИ НА ЭТАПЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

**05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,  
тяга поездов и электрификация (технические науки)**

Подписано в печать «18» декабря 2019

Формат 60 x 84 1/16.  
Тираж 100 экз.

Усл. печ. л. 1,25  
Заказ № 59

---

УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66