На правах рукописи

Даваадорж Батбаатар

МОДЕЛИ И АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (региональные народнохозяйственные комплексы)

Автореферат
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск 2019

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация производственных процессов» ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Каргапольцев Сергей Константинович**

Официальные оппоненты: **Николайчук Ольга Анатольевна** доктор технических наук, доцент, ФГБУН «Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова» СО РАН (г. Иркутск), старший научный сотрудник

Кривов Максим Викторович кандидат технических наук, доцент, кафедра вычислительных машин и комплексов ФГБОУ ВО «Ангарский государственный технический университет», заведующий кафедрой

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита состоится 09 апреля 2019 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.070.07 на базе ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 24, корпус 9, зал заседаний ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Байкальский государственный университет» по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, корпус 2, ауд. 101, www. bgu.ru.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 664003, г. Иркутск, ул. Ленина, 11, БГУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.070.07.

Автореферат разослан « » января 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Т.И. Ведерникова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие экономик различных стран во многом определяется перевозками грузов, осуществляемых автомобильным, железнодорожным или иным видом транспорта. В Монголии ведущая роль принадлежит железнодорожному транспорту, которым осуществляются основные грузовые перевозки. Главным перевозчиком грузов железнодорожным транспортом в Монголии является Улан-Баторская железная дорога (УБЖД). Большинство проверенных и эффективных технологий, разработанных и апробированных в компании ОАО «РЖД», со временем внедряются на УБЖД.

Важнейшим направлением деятельности компании ОАО «РЖД» является реализация стратегии ее инновационного и стратегического развития. Большое внимание в стратегии инновационного развития уделяется безопасности движения поездов различного назначения. Это в полной мере относится и к УБЖД. Учитывая, что перевозки железнодорожным транспортом, а также железнодорожный путь, как важнейшая компонента перевозочного процесса, являются сложными системами, их необходимо исследовать с позиций системного анализа, привлекая математические средства анализа, принятия управленческих решений и прогнозирования. Отметим зарубежных и российских ученых, внесших существенный вклад в системный анализ, теорию принятия решений, статистический анализ и прогнозирование: Бокс Дж., Дженкинс Г., Саати Т., Андерсон Т., Дрейпер Н., Афифи А., Кендалл М., Моисеев Н.Н., Айвазян С.А., Ларичев О.И., Перегудов Ф.И., Подиновский В.В., Тарасенко Ф.П., Черноруцкий И.Г. и др. Безопасность перевозочного процесса во многом определяется надежностью функционирования железнодорожного пути. В связи с этим на железных дорогах России и Монголии большое внимание уделяется созданию и внедрению систем комплексного мониторинга инфраструктуры пути, а также средствам диагностики верхнего строения пути.

Отметим российских специалистов, внесших существенный вклад в развитие методов и средств мониторинга и диагностики рельсов, а также элементов инфраструктуры, что позволяет использовать стратегию обслуживания пути по техническому состоянию: Ададуров С.Е., Розенберг Е.Н., Антипов А.Г., Марков А.А., Михалкин И.К., Бирюзов В.П., Конаков В.Л., Кузнецов В.В., Краснов О.Г., Начигин В.А. и др.

Проведенные за последние годы работы позволили создать и внедрить информационно-аналитические системы диагностики и мониторинга типа «ЭКСПЕРТ», комплексную автоматизированную систему комбинаторного анализа данных КАСКАД и другие подобные системы. Несмотря на большую проделанную работу в этом направлении, необходимо продолжать разрабатывать и внедрять алгоритмическое и программное обеспечение для мониторинга, диагностики и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути, необходимых для поддержки принятия управленческих решений, в частности, связанных с процессом перевозки грузов на УБЖД.

Все выше сказанное обосновывает актуальность выбранной темы диссертационной работы и позволяет сформулировать ее цель и задачи.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности принятия управленческих решений за счет разработки и применения алгоритмического и программного обеспечения мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути.

Реализация сформулированной цели достигается решением следующих **задач**:

1. Обоснование необходимости создания и развития методов мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного, включая рельсы и рельсовые скрепления.

2. Создание алгоритмического обеспечения для оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути, включая выбор вероятностной модели для рельсовых скреплений, при ограниченном объеме статистической информации.

3. Создание алгоритмического и программного обеспечения для прогнозирования остаточного ресурса рельсов по информации мониторинга пути.

4. Апробация созданного алгоритмического и программного обеспечения мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути по статистической и экспертной информации.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования в диссертационной работе является компоненты железнодорожного пути, содержащие рельсы и рельсовые скрепления. Предметом диссертационного исследования являются алгоритмическое обеспечение применительно к мониторингу и оценке показателей надежности компонентов железнодорожного пути.

Тематика работы соответствуют следующим пунктам паспорта специальности 05.13.01: п. 2 «Формализация и постановка задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений и обработки информации», п. 5 «Разработка специального математического и алгоритмического обеспечения систем анализа, оптимизации, управления и обработки информации», п. 11 «Методы и алгоритмы прогнозирования и оценки эффективности, качества и надежности сложных систем».

Научную новизну диссертации представляют следующие положения, которые выносятся на защиту:

1. Формализация процедуры оценки показателей надежности рельсовых скреплений в условиях неопределенности, основанной на вероятностной модели наработки в виде треугольного распределения и экспертной информации.

2. Численные алгоритмы вычисления показателей надежности рельсовых скреплений, использующих информацию имитационного моделирования.

3. Алгоритмическое обеспечение оценки показателей надежности рельсовых скреплений в условиях неопределенности исходных данных, названное нечетким численным анализом.

4. Алгоритмическое обеспечение прогнозирования остаточного ресурса рельсов по их боковому износу, необходимое для внедрения их обслуживания по фактическому состоянию, основанное на информации мониторинга железнодорожного пути, точечных экспертных суждений и регрессионном анализе.

Практическая значимость диссертации заключается в разработке процедуры оценки остаточного ресурса рельсов по информации мониторинга пути и исследования показателей надежности рельсовых скреплений, использующая программное обеспечение «Оценка остаточного ресурса рельсов». Созданное алгоритмическое и программное обеспечение апробировано и используется в дирекции инфраструктуры Улан-Баторской железной дороги при разработке мероприятий по совершенствованию управленческих решений для технологии мониторинга и диагностики верхнего строения пути. Акт о внедрении приведен в приложении.

Методы исследования и достоверность результатов. Результаты и выводы диссертационной работы основаны на применении методов системного анализа, имитационного моделирования, теории вероятностей и математической статистики, а также методов прогнозирования. Достоверность разработанного алгоритмического и программного обеспечения проверена расчетами на компьютере по информации мониторинга пути Улан-Баторской железной дороги, полученной диагностическим вагоном «Декарт», а также информации экспертов и сравнением этих результатов с фактическими значениями.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях: 7-я международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, 2016; 7-я всероссийская НПК «Безопасность критичных инфраструктур и территорий», Екатеринбург, 2016; The Fifth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR-2016). Nanchang, China, October 20-21, 2016; 8-я международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, 2017, 9-я международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона», Иркутск, 2018.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 научных работ, из них четыре публикации в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы из 129 наименований и приложения с актом внедрения. Общий объем работы без приложения составляет 145 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определена научная и практическая новизна, представлено краткое содержание диссертационной работы по главам.

В первой главе проведен анализ средств и методов мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути, обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи. При этом: а) приведены основные положения теории надежности применительно к железнодорожному пути и его компонентам; б) проведен анализ средств мониторинга и диагностики верхнего строения пути; в) дана характеристика перевозок на железных дорогах в условиях неопределенности и риска; г) проведен анализ методов прогнозирования на основе временных рядов, необходимых для оценки остаточного ресурса рельсов. На Улан-Баторской железной дороге для контроля и диагностики железнодорожного пути используется вагон дефектоскоп-путеизмеритель «Декарт», разработанный группой компаний «Твема». Использование вагонов дефектоскопов-путеизмерителей «Декарт» на железных дорогах страны позволяет на 20-30% снизить эксплуатационные расходы на контроль пути и рельсов за счет сокращения затрат на обслуживающий персонал и аренду локомотивов. Автоматизированный контроль и оценка состояния рельсовой колеи 1520 мм в реальном масштабе времени соответствует инструкции ЦП-515 (основная) и инструкции ТУ-81, действующей в Монголии.

У автоматизированного контроля и оценки состояния рельсовой колеи имеются следующие возможности: приведение всех видов контроля геометрии рельсовой колеи к единой координате; возможность отображения данных предыдущего проезда в реальном времени; совместный анализ (на одном экране) видеокадров с путеизмерительными данными; интеграция всех диагностических систем в единой программной оболочке; обеспечение самодиагностики аппаратных и программных средств оборудования.

Одним из перспективных типов скреплений, используемых на УБЖД, является рельсовое скрепление АРС. АРС – это упругое бесподкладочное безрезьбовое скрепление с нераздельным анкером, замоноличенным в шпалу. Отказы скреплений типа АРС происходят по различным причинам, например: смятие и обгорание изоляторов, излом головки анкера вследствие механического повреждения, необходимость смены рельсов вследствие значительного их бокового износа и использования всех режимов регулировки.

Во второй главе описано созданное алгоритмическое обеспечение для мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути. При этом: а) проведена постановка задачи оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути; б) обоснованы модели наработки рельсового скрепления при ограниченном объеме

статистической информации; в) разработано алгоритмическое обеспечение для прогнозирования остаточного ресурса рельсов по их боковому износу; г) приведены выводы по результатам проведенных исследований.

При отсутствии существенной по объему статистической информации о наработке рельсовых скреплений, в работе используется подход с привлечением экспертов. В качестве вероятностной модели наработки обосновано треугольное распределение с параметрами: t_m – наибольшее значение; t_o – наиболее вероятное значение (мода). Подчеркнем, что наработка измеряется в условных единицах, подробнее об этом будет сказано в главе 3. Плотность распределения вероятностей этого распределения имеет вид

$$f(t)=\begin{cases}\dfrac{2\cdot t}{t_m\cdot t_0},\ 0<t\le t_0\\[2ex] \dfrac{2(t_m-t)}{t_m\cdot(t_m-t_0)},\ t_0<t<t_m\end{cases}. \qquad (1)$$

В работе получен алгоритм моделирования величины наработки для треугольного распределения

$$t=\begin{cases}\sqrt{t_m\cdot t_0\cdot r},\ 0<r\le\dfrac{t_0}{t_m};\ 0<t\le t_0\\[2ex] t_m-\sqrt{t_m(t_m-t_0)(1-r)},\ \dfrac{t_0}{t_m}<r<1;\ t_0<t<t_m\end{cases}. \qquad (2)$$

Здесь r – значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале (0, 1). Точечная оценка ($\tilde{t}$) и доверительный интервал $(t_1;\ t_2)$ для математического ожидания по результатам имитационного моделирования по алгоритму (2) равны

$$\tilde{t}=\frac{1}{n}\sum_{q=1}^{n}t_q;\ t_1=\tilde{t}-\delta;\ t_2=\tilde{t}+\delta, \qquad (3)$$

где

$$\delta=\frac{z_\gamma\cdot s}{\sqrt{n}};\ s=\sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n}t_q^2-n\cdot\tilde{t}^{\,2}}{n-1}};\ (\delta/\tilde{t})\cdot 100<e_z. \qquad (4)$$

Здесь t_q – выборочные значения наработки; z_γ – квантиль нормированного нормального распределения для доверительной вероятности γ, s – оценка среднеквадратического отклонения. Объем выборки n должен обеспечить заданную относительную погрешность e_z в процентах (4).

Для треугольного распределения (1) в работе найдены следующие модели показателей надежности: вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, средняя наработка до отказа, гамма-процентный ресурс до отказа для вероятности γ, вероятность безотказной работы остаточного ресурса, средний остаточный ресурс до отказа, гамма-процентный остаточный ресурс для вероятности γ. Приведем некоторые из них: 1) средняя наработка до отказа и гамма-процентный ресурс до отказа

$$\bar{t}_0 = \frac{1}{3}(t_m + t_0)\,; \quad t(\gamma) = \begin{cases} \sqrt{(1-\gamma)\cdot t_m \cdot t_0},\ 1-\dfrac{t_0}{t_m} \le \gamma < 1 \\ t_m - \sqrt{\gamma \cdot t_m \cdot (t_m - t_0)},\ 0 < \gamma < 1-\dfrac{t_0}{t_m} \end{cases}; \tag{5}$$

2) средний остаточный ресурс до отказа:

$$\text{а)}\ \ 0<x\le t_o,\ \bar{y}_x = \frac{x^3 - 3\cdot t_m \cdot t_0 \cdot x + t_m \cdot t_0 (t_m + t_0)}{3\cdot(t_m \cdot t_0 - x^2)}; \qquad \text{б)}\ t_o<x<t_m,\ \bar{y}_x = \frac{t_m - x}{3}; \tag{6}$$

3) гамма-процентный остаточный ресурс: а) $0<x\le t_o$,

$$y_x(\gamma) = \begin{cases} \sqrt{(1-\gamma)\cdot t_m \cdot t_0 + \gamma \cdot x^2} - x,\ \dfrac{t_0 \cdot (t_m - t_0)}{t_m \cdot t_0 - x^2} \le \gamma < 1 \\ t_m - x - \sqrt{\dfrac{\gamma \cdot (t_m \cdot t_0 - x^2)\cdot (t_m - t_0)}{t_0}},\ 0 < \gamma < \dfrac{t_0 \cdot (t_m - t_0)}{t_m \cdot t_0 - x^2} \end{cases}; \tag{7}$$

$$\text{б)}\ t_o<x<t_m, \qquad y_x(\gamma) = (t_m - x)\cdot(1-\sqrt{\gamma})\,. \tag{8}$$

Используя литературные источники, получены численные алгоритмы вычисления показателей надежности рельсовых скреплений по результатам имитационного моделирования наработки. Для этого, используя алгоритм моделирования значений случайных величин для треугольного распределения, получим выборку наработок объемом n, максимальное выборочное значение обозначим b. Далее сгруппируем выборку по J интервалам; длина интервала и узлы равны

$$\Delta t = b/J;\ t_j = j\cdot\Delta t,\ \ j = \overline{1,J},\ t_0 = 0;\ t_J = b\,. \tag{9}$$

Введем следующие обозначения: n_j – число выборочных значений наработок рельсовых скреплений, попавших в интервал (t_{j-1},t_j), $\sum_{j=1}^{J} n_j = n$, n – объем выборки; $m_j = \sum_{i=1}^{j} n_i / n$ – накопленные относительные частоты, $m_J=1$.

Обратная величина для относительных частот

$$k_j = 1 - m_j;\ j=1,\ldots,J,\ k_0=1. \tag{10}$$

Для описания численной вероятности безотказной работы используется аппроксимация отрезками прямых. Эти прямые соединяют точки с координатами (t_j, k_j). Учитывая обратную величину (10), окончательно получим

$$P_r(t) = \begin{cases} 0,\ \ t \ge t_m \\ k_{j-1} + (t - t_{j-1})(k_j - k_{j-1})\dfrac{J}{t_m},\ 0 \le t < t_m, \\ 1,\ \ t < 0 \end{cases} \tag{11}$$

где $t_{j-1} \le t < t_j,\ \ j = \overline{1,J}$.

Используя модель (11), можно найти численную среднюю наработку до отказа

$$\bar{t}_r = \int_0^{t_m} P_r(t)dt = \frac{t_m}{J}(0{,}5 + \sum_{j=1}^{J} k_j)\,, \tag{12}$$

а также численный гамма-процентный ресурс до отказа

$$t_r(\gamma) = t_{j-1} + \frac{(\gamma - k_{j-1})}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{t_m}{J}, \qquad (13)$$

где $k_{j-1} \geq \gamma > k_j, \quad j = \overline{1, J}$.

Эмпирическая вероятность безотказной работы для остаточного ресурса

$$P_x^c(y) = p_j(i) = k_{j+i} / k_j, \quad p_j(0) = 1, \qquad (14)$$

где $x = j \cdot t_m / J, \ j = \overline{1, J_0}, \ J_0 \leq J - 2; \ y = i \cdot t_m / J, \ i = \overline{0, J - j}$.

Тогда, с учетом (14), численная вероятность безотказной работы для остаточного ресурса

$$P_x^r(y) = \begin{cases} 0, & y \geq t_m - x \\ p_j(i-1) + \dfrac{(y - t_{i-1})(p_j(i) - p_j(i-1)) \cdot J}{t_m}, \\ 1, & y < 0 \end{cases} \qquad (15)$$

где $x = j \cdot t_m / J; \ t_{i-1} \leq y < t_i, \ t_i = i \cdot t_m / J, \ i = \overline{1, J - j}$.

Найдем численный средний остаточный ресурс до отказа, используя модель (15)

$$\tilde{y}_x = \frac{t_m}{J}\left[0{,}5 + \sum_{i=1}^{J-j} p_j(i)\right], \qquad (16)$$

а также численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа

$$\tilde{y}_j(\gamma) = t_{i-1} + \frac{(\gamma - p_j(i-1))}{p_j(i) - p_j(i-1)} \cdot \frac{t_m}{J}, \qquad (17)$$

где $p_j(i-1) \geq \gamma > p_j(i), \ i = \overline{1, J - j}, \ p_j(0) = 1$.

Численную интенсивность отказов получим также как совокупность отрезков прямых, соединяющих точки (t_j, ω_j)

$$\lambda_r(t) = \omega_{j-1} + (t - t_{j-1})(\omega_j - \omega_{j-1}) J / t_m, \ 0 < t < t_m, \qquad (18)$$

где $t_{j-1} \leq t < t_j, \ j = 1, \ldots, J-1; \omega_j = \dfrac{n_j}{n \cdot \Delta t \cdot k_j} = \dfrac{k_{j-1} - k_j}{\Delta t \cdot k_j}, \ j = 1, \ldots, J-1; \ \omega_0 = 0.$

В работе предложен нечеткий численный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений для случая, когда не удается однозначно описать наработку как случайную величину (какие-то ее параметры могут быть нечеткими). При этом предполагается, что эксперты на основании имеющейся у них статистической и экспертной информации могут численно оценить максимальное значение наработки (t_m), а для второго значения они могут предложить лишь интервал его изменения. Предлагается рассмотреть два варианта:

1. Вариант МО, когда эксперты предлагают считать математическое ожидание наработки случайной величиной, равномерно распределенной на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации;
2. Вариант МД, когда эксперты предлагают считать наиболее вероятное значение наработки (t_o) случайной величиной, равномерно распределенной на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации.

Для случайной величины, имеющей равномерное распределение, математическое ожидание ($\bar{t}$), коэффициент вариации (k_r) и интервалы ее изменения (a, b) связаны следующей зависимостью:

$$a = \bar{t} \cdot (1 - \sqrt{3} \cdot k_r); \ b = \bar{t} \cdot (1 + \sqrt{3} \cdot k_r). \qquad (19)$$

Алгоритм моделирования значений случайной величины, имеющей равномерное распределение, имеет следующий вид: $t=a + (b - a)\cdot r$, (20)
где r – значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале (0, 1). Рассмотрим вариант МО (вариант МД приведен в диссертации).

Пусть для треугольного распределения известно максимальное значение (t_m), а мода (t_o) не определена из-за того, что нет возможности точно определить математическое ожидание. Считаем, что математическое ожидание треугольного распределения имеет равномерное распределение с известными значениями математического ожидания ($\bar{t}$) и коэффициента вариации (k_r). При этом математическое ожидание связано с параметрами формулой (5); коэффициент вариации назначается экспертным путем.

При варианте МО для нечеткого численного анализа с привлечением имитационного моделирования предлагается следующий алгоритм создания выборки наработок (алгоритм МО):

1. Зная математическое ожидание ($\bar{t}$) математического ожидания наработки как случайной величины и коэффициент ее вариации (k_r), по формуле (19) определяем диапазон изменения (a, b);
2. По формуле (20) определяем выборочное значение математического ожидания наработки как случайной величины (t_{Mq});
3. Методом моментов из формулы (5) получаем значение моды
$$t_{oq}=3\cdot t_{Mq} - t_m; \quad (21)$$
4. Определяем выборочное значение наработки (t_q) для треугольного распределения, используя формулу (2);
5. Пункты 2, 3, 4 повторяем n раз, в результате чего создается искомая выборка объема n значений наработок
$$T_н=(t_1, t_2, \ldots, t_q, \ldots, t_n). \quad (22)$$

В дальнейшем выборка (22) обрабатывается для получения показателей надежности рельсовых скреплений приведенными выше численными алгоритмами (9)-(18).

При прогнозировании остаточного ресурса рельсов необходимо получить прогнозные модели и провести их статистический анализ. В качестве прогнозных моделей в работе использованы полиномы различных степеней. Для определения значений параметров этих моделей выбран метод наименьших квадратов. Качество полученной прогнозной модели зависит от выполнимости предпосылок регрессионного анализа, важнейшей из которых является нормальность результатов мониторинга. Для решения этой задачи необходимо проверить гипотезу: H_0: $F_o(x)=F_e(x)$. Здесь $F_e(x)$ – эмпирическая функция распределения, полученная по результатам мониторинга; $F_o(x)$ – искомая функция распределения (в нашем случае нормальное распределение). Так как в нашем случае объем измерений небольшой, предложено использовать модифицированный критерий Колмогорова и критерий Шапиро-Уилка. Эти критерии хорошо обнаруживают отличие от нормального распределения при небольшом размере выборочных значений.

Дополнительно определяются: а) оценка дисперсии ошибки
$$s^2 = \frac{1}{n-p}\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_{ip})^2 . \quad (23)$$

Здесь y_i – значения бокового износа рельсов для времени t_i, полученные в результате мониторинга железнодорожного пути (время описывается натуральными числами); y_{ip} – расчетные значения для времени t_i, полученные по выбранным прогнозным моделям; n –длина временного ряда; p – число параметров прогнозной модели;

б) значение F-статистики

$$F = \frac{1}{p-1}\sum_{i=1}^{n}(y_c - y_{ip})^2 / s^2 . \qquad (24)$$

Здесь y_c – среднее значение измеренных значений бокового износа рельсов; s^2 – оценка (23). Необходимо, чтобы расчетное значение (24) было больше критического значения – $F_{кр}(v_1, v_2, q)$, где $v_1=(p-1)$, $v_2=(n-p)$ – степени свободы, q – уровень значимости;

в) оценка дисперсии для прогнозного по модели значения в момент времени t_k

$$s_k^2 = s^2(1/n + (t_k - t_c)/\sum_{i=1}^{n}(y_i - y_{ip})^2), \qquad (25)$$

где t_c – среднее значение по времени; s^2 – оценка (23); г) верхняя граница доверительного интервала для прогнозного по модели значения в момент времени t_k

$$h_k(t_k)=y_p(t_k)+s_k\cdot t(mt, \gamma), \qquad (26)$$

где s_k – оценка среднеквадратического значения для прогнозного по модели значения в момент времени t_k (равна корню квадратному из оценки дисперсии (25)); $t(mt, \gamma)$ –критическое значение для t-распределения при $mt=(n-p)$ степенях свободы и доверительной вероятности γ. Для проверки значимости коэффициентов прогнозной модели вычисляются t - статистики

$$t_j=a_j/s_j(a_j),\ j=0,1,\ldots,p-1, \qquad (27)$$

где a_j – значение j-го параметра прогнозной модели, полученного по методу наименьших квадратов; $s_j(a_j)$ – оценка среднеквадратического отклонения для j-го параметра прогнозной модели.

Остаточный ресурс рельсов предложено оценивать двумя показателями: 1) средним остаточным ресурсом (t_{or}); 2) гарантированным (вероятным) остаточным ресурсом (t_{og}).

Средний остаточный ресурс

$$t_{or}= [t_{oc}]- t_M, \text{ (мес.)}, \qquad (28)$$

где t_{oc} – корень уравнения (29); $[\cdot]$ – операция округления до целого числа; t_M – время последнего измерения;

$$y_p(t)=y_{np}. \qquad (29)$$

Здесь $y_p(t)$ – найденная и статистически проверенная прогнозная модель, описывающая временной ряд для бокового износа рельсов; y_{np} – нормативно установленное предельное значение.

Гарантированный остаточный ресурс

$$t_{og}= [h_{oc}]- t_M, \text{ (мес.)}, \qquad (30)$$

где h_{oc} – корень уравнения (31);

$$h_k(t)=y_{np}. \qquad (31)$$

Здесь $h_k(t)$ – верхняя граница доверительного интервала (26) для прогнозного по модели значения.

Для повышения точности оценки показателей остаточного ресурса при создании прогнозных моделей в работе используется два типа информации: 1) только результаты мониторинга пути. В этом случае n – объем измерений, $t_M= t_n$; 2) дополнительно используются точечные оценки квалифицированных в предметной области экспертов (объем измерений увеличивается). При вычислении экспертных оценок рассматривается два сценария: пессимистический и оптимистический.

В третьей главе проведена апробация разработанного алгоритмического обеспечения мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути.

Как уже отмечалось, мониторинг пути на УБЖД осуществляет диагностический вагон «Декарт» фирмы «Твема». Вагон обслуживает различные участки пути с радиусом *R* метров. В нашем случае это семь участков с радиусом около 310 м. При этом рассматриваются два вида износа: максимальный и средний. Для реализации программного обеспечения «Оценка остаточного ресурса рельсов» выбран свободно распространяемый интерпретирующий язык программирования «R».

В таблице 1 приведены исходные данные: БИмак – величины максимального износа рельсов; БИср – величины среднего износа рельсов.

Таблица 1

Исходные данные, мм

Дата	Время	БИмак	БИср
26.01.2015	1	9,1	7,5
09.02.2015	2	9,2	7,8
20.03.2015	3	9,3	7,7
10.04.2015	4	9,4	7,8
11.05.2015	5	9,4	7,9
27.06.2015	6	9,5	7,9
05.07.2015	7	9,6	8,0
25.08.2015	8	9,8	8,0
22.09.2015	9	10,0	8,1
09.10.2015	10	10,1	8,3
12.11.2015	11	10,2	8,2
15.12.2015	12	10,3	8,3

Как уже отмечалось выше, для повышения точности оценки показателей остаточного ресурса, при создании прогнозных моделей, помимо результатов мониторинга пути (табл. 1), рекомендовано использовать дополнительно точечные оценки квалифицированных экспертов.

В таблице 2 представлены эти оценки на определенное время. Эксперты рассмотрели два сценария: пессимистический, когда грузонапряженность пути в будущем не растет (Сц-П); оптимистический, когда грузонапряженность пути в будущем растет (Сц-О).

Таблица 2

Экспертные точечные оценки

Дата	Время	БИмак (Сц-П)	БИмак (Сц-О)	БИср (Сц-П)	БИср (Сц-О)
01.2016	13	10,3	10,4	8,3	8,4
02.2016	14	10,4	10,6	8,4	8,6

Оценка остаточного ресурса рельсов в диссертации проведена для 10 различных вариантов, зависящих от типа износа, типа информации и других описанных факторов. В качестве примера приведем результаты вычислений остаточного ресурса по максимальному износу с привлечением экспертных значений по оптимистическому сценарию. Для этого случая, после проведенного статистического анализа, в качестве прогнозной модели была обоснована парабола

$$y_p(t)=9{,}026 + 0{,}073\cdot t + 0{,}003\cdot t^2 . \qquad (32)$$

На рисунке 1 приведена графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса: верхняя линия – это верхняя граница доверительного интервала (26), нижняя – прогнозная модель (32).

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (28) для предельного значения 11 мм, время последнего измерения t_M=12 мес. Корень уравнения (29) с учетом (32) t_{oc}=16,6 мес. Используя формулу (28) получим, что средний остаточный ресурс t_{or}=5 мес. Далее найдем гарантированный остаточный ресурс (30). Корень уравнения (31) h_{oc}=16,1 мес. Используя формулу (30) получим, что гарантированный остаточный ресурс t_{og}=4 мес. (с вероятностью 0,95 следующее измерение диагностическим вагоном можно проводить через 4 месяца).

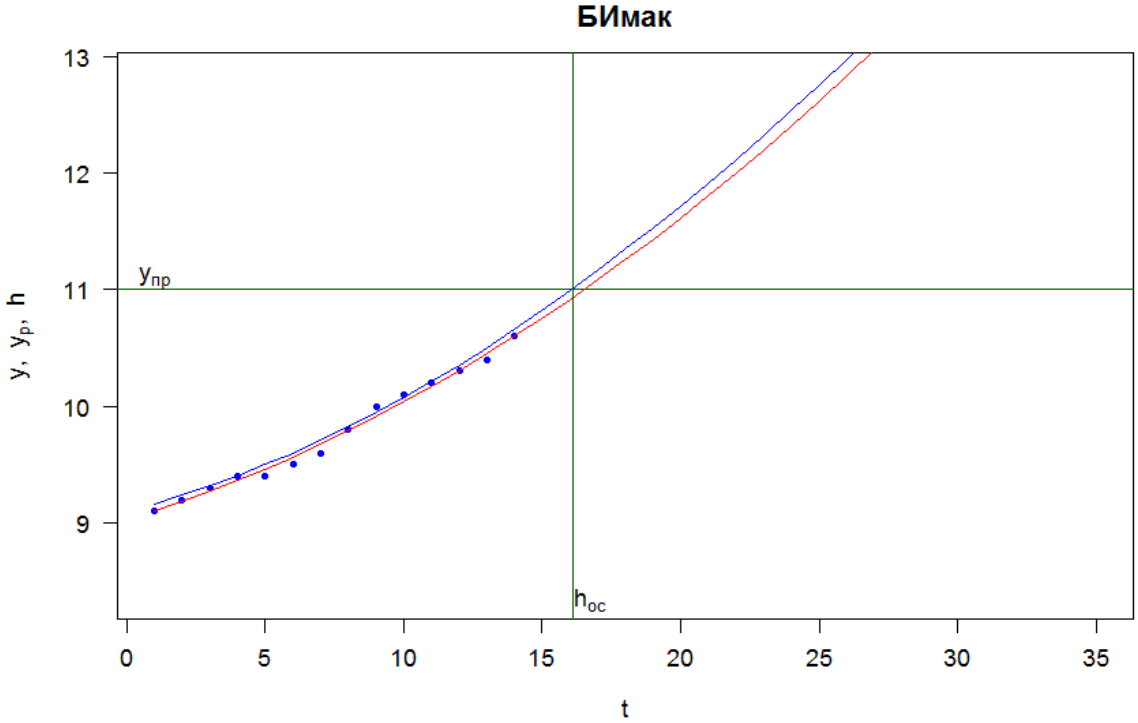

Рис. 1. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (32)

Без учета экспертных оценок гарантированный остаточный ресурс оказался равным 3 мес. Таким образом, оптимистический сценарий увеличил на один месяц гарантированный остаточный ресурс.

Исходные данные для оценки показателей надежности рельсовых скреплений получены экспертным путем при следующих предпосылках: анализировались литературные источники с результатами испытаний на опытных участках с кривыми малого радиуса с существенным боковым износом рельсов для скреплений АРС. Максимальная наработка рельсового скрепления принята 550 млн. ткм., а наиболее вероятное значение 200 млн. ткм. В качестве единицы измерения принято 50 млн. ткм, это и определило значения исходных данных в условных единицах:

$$t_m=11 \text{ (550 млн. ткм.)}, \; t_o=4 \text{ (200 млн. ткм.)}. \qquad (33)$$

Используя модель (2) и исходные данные (33), получим выборку наработок объемом 20000, данный объем выборки обеспечивает относительную погрешность (4) меньше 1%. На рисунке 2 приведена гистограмма частот наработки скрепления по выборочным данным. Гистограмма частот соответствует плотности (1); значение математического ожидания ($\bar{t}=5$) попало в вычисленный доверительный интервал (3) – (4,976; 5,040), что указывает на высокое качество имитационного моделирования.

Используя полученные выборочные значения при числе интервалов 44 (9), получим численные показатели надежности (12)-(17). Дополнительно найдем эти показатели по аналитическим моделям (5)-(8).

Средняя наработка до отказа по аналитической модели (5) равна 5, а по численной (12) – 4,997; гамма-процентный ресурс до отказа по аналитической модели (5) при γ =0,9 равен 2,098, а по численной (13) – 2,080; средний остаточный ресурс до отказа при x=2 по аналитической модели (6) равен 3,367, а по численной (16) – 3,371; гамма-процентный остаточный ресурс до отказа при x=2 и γ =0,9 по аналитической модели (7) равен 0,828, а по численной (17) – 0,831; численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа при x=6 и γ =0,9 по аналитической модели (8) равен 0,257, а по численной (17) – 0,255.

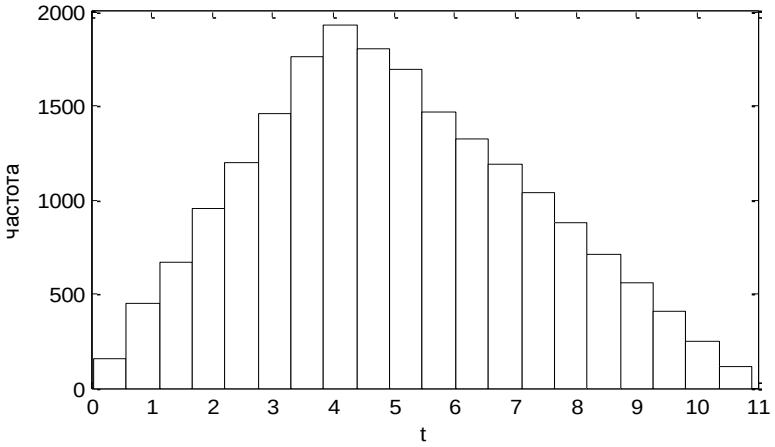

Рис. 2. Гистограмма частот для наработки скрепления

Значения, полученные по численным моделям по результатам имитационного моделирования близки к значениям, полученным по аналитическим моделям. Это показывает высокую адекватность предложенных численных алгоритмов определения показателей надежности рельсовых скреплений.

Проведем апробацию нечеткого численного анализа вычисления показателей надежности для варианта МО (в диссертации приведены результаты исследования для варианта МД). На рисунке 3 приведена гистограмма частот наработки рельсового скрепления, полученная в результате имитационного моделирования по алгоритму МО, объем выборки n=20000. Данная гистограмма существенно отличается от гистограммы на рисунке 2, полученной для треугольного распределения с теми же параметрами. Отличие связано с тем, что в данном случае (рис. 3) выборка (22) получена в предположении, что математическое ожидание оценивается нечетко и является случайной величиной.

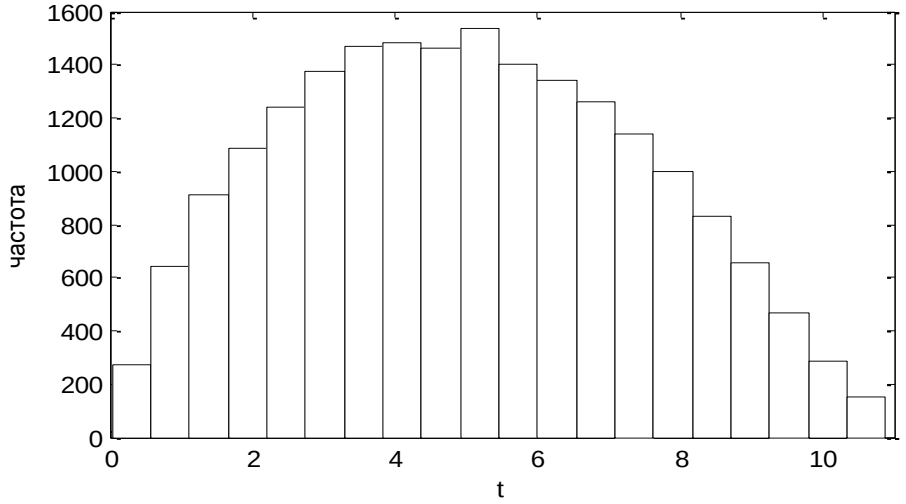

Рис. 3. Гистограмма частот для наработки, вариант МО

Точечная и интервальная оценки (3) для этого случая равны

$$\tilde{t} = 5{,}012;\ \ (t_1;\ \ t_2) = (4{,}978;\ 5{,}046), \tag{34}$$

а оценка коэффициента вариации равна $\tilde{k}_v = 0{,}489$.

Математическое ожидание $\bar{t} = 5$ попало в доверительный интервал (34). Это позволяет сделать вывод о том, что нечеткость математического ожидания не существенно повлияло на математическое ожидание наработки. Но нечеткость математического ожидания существенно повлияло на коэффициент вариации наработки, он заметно увеличился (для треугольного распределения при исследуемых параметрах он равен 0,455).

Нечеткость математического ожидания повлияла и на показатели надежности. Так, например, при $\gamma = 0{,}9$ с учетом (13) численный гамма-процентный ресурс до отказа стал равен 1,743 (существенно уменьшился, для аналитической модели он равен 2,098). Учитывая, что единица наработки соответствует 50 млн. ткм, гамма-процентный ресурс до отказа сократился на 17,75 млн. ткм.

На рисунке 4 представлены вероятности безотказной работы для остаточного ресурса: 1 – эта вероятность для аналитической модели (35), $0<x\leq t_o$; 2 – эта вероятность для численной модели (15) при $x = 4 \Rightarrow j = 16$. Нечеткость математического ожидания влияет на эту функцию – она находится выше теоретической функции, поэтому происходит изменение и среднего остаточного ресурса и гамма-процентного остаточного ресурса.

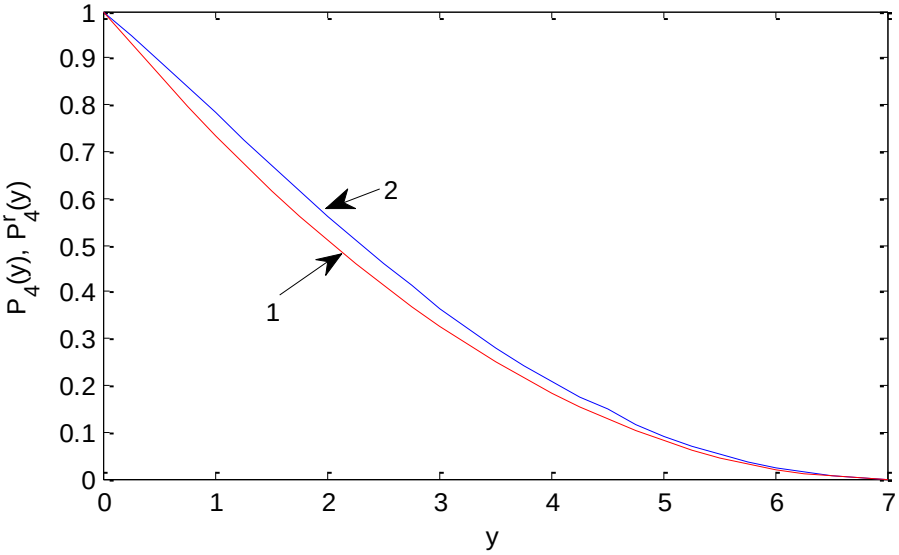

Рис. 4. Вероятности безотказной работы для остаточного ресурса, вариант МО

$$P_x(y) = \begin{cases} 1,\ \ y \le 0 \\ \dfrac{t_m \cdot t_0 - (x+y)^2}{t_m \cdot t_0 - x^2},\ 0 < y \le t_0 - x \\ \dfrac{t_0 \cdot (t_m - x - y)^2}{(t_m - t_0)(t_m \cdot t_0 - x^2)},\ t_0 - x < y \le t_m - x \\ 0,\ \ t > t_m - x \end{cases}. \tag{35}$$

С учетом (12) численный средний остаточный ресурс до отказа равен 2,538. При $\gamma = 0{,}9$ с учетом (13) численный гамма-процентный остаточный ресурс равен 0,450. При сравнении со значениями, полученными по аналитическим моделям (6) и (7) ($\bar{y}_4$ = 2,333;

$y_4(0{,}9) = 0{,}359$), данные значения увеличились (средний остаточный ресурс до отказа увеличился на 10,25 млн. ткм).

В заключении приведены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. С позиций системного анализа создана постановка задачи оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути, включающих: а) рельсовые скрепления, показатели надежности которых необходимо уметь оценивать на основе экспертно-статистической информации; б) рельсовое полотно, которое подвергается мониторингу диагностическим вагоном «Декарт», оснащенным автоматизированной системой, содержащей измерительную, регистрирующую и вычислительную аппаратуру. Используемая система мониторинга пути одновременно измеряет боковой износ рельсов и параметры геометрии пути. Результаты мониторинга и оценки показателей надежности необходимы для повышения качества принятия управленческих решений. В качестве управляющих решений можно рассматривать использование стратегии обслуживания железнодорожного пути по фактическому состоянию, планирование ремонтных «окон» и другие.

2. Обоснована вероятностная модель наработки рельсового скрепления при ограниченном объеме статистической информации в виде треугольного распределения, что позволило найти аналитические модели вычисления показателей надежности: средней наработки до отказа; гамма-процентного ресурса до отказа; среднего остаточного ресурса до отказа; гамма-процентного остаточного ресурса до отказа. Используя результаты имитационного моделирования, предложены численные алгоритмы вычисления показателей надежности, включая вероятность безотказной работы для остаточного ресурса и интенсивность отказов.

3. Предложен и апробирован нечеткий численный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений для варианта неопределенности, связанной с невозможностью однозначно описать наработку как случайную величину. В этом случае один параметр оценивается однозначно, а для другого лишь постулируется возможный интервал его изменения. Предложено два алгоритма имитационного моделирования: вариант МО, когда эксперты предлагают считать математическое ожидание наработки случайной величиной, равномерно распределенной на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации; вариант МД, когда эксперты предлагают считать наиболее вероятное значение (моду t_o) наработки случайной величиной, равномерно распределенной на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации.

4. Разработано и апробировано алгоритмическое обеспечение для прогнозирования остаточного ресурса рельсов по их боковому износу, содержащее две процедуры: а) создание регрессионной модели, аппроксимирующей результаты мониторинга рельсов и включающей статистический анализ уравнения регрессии; б) оценку остаточного ресурса рельсов на основе регрессионного анализа, содержащую два показателя: средний остаточный ресурс, гарантированный остаточный ресурс. При этом создание прогнозных моделей, а значит и значений показателей остаточного ресурса рельсов, основано на двух типах информации: 1) только на результатах мониторинга, 2) кроме результатов измерений диагностическим вагоном используются точечные оценки квалифицированных в предметной области экспертов по двум сценариям.

5. Создано программное обеспечение «Оценка остаточного ресурса рельсов» на основе свободно распространяемого интерпретирующего языка программирования «R». Программное обеспечение реализует разработанное алгоритмическое обеспечение по созданию и использованию прогнозных моделей бокового износа рельсов по результатам монито-

ринга пути и экспертных оценок. Проведена апробация созданного программного обеспечения с использованием исходных данных диагностического вагона «Декарт» при его применении на Улан-Баторской железной дороге. При оценке среднего и гарантированного остаточного ресурса рельсов использованы как максимальные значения бокового их износа, так и средние на различных участках кривых с радиусом около 310 метров.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Даваадорж, Батбаатар. Статистический анализ бокового износа рельсов по результатам мониторинга пути / Б. Даваадорж, С.К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №1(49). – С. 147-151.
2. Даваадорж, Батбаатар. Анализ надежности рельсового скрепления пути при ограниченном объеме данных / Б. Даваадорж, С.К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №2(50). – С. 123-128.
3. Даваадорж, Батбаатар. Программное обеспечение анализа бокового износа рельсов для оценки их остаточного ресурса / Б. Даваадорж, А.Н. Лузгин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №2(50). – С. 85-89.
4. Даваадорж, Батбаатар. Нечеткий численный вероятностный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений / Б. Даваадорж, Ю.М. Краковский // Мир Транспорта. – 2017. Т.15. – №3(70). – С. 30-39.

В других изданиях:

5. Даваадорж, Батбаатар. Численные алгоритмы вычисления показателей надежности рельсовых скреплений / Б. Даваадорж, Ю.М. Краковский // Вопросы естествознания. – 2016. – №2(10). – С. 9-15.
6. Даваадорж, Батбаатар. Мониторинг железнодорожного пути на Улан-Баторской железной дороге / Б. Даваадорж // Материалы седьмой международной НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2016. – Том 1. – С. 411-415.
7. Kargapoltcev Sergey, Davaadorge Batbaatar. Algorithmic Base for Prognosis the Rail Residnal Resource of the Lateral Wear of Rail // The Fifth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR-2016). Nanchang, China, October 20-21. – 2016. – P. 539-542.
8. Даваадорж, Батбаатар. Алгоритмическое обеспечение вычисления показателей надежности рельсовых скреплений / Б. Даваадорж, Ю.М. Краковский // Безопасность критичных инфраструктур и территорий: Материалы VII Всероссийской конференции и XVII школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН. – 2016. – С. 34–37.
9. Даваадорж, Батбаатар. Результаты мониторинга железнодорожного пути по его боковому износу / Б. Даваадорж // Материалы восьмой международной НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2017. – Том 1. – С. 478-482.
10. Даваадорж, Батбаатар. Исследование показателей надежности рельсовых скреплений нечетким численным вероятностным анализом / Б. Даваадорж, Ю.М. Краковский // Байкальский вестник ДААД. – 2017. – №1. – С. 78-86.
11. Даваадорж, Батбаатар. Исследование показателей надежности рельсовых скреплений численным анализом / Б. Даваадорж // Материалы девятой международной НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2018. – Том 1. – С. 488-492.

Подписано в печать 23. 01.2019. Формат 60 х 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 16.

Отпечатано в ООО «Глазковская типография»
Адрес: 664039, г. Иркутск, ул. Гоголя, 53, т. 8(3952)38-78-40