

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Иркутский государственный университет путей сообщения»

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)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор Каргапольцев С.К.

Иркутск 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	11
1.1. Основные положения теории надежности применительно к железнодорожному пути и его компонентам.....	11
1.2. Анализ средств мониторинга и диагностики верхнего строения пути.....	18
1.3. Характеристика перевозок на железных дорогах в условиях неопределенности и риска	26
1.4. Анализ методов прогнозирования на основе временных рядов, необходимых для оценки остаточного ресурса рельсов	28
1.5. Актуальность, цель и задачи работы.....	33
2. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	36
2.1. Постановка задачи оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути.....	36
2.2. Модели наработки рельсового скрепления при ограниченном объеме статистической информации.....	41
2.2.1. Треугольное распределение, как вероятностная модель наработки в условиях неопределенности первого типа.....	42
2.2.2. Численные алгоритмы вычисления показателей надежности рельсовых скреплений.....	51
2.2.3. Нечеткий численный анализ для оценки	

показателей надежности рельсовых скреплений.....	57
2.3. Прогнозирование остаточного ресурса рельсов по их боковому износу.....	65
2.3.1. Технологии и модели регрессионного анализа.....	65
2.3.2. Оценка остаточного ресурса рельсов на основе регрессионного анализа.....	71
2.4. Выводы по главе 2.....	75
3. АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ..	77
3.1. Исходные данные для апробации алгоритмического обеспечения мониторинга и оценки показателей надежности.....	78
3.2. Программное обеспечение для оценки остаточного ресурса рельсов.....	85
3.3. Оценка остаточного ресурса рельсов по их боковому износу..	90
3.3.1. Оценка остаточного ресурса рельсов по их боковому износу по статистическим данным.....	90
3.3.2. Оценка остаточного ресурса рельсов по их боковому износу с использованием экспертных суждений....	99
3.4. Исследование показателей надежности рельсовых скреплений.....	116
3.5. Выводы по главе 3.....	127
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	129
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	132
ПРИЛОЖЕНИЕ. Акт внедрения	146

ВВЕДЕНИЕ

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. Суммарная протяженность ее главных путей составляет 1815 км, т.е 97% в общей длине железнодорожной сети Монголии.

Улан-Баторская железная дорога (УБЖД) – это совместное российско-монгольское предприятие с 50-процентным участием с каждой стороны, которая является единственной железнодорожной компанией и выполняет 70 процентов грузовых перевозок Монголии.

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.

Для обеспечения безопасности движения и повышения рентабельности процесса грузовых перевозок необходимо:

- а) уменьшать отказы в работе технических средств;
- б) сокращать технологические нарушения.

Все это обеспечивается созданием и внедрением комплексных систем управления, контроля, основанных на современных информационных технологиях. В качестве базовых систем, обеспечивающих рентабельность и безопасность процесса грузовых перевозок в ОАО «РЖД» отметим следующие:

1) «Управление ресурсами, рисками на основе анализа надежности» (система УРРАН);

2) «Комплексная автоматизированная система учета, контроля, и устранения отказов технических средств и анализа надежности» (система КАСАНТ);

3) «Комплексная автоматизированная система учета и анализа случаев технологических нарушений» (система КАСАТ);

4) «Автоматизированная система ведения и анализа графика исполненного движения» (ГИД «Урал-ВНИИЖТ»).

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 [18, 34, 38, 39, 63, 110, 112, 116].

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 [1, 6, 7, 11, 13, 22, 44, 48, 50, 54, 55, 56, 65, 75, 79, 101, 102].

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: Ададулов С.Е., Розенберг Е.Н., Ан-

типов 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 пути на основе сравнительного анализа имеющегося алгоритмического обеспечения.

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 являются компоненты железнодорожного пути, содержащие рельсы и рельсовые скрепления. Предметом диссертационного исследования являются алгоритмическое и программное обеспечение применительно к мониторингу и оценки 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. Нечеткий численный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений в условиях неопределенности исходных данных.

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

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 критических 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.

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.

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.

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.

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

а) обоснованы и приведены исходные данные для апробации разработанного алгоритмического обеспечения;

б) создано и описано программное обеспечение для оценки остаточного ресурса рельсов по информации мониторинга пути УБЖД;

в) созданы и апробированы регрессионные прогнозные модели и проведена оценка остаточного ресурса рельсов по статистической и экспертной информации;

г) проведено исследование по экспертной информации показателей надежности рельсовых скреплений АСР, эксплуатируемых на УБЖД;

д) приведены выводы по результатам исследований.

Апробация алгоритмического и программного обеспечения по информации УБЖД показала его работоспособность, а также научную и практическую значимость для поддержки принятия управленческих решений. **В заключении** приведены основные результаты работы.

В приложении приведен акт внедрения результатов диссертационной работы на УБЖД.

1. ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ СОЗДАНИЯ И РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Главным перевозчиком грузов железнодорожным транспортом в Монголии является Улан-Баторская железная дорога, которая является совместным российско-монгольским предприятием с 50-процентным участием с каждой стороны. Большинство проверенных и эффективных технологий, разработанных и апробированных в компании ОАО «РЖД», со временем внедряются на УБЖД. В этой главе на основе анализа литературных и нормативных работ показана необходимость создания и развития методов мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути, что позволило обосновать актуальность диссертационной работы, ее цель и задачи.

1.1. Основные положения теории надежности применительно к железнодорожному пути и его компонентам

Железнодорожный путь – это многокомпонентный ремонтируемый и восстанавливаемый сложный объект надежности. Железнодорожный путь как объект надежности имеет две характерные особенности [81]:

- 1) большую протяженность;
- 2) необходимость восстановления работоспособного состояния после отказа на месте в условиях его функционирования.

Рельсы в процессе эксплуатации подвергаются различным механическим повреждениям и естественному старению, что приводит к образованию в них дефектов, которые могут привести к отказам их работы. Дефект рельса характеризуется нарушением, вызвавшим любое отклонение его геометрии

или качественных свойств от установленных норм, соблюдение которых обеспечивает работоспособное состояние рельса.

Путь не резервирован по основному элементу – рельсу. В связи с этим, отказ рельса приводит к отказу пути в целом, но отказ каких-то элементов может не сразу привести к отказу пути. При этом необходимо учитывать, что отказы элементов ухудшают безопасность и пропускную способность перевозочного процесса.

Перевозочный процесс железнодорожным транспортом является сложной системой, так как он определяется огромным числом железнодорожных объектов, функционирующих в условиях их постоянного взаимодействия, но сохраняющих единство по реализуемым функциям [69, 110, 115, 116, 119]. Обоснованию и учета того, что перевозочный процесс является сложной системой, в литературе и нормативных документах уделено большое внимание [1, 35, 41, 64, 80, 94, 98, 109, 114, 117, 118].

Учитывая сказанное, надежность железнодорожного пути следует исследовать с позиций системного анализа, который изложен в различных литературных источниках [8, 39, 93, 105, 106, 112, 114].

Надежность объекта характеризуется его наработкой, где наработка – продолжительность или объем работы объекта. Нарботка до отказа – наработка объекта от начала его эксплуатации до возникновения первого отказа. Данное исследование проведено применительно к элементам железнодорожного пути, где принято наработку измерять в объеме перевезенного груза или грузонапряженности (млн. т·км.).

Основные положения теории надежности различных объектов подробно изложены в различной литературе, включая ГОСТы и другие нормативные документы [9, 24, 60, 82, 113, 122, 124]. Имеется значительная литература применительно к надежности железнодорожных объектов и связанными с ними рисками [23, 46, 49, 55, 56, 67, 72, 76, 81, 93, 105, 108]. Отметим допол-

нительно работы и направление, связанное с системой УРРАН [17, 18, 103, 125].

Система УРРАН (Управление рисками, ресурсами на этапах жизненного цикла на основе анализа надежности) построена на основе системы RAMS (безотказности, готовности, ремонтпригодности и безопасности) и системы LCC (стоимости жизненного цикла), а также новых информационных технологий поддержки принятия решений, распределенных информационных систем оперативного сбора и анализа данных и новой нормативной базы [18].

Исходной информацией для системы УРРАН являются данные, формируемые системой КАСАНТ, а также регулярно обновляемая база данных, в которой содержатся матрицы рисков по объектам всех дистанций инфраструктуры железнодорожного транспорта, том числе хозяйств пути, автоматики и телемеханики, электрофикации и электроснабжения.

Система КАСАНТ аккумулирует информацию об отказах всех технических средств инфраструктуры, обеспечивает расследование отказов по критерию длительности задержки поездов и группирует их в три категории. Матрицы рисков обновляются в технических отделах хозяйств инфраструктуры два раза в месяц [18].

Структурно в математическом обеспечении системы УРРАН выделяют три части [18]:

- 1) Система поддержки принятия решений по управлению надежностью и функциональной безопасностью;
- 2) Система поддержки принятия решений по управлению ресурсами (текущим содержанием инфраструктуры);
- 3) Системы поддержки принятия решений по транспортным происшествиям и чрезвычайным ситуациям на железнодорожном транспорте.

Таким образом, и вопросы надежности железнодорожного пути и других железнодорожных объектов, а также различные системы типа УРРАН, КАСАНТ, направлены на повышение безопасности движения, которой на

железнодорожном транспорте уделяется большое внимание. Это подтверждается большим набором нормативных документов, включая вопросы, связанные с рисками.

Специалисты НПЦ ИНФОТРАНС адаптировали и использовали технологию УРРАН для комплексной оценки различных объектов железнодорожной инфраструктуры, определения уровня их предотказности на основе фактического состояния и принятия управленческих решений с учетом возникающих рисков при существующей системе обслуживания [103].

Основой этой адаптации стала информационно-аналитическая система комплексной диагностики и мониторинга состояний железнодорожной инфраструктуры «ЭКСПЕРТ», созданной в НПЦ ИНФОТРАНС. Система «ЭКСПЕРТ» – информационно-аналитическая подсистема диагностики и мониторинга, универсальность доступа к информации пользователям и внешним приложениям. Это позволяет на основе данных диагностики на горизонте в несколько лет с большой достоверностью определять уровень предотказного состояния пути по его геометрии и состоянию креплений.

Основными задачами системы «ЭКСПЕРТ» являются сбор, обработка и анализ данных, поступающих с диагностических средств, их систематизация и синхронизация для информационной поддержки управленческих решений [103].

Как уже отмечалось выше, надежность объекта характеризуется его наработкой. Приведем наиболее распространенные вероятностные модели для наработки, рекомендуемые в литературе по теории надежности [9, 60, 124]. Эти результаты нам понадобятся при выборе вероятностной модели наработки для рельсового крепления.

Характеристика рельсовых креплений

При создании железнодорожного пути используются различные компоненты: рельсы, шпалы, подкладки, балласт и земляное полотно др. Соединяющим элементом этой системы служат рельсовые крепления различного

вида. В диссертационной работе исследуются две компоненты железнодорожного пути: рельсы и рельсовые скрепления.

В последние годы рельсовым скреплениям при организации путевого хозяйства уделяется большое внимание, что отражено в различных научных и нормативных работах [52, 73, 74, 87, 96, 97].

Отметим важнейшие нормативные документы, включающие:

а) европейские стандарты EN 13481-2012 «Железнодорожный транспорт. Железнодорожные пути. Требования к рабочим характеристикам крепежных систем», EN 13146-2012 «Железнодорожный транспорт. Железнодорожные пути. Методы испытаний рельсовых скреплений»;

б) российские стандарты ГОСТ Р 32698-2014 «Скрепление рельсовое промежуточное железнодорожного пути. Требования безопасности и методы контроля», ГОСТ Р 56291-2014 «Прокладки рельсовых скреплений железнодорожного пути. Технические условия».

Следуя работе [96], рельсовые скрепления – это промежуточные конструкции, которые включают в себя все элементы, работающие в непосредственном контакте с рельсом и подрельсовым основанием.

Основная задача промежуточных скреплений – сохранение геометрических параметров рельсовой колеи при передаче и гашении сил от динамического воздействия подвижного состава [96]. При этом, свойства скрепления должны учитывать не только стандартные условия работы пути, но и негативные воздействия транспортной нагрузки при неравномерном распределении усилий на рельсовые нити во время вписывания подвижного состава в кривой участок. Другой важной задачей скрепления является электроизоляция рельсов от подрельсового основания. Это позволяет минимизировать потерю сигналов рельсовых электрических цепей.

Тип скрепления значительно влияет на стоимостные характеристики строительного и эксплуатационного комплексов железнодорожного пути и ремонтных путевых работ.

На практике используются различные рельсовые скрепления, например:

а) скрепление ПФК-350 [68]; эта конструкция разработана на основе английского скрепления Pandrol Fastclip, но имеет важные преимущества: повышенную технологичность при изготовлении шпал, увеличенное усилие прижатия рельса в узле скрепления, возможность использования при большой амплитуде температур, увеличенный срок службы;

б) скрепление ЖБР [16]; это скрепление относится к упругим, так как в качестве главного элемента имеет пружинную клемму. Имеется несколько модификаций, наиболее распространен бесподкладочный вариант шурупно-дюпельного типа – ЖБР-65Ш;

в) скрепление SBS SL-1 компании Schwichag AG [120]; это скрепление шурупно-дюпельного типа с пружинной клеммой повышенной прочности, закаленной по особой технологии. Для высокоскоростных магистралей применяют модифицированное скрепление с двумя амортизирующими прокладками и опорной плитой;

г) скрепление W30 (Vossloh) [19]; это бесподкладочное скрепление шурупно-дюпельного типа с упругими клеммами. Подошва рельса установлена на эластичную подрельсовую прокладку;

д) скрепление Pandrol Fastclip компании Pandrol Railtech International [104]; это анкерное скрепление, которое нашло большое применение в мире благодаря своим уникальным свойствам: легкости монтажа-демонтажа, отсутствию резьбовых соединений, что исключает необходимость протяжки и смазки крепежителей. Модификация скрепления Fastclip FC допускает использование в самых разных условиях; имеется модификация Fastclip FE, которая по сравнению с FC имеет выигрыш в стоимости изделия. Подобные скрепления успешно применяются на высокоскоростных магистралях Китая, Кореи, Японии.

С точки зрения теории надежности рельсовые скрепления можно отнести к невосстанавливаемым объектам, т.к. в случае возникновения отказа они не подлежат восстановлению в рассматриваемых условиях (могут заменяться основные узлы соединения, поэтому их можно считать невосстанавливаемыми объектами по этим узлам).

Так, например, скрепления типа ЖБР считаются негодными при отсутствии или изломе упругой клеммы, скрепления анкерного типа считаются негодными при изломах анкеров или клемм.

Невосстанавливаемый объект достигает предельного состояния при возникновении отказа или при достижении заранее установленного предельно допустимого значения срока службы или суммарной наработки, устанавливаемых из соображений безопасности эксплуатации.

Рельсовое скрепление APC

Одним из перспективных типов, используемых на УБЖД, является рельсовое скрепление APC. APC – это упругое бесподкладочное безрезьбовое скрепление с нераздельным анкером, замоноличенным в шпалу [66].

Отказы скреплений типа APC 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.

Скрепления APC поддерживаются и конструктивно развиваются специалистами МИИТа [66]. Эти специалисты проводят мониторинг на 26 участках восьми железных дорог в различных эксплуатационных условиях.

В лабораториях МИИТа изучаются служебные свойства элементов APC: коррозионную стойкость и усталостную прочность пружинных клемм при различных видах покрытий, качество полимеров для изоляторов. Работа скреплений всегда оценивается совместно со специалистами путевого хозяйства железных дорог. В результате проведенных исследований от специалистов МИИТ получены следующие рекомендации [66]:

1) модернизированное скрепление АРС надежно работает в бесстыковом пути с рельсами Р65 и железобетонными шпалами, в том числе в кривых радиусом 300-350 м при высокой грузонапряженности (до 165 млн. ткм груза брутто на 1 км в год), а также в регионах с годовыми амплитудами температуры рельсов более 110°C;

2) интенсивность бокового износа рельсов на упругом скреплении АРС значительно меньше по сравнению с подкладочными скреплениями, обладающих повышенной жесткостью;

3) безрезьбовое скрепление АРС показывает хорошие результаты при эксплуатации на затяжных подъемах и спусках.

В работе [84] дается сравнение рельсовых скреплений по средней стоимости их обслуживания на 1 км пути в год. При этом отмечается, что для ЖБР-65Ш эта величина равна 165 113 руб, а для АРС – 100 953 руб.

Перечисленные выше и другие рекомендации [74], а также их использование на УБЖД, определили выбор скрепления АРС в качестве основного в диссертационном исследовании.

1.2. Анализ средств мониторинга и диагностики верхнего строения пути

Как уже отмечалось выше, рельсовый путь это основа железнодорожных перевозок, а значит и объект основных инвестиций, позволяющих увеличивать пропускную способность пути с минимизацией издержек на поддержание его состояния.

В последние годы для обеспечения требуемого уровня безопасности движения поездов большое внимание уделяется комплексному мониторингу и диагностике инфраструктуры верхнего строения пути [7, 11, 13, 22, 48, 54, 55, 65, 75, 76, 101, 102, 123].

Мониторинг технического состояния рельсов и объектов путевой инфраструктуры проводится с использованием различных средств и устройств неразрушающего контроля, как съемных, так и мобильных [4, 5, 78]. При этом необходимо повышать качество контроля при одновременном сокращении затрат и численности персонала.

Средства диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства можно разделить на такие группы:

- 1) диагностические комплексы инфраструктуры – ЭРА, ИНТЕГРАЛ;
- 2) средства неразрушающего контроля рельсов – вагоны-дефектоскопы, дефектоскопные автомотрисы, тележки дефектоскопные;
- 3) путеизмерительные средства – путеизмерительные вагоны и их модификации, автомотрисы и тележки путеизмерительные;
- 4) средства диагностики и обследования земляного полотна и ИССО – комплексные автоматизированные системы мониторинга, мобильные системы диагностики.

В рамках одного комплекса автоматизированной оценки состояния железнодорожной инфраструктуры «ИНТЕГРАЛ» объединено множество различных подсистем контроля, позволяющих измерять и обрабатывать более ста параметров состояния различных объектов. Данный комплекс позволил объединить сразу 7 диагностических вагонов, таких как: вагон-дефектоскоп, вагон-путеизмеритель, скоростная путеобследовательская станция, тоннелеобследовательская станция, вагон контроля параметров контактной сети, вагон контроля параметров средств железнодорожной автоматики и телемеханики, вагон контроля параметров радиосвязи.

Диагностический комплекс «ЭРА» в рамках одной проверки обеспечивает контроль в привязке к путевой железнодорожной и геодезической (ГЛОНАСС/GPS) системам координат более 120 параметров: состояние железнодорожного пути (геометрии рельсовой колеи, параметров рельсов в пути, состояния верхнего строения пути и земляного полотна), габаритов приближе-

ния строений, мостов, туннелей, междупутного расстояния, динамики взаимодействия пути и подвижного состава, состояния контактной сети (геометрии контактного провода, динамических параметров взаимодействия токоприемника с контактным проводом, электрических параметров контактной сети), комплексный видеоконтроль и др.

По различным источникам, в 2015 году использовалось более семи тысяч диагностических средств, из них около 300 мобильных и около 7000 съемных. Штатная численность работников, занятых диагностикой объектов путевого хозяйства, около 32 тысяч человек.

Контроль состояния верхнего строения пути содержит периодичность осмотров и измерений геометрических параметров пути с последующей оценкой его технического состояния. По данным контроля планируется комплекс работ – предупредительных, первоочередных, капитального характера, а также неотложных. При необходимости принимаются меры по приведению скоростей движения поездов к фактическому состоянию пути.

Важным этапом является комплексная оценка состояния пути, решающая следующие задачи:

- 1) оценка состояния пути и разработка мероприятий по его техническому обслуживанию, прогнозированию состояния и ремонту;
- 2) оценка качества работы предприятий путевого хозяйства по техническому обслуживанию пути на всех уровнях управления.

При этом, как правило, используется следующая информация [55, 83]:

- 1) данные технического паспорта дистанции пути по элементам пути: рельсам и металлическим частям стрелочных переводов, скреплений, шпалам и стрелочным брусам, балласту, земляному полотну, искусственным сооружениям;
- 2) данные о состоянии элементов пути по результатам генеральных осмотров пути;

3) результаты контроля и оценки состояния пути по данным контрольной проверки вагонами-путеизмерителями и вагонами-дефектоскопами различных типов;

4) данные первичной документации, ведущейся на участках и в станциях пути.

Среди распространенных диагностических средств можно выделить:

1) компьютеризованные вагоны лаборатории (КВЛ) производства фирмы «НПЦ Инфотранс» (системы КВЛ-П1МП, КВЛ-П2, КВЛ-П3). В вагонах системы КВЛ-П3.0 в отличие от двух предыдущих моделей используется бесконтактная система измерения. Вагон КВЛ-П3.0 обеспечивает контроль и автоматизированную оценку технического состояния рельсовой колеи: основные геометрические параметры, продольный профиль пути, короткие неровности на поверхности катания и рабочей грани рельсов, контроль температуры рельсов, контроль поперечного профиля головки рельса и его параметров и др. Особо подчеркнем возможность видеоконтроля состояния рельсов и рельсовых креплений;

2) Совмещенные вагоны-дефектоскопы АВИКОН-03М [54], которыми осуществляется комплексный достоверный контроль до 250 км рельсового пути за один проезд при скоростях до 60 км/ч на базе 4-х измерительных систем: ультразвуковая дефектоскопия, высокоэффективный магнитный канал, видеорегистрация рельсового пути, измерение коротких неровностей рельсового пути.

3) вагоны-путеобследовательские станции ЦНИИ-4МД [44], имеющие бесконтактную систему измерения параметров железнодорожного пути и др. [50, 79].

В феврале 2014 года в режиме видеоконференции прошло заседание НТС ОАО «РЖД» «О перспективах развития систем диагностики и мониторинга объектов путевого хозяйства на период до 2025 года». Это заседание затем было освещено в различных публикациях [50, 76, 79].

На заседании были представители всех дорог, представители отечественных и зарубежных компаний, сотрудники научно-проектных организаций и вузов.

Отмечена необходимость полной автоматизации диагностики и мониторинга состояния объектов в режиме онлайн при безусловном обеспечении безопасности движения. Подчеркнута необходимость перехода на мобильные средства и малообслуживаемые системы на подвижном составе, включая высокоскоростной.

На этом заседании обсуждались различные проекты, например: проект ИНФОТРАНС-ВЕЛАРО Rus, выполняемый совместно ИНФОТРАНС и «Сименс АГ» на базе поезда «Сапсан». В этом проекте реализуется высокая точность и максимальная автоматизация всех процессов управления, измерения, обработки и анализа информации без участия оператора; диагностический комплекс ЗАО «Фирма ТВЕМА» «Спринтер»; проект ЗАО «ПИК ПРОГРЕСС» совместно с ОАО «Радиоавионика» по развитию диагностического вагона ЦНИИ-4 и др.

Во многих выступлениях было подчеркнуто, что необходимо шире применять технологию УРРАН для формирования управленческих решений, развивать систему КАСКАД – комплексную автоматизированную систему комбинаторного анализа данных. Аналитические результаты системы КАСКАД должны стать основой для формирования различных баз данных, включая КАСАНТ и расчеты показателей методологии УРРАН. Автоматизация обработки данных позволит осуществлять объективный анализ и комплексную оценку состояния объектов инфраструктуры во времени, а также прогнозировать их техническое состояние, планировать ремонты и обслуживание по фактическому состоянию с сокращением обслуживающего персонала диагностирования на 20-30%.

На Улан-Баторской железной дороге (УБЖД) для контроля и диагностики железнодорожного пути используется вагон дефектоскоп-путеизмеритель «Декарт», разработанный группой компаний «Твема» [29].

По данным каталога, диагностический вагон «ДЕКАРТ» производится на базе четырехосного купейного цельнометаллического вагона модели 61-4179 производства ОАО «Тверской вагоностроительный завод» и отличается от предыдущего поколения диагностических вагонов серии ВД более комфортабельным оборудованием рабочего салона и прекрасно обставленными купе для отдыха экипажа. Вагон оборудован современной системой отопления и кондиционирования, автономной системой энергообеспечения, системой пожарной безопасности и прочими системами жизнеобеспечения, полностью соответствующими мировым стандартам тепло-, вибро- и шумоизоляции, что делает его идеальным для комфортной и безопасной работы, а также отдыха экипажа.

Рабочие места в диагностическом вагоне «ДЕКАРТ» спроектированы и смонтированы с учетом современных требований эргономики, функциональности и безопасности, оснащены новейшими средствами контроля. Салон отдыха укомплектован всем необходимым бытовым оборудованием для длительного проживания экипажа в автономных условиях. Вагон дефектоскоп-путеизмеритель «ДЕКАРТ» предназначен для непрерывного контроля и оценки состояния железнодорожного пути во время движения на скорости до 80 км/час. Оснащенный автоматизированной системой расшифровки и обработки данных измерения пути и системой визуального обнаружения дефектов рельсов и элементов верхнего строения пути», «ДЕКАРТ» может вести одновременный анализ дефектограмм рельсов и геометрии пути. Вагон позволяет диагностировать рельсы с шириной колеи 1520(1524) мм, выявляя при этом наличие в них каких-либо дефектов, а также контролировать и оценивать геометрические параметры рельсовой колеи главных и приемоотправоч-

ных путей под нагрузкой, размеры, материал и состав которых соответствует нормативным документам.

Скорость вагона дефектоскопа-путеизмерителя «ДЕКАРТ» с работающей путеизмерительной аппаратурой составляет 80 км/ч, а с работающей совместно дефектоскопной и путеизмерительной аппаратурой - 60 км/ч. Немаловажным для потребителя преимуществом вагона «ДЕКАРТ» является то, что он может эксплуатироваться в любое время года и суток при воздействии осадков в виде дождя и снега в диапазоне температур окружающего воздуха от -40°C до $+45^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха до 98%.

Использование вагонов дефектоскопов-путеизмерителей «ДЕКАРТ» на железных дорогах страны позволит 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:

- 1) приведение всех видов контроля геометрии рельсовой колеи к единой координате;
- 2) возможность отображения данных предыдущего проезда в реальном времени;
- 3) совместный анализ (на одном экране) видеокадров с путеизмерительными данными;
- 4) интеграция всех диагностических систем в единой программной оболочке;
- 5) обеспечивается самодиагностика аппаратных и программных средств оборудования.

Основными ограничениями системы являются:

- 1) минимальный радиус вписываемых кривых в рабочем положении до 250 м;
- 2) диапазон температур от -40°C до $+50^{\circ}\text{C}$;
- 3) относительная влажность воздуха до 90%;
- 4) срок службы измерительной, регистрирующей и вычислительной аппаратуры до 10 лет.

Диагностический вагон «Декарт» на УБЖД обслуживает различные участки пути с радиусом кривой R метров, например [29]:

- 1) Местонахождение (км): 289ПК10-290ПК10, $R=310$ м;
- 2) Местонахождение (км): 373ПК9-373ПК3, $R=310$ м;
- 3) Местонахождение (км): 374ПК5-375ПК2, $R=300$ м;
- 4) Местонахождение (км): 375ПК5-376ПК4, $R=310$ м;
- 5) Местонахождение (км): 427ПК9-428ПК7, $R=310$ м;
- 6) Местонахождение (км): 435ПК2-436ПК6, $R=300$ м;
- 7) Местонахождение (км): 448ПК10-449ПК4, $R=310$ м.

Каждый участок описывается четырьмя основными показателями:

- 1) Боковой износ (средний - БИ_{ср} и максимальный - БИ_{макс}), мм;
- 2) Шаблон-ширина колеи (минимальный - Ш_{мин}, максимальный - Ш_{макс}, средний - Ш_{ср}), мм;
- 3) Уровень-возвышение одной нити пути над другой (минимальный, максимальный, средний), мм;
- 4) План (радиус кривой) – (минимальный, максимальный, средний), мм.

Эти данные привязываются к дате движения диагностического вагона, что позволяет их накапливать по времени, как правило, по месяцам. Имеется возможность пересчета времени в млн.тн перевезенного груза или в грузонапряженность.

В диссертационной работе наибольшее внимание уделено прогнозированию остаточного ресурса рельсов через их боковой износ, шаблон ширины колеи, уровень возвышения одной нитки пути над другой и через другие по-

казатели. Важность этого исследования обусловлена необходимостью повышения безопасности движения, срока службы рельсов за счет внедрения технологии обслуживания рельсового хозяйства по техническому (фактическому) состоянию.

В работах [61, 62, 84] описан мониторинг бокового износа рельсов на Восточно-Сибирской железной дороге по данным вагона ЦНИИ-4МД. Показано, что по результатам мониторинга максимального и среднего бокового износа рельсов, можно прогнозировать их остаточный ресурс, а в дальнейшем внедрять технологию обслуживания по техническому состоянию. Диссертационная работа развивает и совершенствует этот подход, но по данным УБЖД на основе диагностического вагона «Декарт».

1.3. Характеристика перевозок на железных дорогах в условиях неопределенности и риска

Перевозки на железных дорогах осуществляются в условиях неопределенности и риска, поэтому безопасности движения на транспорте, оценке величины рисков, их влиянию на принятие управленческих решений посвящена большая литература и различные нормативные документы [3, 5, 16, 23, 56, 64, 67, 96, 103, 109, 128].

Риск как неопределенность часто связан с тем, что исследуемый объект подвергается воздействию множества случайных факторов, обобщенное влияние которых обеспечивает статистическую устойчивость неопределенности. Под неопределенностью в этом случае, понимают ситуацию, когда частично отсутствует информация о состояниях исследуемого объекта (системы), но имеется возможность экспертно-статистической оценки параметров вероятностной модели [15].

Наиболее часто в нормативных документах риск – это «сочетание вероятности события и его последствий». Поэтому на практике наиболее распространена двухфакторная модель оценки величины риска

$$R=P(A) \cdot U_a, \quad (1.1)$$

где R – величина риска; $P(A)$ – вероятность негативного события A ; U_a – ущерб от негативного события A .

На практике оценить количественно факторы $P(A)$ и U_a не всегда удается, поэтому чаще используется экспертный подход с применением различных шкал, позволяющих описать как факторы, так и сам риск. При экспертном описании шкал выделяют три компоненты: количество уровней их наименование и их экспертное описание, которое позволяет пользователю использовать эти шкалы.

В компании ОАО «РЖД» предложена следующая методика, реализующая двухфакторную модель (1.1). Кратко опишем эту методику [23]:

1) для описания частоты (вероятности) возникновения негативного события (ЧасСоб) рекомендована шестиуровневая шкала: частое (Ч), вероятное (В), случайное (С), редкое (Р), крайне редкое (КР), маловероятное (МВ);

2) для описания последствий от опасного события (ущерб от негативного события) (УщСоб) предложена четырехуровневая шкала: незначительный (НЗ), несущественный (НС), критический (КР), катастрофический (КАТ);

3) для описания величины риска предложена четырехуровневая шкала: не принимаемый в расчет (НПР), допустимый (Д), не желательный (НЖ), не допустимый (НД);

4) для связи этих шкал предложена двухвходовая таблица (табл. 1.1): столбцы определяют ущерб от негативного события (УщСоб), строки – частоту негативного события (ЧасСоб), а элементы таблицы являются величинами риска.

Таблица 1.1

Оценка величины риска, модель (1.1)

<u>ЧасСоб/УщСоб</u>	<u>НЗ</u>	<u>НС</u>	<u>КР</u>	<u>КАТ</u>
<u>Ч</u>	<u>НЖ</u>	<u>НД</u>	<u>НД</u>	<u>НД</u>
<u>В</u>	<u>Д</u>	<u>НЖ</u>	<u>НД</u>	<u>НД</u>
<u>С</u>	<u>Д</u>	<u>НЖ</u>	<u>НЖ</u>	<u>НД</u>
<u>Р</u>	<u>НПР</u>	<u>Д</u>	<u>НЖ</u>	<u>НЖ</u>
<u>КР</u>	<u>НПР</u>	<u>НПР</u>	<u>Д</u>	<u>Д</u>
<u>МВ</u>	<u>НПР</u>	<u>НПР</u>	<u>НПР</u>	<u>НПР</u>

Так, например, если для некоторой ситуации частота события имеет уровень С (случайное), а ущерб от события имеют уровень КР (критический), то уровень риска будет нежелательный (НЖ).

Дополнительно эксперты должны дать пользователю рекомендации о том, что он должен предпринять при той или иной величине риска. Так, например, для уровня «нежелательный» в методике даны такие рекомендации [23]: «Риск может быть принят при согласовании руководства организации, в случае, когда снижение риска невыполнимо или нецелесообразно. Обработка риска сводится к устранению последствий».

В работах [63, 64, 83] предложен подход, использующий динамические модели рисков применительно к ремонтным работам пути и его компонент.

1.4. Анализ методов прогнозирования на основе временных рядов, необходимых для оценки остаточного ресурса рельсов

При оценке остаточного ресурса рельсов по их боковому износу или по другой информации мониторинга пути, используются методы прогнозирования. В связи с этим, приведем краткий обзор возможных методов прогнозирования на основе временных рядов.

Прогнозированию на основе временных рядов посвящена значительная литература, включая прогнозирование показателей, связанных с железнодорожным транспортом [2, 12, 32-35, 38, 40, 41, 59, 70, 129].

Задачей прогнозирования является нахождение функциональной зависимости между влияющими факторами и некоторым показателем с целью ее использования для различных приложений. Если влияющим фактором является время, то речь идет о построении прогнозной модели на основе временного ряда.

Технология процедуры прогнозирования содержит несколько этапов [2]:

- 1) выбор показателей, прогнозирование которых необходимо провести. На этом же этапе происходит накопление исходных данных по этим показателям;
- 2) выбор и обоснование прогнозных функций, которые могут описывать исходные данные;
- 3) выбор метода оценки параметров обоснованных прогнозных функций (как правило, метод наименьших квадратов либо метод наименьших модулей);
- 4) проверка адекватности полученных прогнозных моделей;
- 5) проведение прогнозирования выбранных показателей, принятие решений [121].

В качестве исходной информации могут использоваться либо только статистические данные, либо дополнительно может использоваться информация экспертов [10, 20, 21, 35, 40, 95].

В подобных случаях, рекомендуется дополнительно к статистическим данным добавлять суждения экспертов на различные годы, этими экспертами являются специалисты в исследуемой предметной области. Наличие дополнительной экспертной информации (экспертных суждений) увеличивает объ-

ем исходных данных, а также может изменять их тенденцию, что является существенным преимуществом этого подхода.

Как правило, экспертные суждения выбираются либо в виде точечных значений или в виде интервальных. В диссертационной работе используются точечные суждения, полученные группой квалифицированных экспертов на прогнозируемые годы.

На практике, при создании прогнозных моделей на основе временных рядов, используются разные методы, например:

а) аппроксимация линейными и нелинейными функциями [2, 32-35, 38, 40, 126];

б) авторегрессионные методы прогнозирования, включающие методы среднего и экспоненциального сглаживания, метод Винтера, методы Бокса-Дженкинса и др. [12]);

в) кластерные методы и их модификации [70, 71];

г) нейронные методы и их модификации [71];

Авторегрессионные методы прогнозирования является одними из наиболее известными, хорошо изученными и широко применяемыми в практических приложениях. Так, например, модель простой линейной авторегрессии имеет следующий вид [12]

$$\tilde{q}_t = \varphi_0 + \varphi_1 q_{t-1} + \varphi_2 q_{t-2} + \dots + \varphi_m q_{t-m} = \varphi_0 + \sum_{j=1}^m \varphi_j q_{t-j}. \quad (1.2)$$

Здесь $\varphi_0, \dots, \varphi_m$ коэффициенты, для определения которых обычно используют метод наименьших квадратов. Формула (1.2) описывает авторегрессионную модель порядка m , в которой значения показателя в данный момент времени линейно зависят от предыдущих значений [12, 35].

Другая распространённая модель из класса авторегрессионных, получившая название скользящего среднего, имеет вид [12, 35]

$$\tilde{q}_t = \omega_1 q_{t-1} + \omega_2 q_{t-2} + \dots + \omega_k q_{t-k} = \sum_{j=1}^k \omega_j q_{t-j}, \quad (1.3)$$

где k – порядок скользящего среднего, $\omega_1, \dots, \omega_k$ – весовые коэффициенты,

$$\sum_{j=1}^k \omega_j = 1.$$

Если в модели (1.3) все коэффициенты одинаковые, то ее называют простым скользящим средним, а если коэффициенты различны и равны

$$\omega_j = \frac{\gamma_j}{\sum_{j=1}^k \gamma_j}, \text{ где } \gamma_j \text{ – весовые коэффициенты, то подобную модель называют}$$

взвешенным скользящим средним.

Большое распространение имеет модель экспоненциального скользящего среднего следующего вида [12]

$$\tilde{q}_t = \alpha \cdot q_{t-1} + (1 - \alpha) \cdot \tilde{q}_{t-1}. \quad (1.4)$$

В модели (1.4) коэффициент сглаживания $\alpha \in [0;1]$; начальное значение, как правило, равно $\tilde{q}_0 = q_0$.

Модели авторегрессии были отклонены применительно к рассматриваемой задаче прогнозирования остаточного ресурса рельсов, так как для этих моделей достаточно проблематично получать доверительные интервалы.

На рисунке 1.1 приведена общая схема комплексного прогнозирования базовых показателей, взятой из работы [35]. Базовыми показателями являются грузооборот и погрузка грузов на УБЖД.

Комплексное прогнозирование основано на том, что для оценки значений базовых показателей в будущем, предлагается использовать четыре вида данных, различным образом оценивающих перевозочный процесс железнодорожным транспортом:

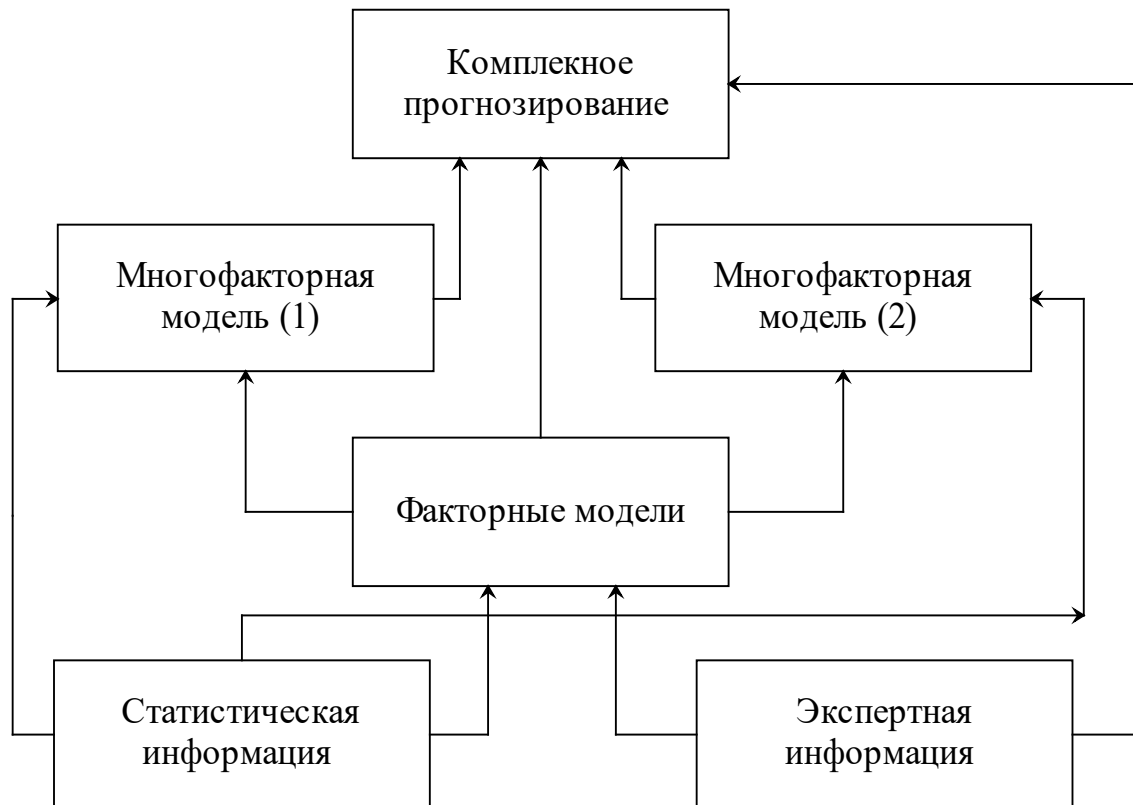


Рис. 1.1. Общая схема комплексного прогнозирования базовых показателей

- а) значение, полученное по многофакторной модели первого порядка (1);
- б) значение, полученное по многофакторной модели второго порядка (2);
- в) значение, полученное по временному ряду (используются факторные модели);
- г) точечное экспертное суждение группы квалифицированных специалистов.

Комплексное прогнозирование основано на двух видах информации: а) статистической, которая формируется Центром статистического учета и информационных технологий УБЖД; б) экспертной, в виде точечных суждений и рангов, полученных от группы квалифицированных специалистов УБЖД.

В работе [35] рекомендованы четыре функции:

- 1) полиномиальная

$$y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n; \quad (1.5)$$

- 2) экспоненциальная

$$y(t) = ab^t; \quad (1.6)$$

- 3) в виде логарифмической параболы

$$y(t) = ab^t c^{t^2}; \quad (1.7)$$

- 4) логистическая

$$y(t) = \frac{k}{1 + b \cdot e^{-at}}. \quad (1.8)$$

Параметры полиномиальной функции (1.5) определяются по МНК. Функция (1.6) логарифмированием сводится к полиному первой степени. Далее можно использовать МНК.

Объем статистических данных в цитируемой работе не очень большой (использовались статистические данные с 2000 по 2015 годы). В связи с этим, рекомендации по выбору факторных моделей, используемых в комплексном прогнозировании, были нами рассмотрены и проанализированы.

Выбранные прогнозные модели для задачи прогнозирования остаточного ресурса рельсов приведены в параграфе 2.3.

1.5. Актуальность, цель и задачи работы

Главным перевозчиком грузов железнодорожным транспортом в Монголии является Улан-Баторская железная дорога, которая является совместным российско-монгольским предприятием с 50-процентным участием с каждой стороны. Большинство проверенных и эффективных технологий, разработанных и апробированных в компании ОАО «РЖД», со временем внедряются на 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.

Безопасность перевозочного процесса во многом определяется надежностью функционирования железнодорожного пути. При создании железнодорожного пути используются различные компоненты: рельсы, шпалы, подкладки, балласт и земляное полотно др. Соединяющим элементом этой системы служат рельсовые скрепления различного вида.

Рельсы и рельсовые скрепления в процессе эксплуатации могут отказывать по различным причинам. 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. Особо подчеркнем возможность видеоконтроля состояния рельсов и рельсовых скреплений.

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. Основными задачами системы «ЭКСПЕРТ» являются сбор, обработка и анализ данных, поступающих с диагностических средств, их систематизация и синхронизация для информационной поддержки управленческих решений.

Это позволяет на основе данных диагностики на горизонте в несколько лет с большой достоверностью определять уровень предотказного состояния пути по его геометрии а также по состоянию рельсов и рельсовых скреплений. Это, в свою очередь, позволяет внедрять технологию обслуживания пути по фактическому состоянию, сокращать людские и финансовые ресурсы.

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 пути на основе сравнительного анализа имеющегося алгоритмического обеспечения.

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.

2. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

2.1. Постановка задачи оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути

Инфраструктура перевозочного процесса железнодорожным транспортом, важнейшей компонентой которой является железнодорожный путь, является сложной системой. В связи с этим, постановку задачи оценки показателей надежности железнодорожного пути, необходимо провести с позиций системного анализа, учитывая наличие связей между его компонентами.

Основные понятия, определения и обоснование железнодорожного пути как сложной системы приведены в главе 1.

Как уже отмечалось, оценка состояния пути проводится по следующим элементам (компонентам) [6, 13, 22, 44, 54]: геометрия рельсовой колеи, устройства рельсовой колеи, рельсы, скрепления, шпалы, балласт, земляное полотно, искусственные сооружения, комплексная оценка объектов пути и др. В различных работах отмечается, что важной задачей мониторинга является прогнозирование остаточного ресурса рельсов через их боковой износ, шаблон ширины колеи, уровень возвышения одной нитки пути над другой и другие показатели [61, 62, 84-86].

Для этого необходимо разработать математическое, информационное и программное обеспечение по обработке измеряемых показателей контроля и диагностики железнодорожного пути, в нашем случае диагностическим вагоном «Декарт», который используется на Улан-Баторской железной дороге.

Показатели надежности невосстанавливаемых объектов

Пусть наработка T является случайной величиной. Из теории вероятностей и надежности известно [9, 14, 60], что эта величина описывается

функцией распределения ($F(t)$), плотностью распределения вероятностей ($f(t)$) и числовыми характеристиками: математическим ожиданием ($\bar{t}$), дисперсией (D_t), среднеквадратическим значением (σ_t) и коэффициентом вариации (k_v).

При определении закона распределения вероятностей для наработки используется два основных подхода:

1. Исходя из статистических данных, постулируется и обосновывается закон распределения вероятностей для наработки. Здесь, как правило, используются типовые законы: нормальный, гамма, Вейбулла и др [9, 60, 82].

2. Обосновывается модель изменения параметра технического состояния (ПТС) объекта, исходя из которой, аналитически выводится закон распределения вероятностей для наработки. Здесь, как правило, используются распределения: Бирнбаума-Саундерса, обратный гауссовский и др [9, 60].

В теории надежности для невосстанавливаемых объектов предложено несколько показателей надежности, основанных на плотности распределения вероятностей или функции распределения [124].

Основным показателем является вероятность безотказной работы [9]

$$P(t) = \text{Вер}(t > T) = 1 - F(t). \quad (2.1.1)$$

Зная показатель (2.1.1) определяются остальные показатели.

Следующей по значимости для невосстанавливаемых объектов является интенсивность отказов [9]

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)}. \quad (2.1.2)$$

В отличие от плотности распределения, интенсивность отказов является условной плотностью распределения вероятностей возникновения отказа невосстанавливаемого объекта.

Плотностью распределения вероятностей наработки до отказа, функция распределения, интенсивность отказов и вероятность безотказной работы

функционально связаны между собой, что позволяет, зная одну характеристику наработки находить другие

$$f(t) = -\frac{dP(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt}, \quad F(t) = \int_0^t f(t)dt,$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt. \quad (2.1.3)$$

Можно указать дополнительную связь между интенсивностью отказов и вероятностью безотказной работы до отказа [60]

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right). \quad (2.1.4)$$

Помимо рассмотренных выше характеристик надежности, выделяют следующие показатели надежности [60], которые рекомендуется оценивать в процессе эксплуатации:

- средняя наработка до отказа;
- гамма-процентный ресурс до отказа;
- средний остаточный ресурс до отказа;
- гамма-процентный остаточный ресурс до отказа.

Рассмотрим их последовательно:

а) средняя наработка до отказа $\bar{t}_o$

$$\bar{t}_o = \int_0^\infty P(t)dt; \quad (2.1.5)$$

б) гамма-процентный ресурс до отказа для вероятности γ определяется из уравнения

$$P(t) = \gamma; \quad (2.1.6)$$

в) остаточный ресурс до отказа

$$Y_x = T - x. \quad (2.1.7)$$

Здесь x – время, до которого объект не отказал. Вероятность безотказной работы для остаточного ресурса (2.1.7) [60]

$$P_x(y) = 1 - F_x(y) = P(x+y)/P(x); \quad (2.1.8)$$

г) средний остаточный ресурс до отказа

$$\bar{y}_x = \int_0^{\infty} P_x(y) dy, \quad (2.1.9)$$

где $P_x(y)$ определяется по формуле (2.1.9);

д) гамма-процентный остаточный ресурс определяется из уравнения относительно остаточного ресурса до отказа y

$$P_x(y) = \gamma. \quad (2.1.10)$$

*Описание постановки задачи оценки показателей надежности
компонентов железнодорожного пути*

На рисунке 2.1 приведено графическое представление постановки задачи оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути, реализуемой в диссертационном исследовании.

Дадим описание этой постановки:

1. Объект исследования (Об Ис), содержащий следующие компоненты железнодорожного пути: рельсовые скрепления, показатели надежности которых необходимо уметь оценивать; 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 параметры геометрии пути. Результаты мониторинга пути учитывают тот факт, что железнодорожный путь является сложной системой.

2. Исходная экспертно-статистическая информация (ЭСИ), которая используется для оценки показателей надежности рельсовых скреплений. Особенностью этой информации является ее незначительный объем. При этом предполагается разработать три типа моделей для оценки показателей надежности рельсовых скреплений:

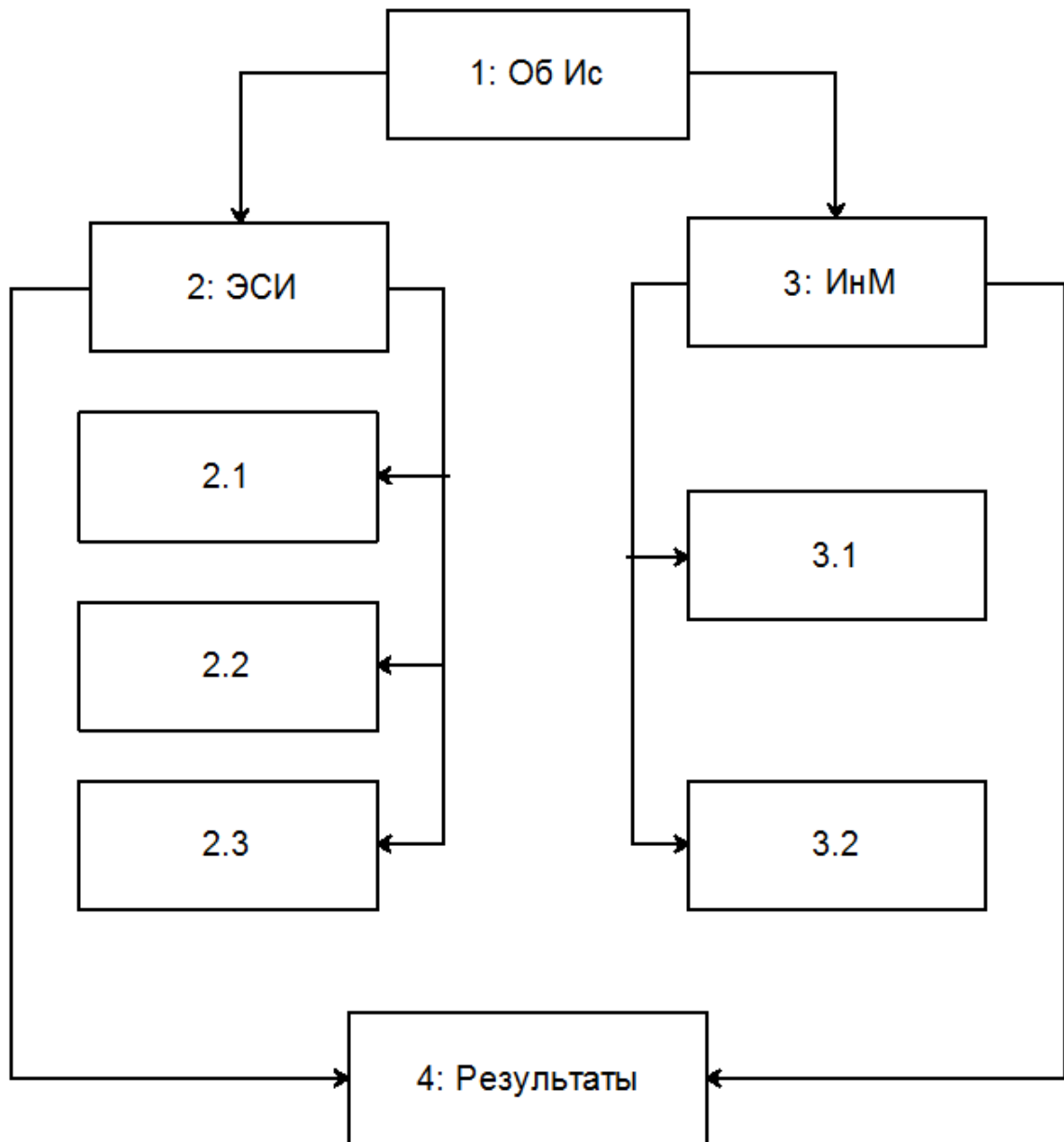


Рис. 2.1. Графическое представление постановки задачи оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути

- 2.1. Аналитическую, основанную на выбранной вероятностной модели наработки, как случайной величины. Этот тип модели предложен и описан в параграфе 2.2.1;
- 2.2. Численную, использующую результаты имитационного моделирования. Этот тип модели предложен и описан в параграфе 2.2.2 и является научной новизной работы;

2.3. Нечеткую численную, описанную в параграфе 2.2.3 и являющуюся научной новизной работы. Этот тип модели возникает тогда, когда на практике не удастся однозначно описать наработку как случайную величину, какие-то ее параметры могут быть нечеткими (принимают свои значения в некотором интервале).

3. Исходная информация, полученная средствами мониторинга пути (ИнМ). Особенностью этой информации является ее незначительный объем. Информация мониторинга содержит значения бокового износа рельсов и значения параметров геометрии пути. При этом предполагается разработать два типа моделей:

3.1. Регрессионные модели прогнозирования остаточного ресурса параметров технического состояния рельсов (боковой износ рельсов и т.д.). Эти модели предложены и описаны в параграфе 2.3.1;

3.2. Модели оценки остаточного ресурса рельсов применительно к боковому их износу. Эти модели предложены и описаны в параграфе 2.3.2;

4. Результаты мониторинга и оценки показателей надежности, необходимые 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. Подчеркнем, что целью диссертационного исследования является алгоритмическое обеспечение получения этих результатов. Технология их использования не является предметом этого исследования. Перейдем к изложению основных результатов диссертационной работы.

2.2. Модели наработки рельсового скрепления при ограниченном объеме статистической информации

В данном исследовании рассматривается два типа неопределенности.

Первый тип приводит к тому, что в условиях неопределенности наработка считается случайной величиной. В этом случае необходимо как-то обосновать закон распределения этой величины с точностью до значений ее параметров. В дальнейшем можно использовать математический аппарат теории надежности, описанный в литературе [82, 124]. Данный тип неопределенности рассмотрен в параграфах 2.2.1 и 2.2.2.

Второй тип приводит к тому, что в условиях неопределенности не удастся однозначно описать наработку как случайную величину, какие-то ее параметры могут быть нечеткими. В данном исследовании (п. 2.2.3) для этого типа неопределенности предлагается нечеткий численный вероятностный анализ, позволяющий с привлечением имитационного моделирования оценивать показатели надежности рельсовых скреплений, как разновидности невосстанавливаемых объектов.

Важность численного вероятностного анализа, включая его применения в теории надежности, обсуждается в работах [36, 37, 100]. В работе [36] дается такое определение: «численный вероятностный анализ это раздел вычислительной математики, предметом которого является решение задач со стохастическими неопределенностями в данных с использованием численных операций над плотностями вероятностей случайных величин и их функций». Необходимость создания подобных численных операций во многом связано с тем, что в практических задачах, включая вопросы теории надежности, требуется знать вероятностные характеристики в условиях неопределенности исходных данных. Данный подход будет применен и развит для вероятностной модели наработки в виде треугольного распределения.

2.2.1. Треугольное распределение, как вероятностная модель наработки в условиях неопределенности первого типа

При отсутствии существенной по объему статистической информации о наработке какого-то объекта, используется подход с привлечением экспер-

тов. Эксперты, имея некоторую статистическую информацию, оценивают наибольшее значение (t_m) и наиболее вероятное значение (t_o), которое в теории вероятностей называют модой [14]. Из теории вероятностей известно, что эти два параметра позволяют однозначно описать треугольное распределение с плотностью распределения вероятностей

$$f(t) = \begin{cases} \frac{2 \cdot t}{t_m \cdot t_0}, & 0 < t \leq t_0 \\ \frac{2(t_m - t)}{t_m \cdot (t_m - t_0)}, & t_0 < t < t_m \end{cases} . \quad (2.2.1)$$

Модальное (максимальное) значение $f(t_o) = 2/t_m$.

Функция распределения треугольного распределения имеет вид

$$F(t) = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ \frac{t^2}{t_m \cdot t_0}, & 0 < t \leq t_0 \\ 1 - \frac{(t_m - t)^2}{t_m \cdot (t_m - t_0)}, & t_0 < t < t_m \\ 1, & t \geq t_m \end{cases} . \quad (2.2.2)$$

Значение $F(t_0) = \frac{t_0}{t_m} = u$; $F(t_m) = 1$. Графическое представление функций

(2.2.1) и (2.2.2) приведено на рисунках 2.2 и 2.3, соответственно.

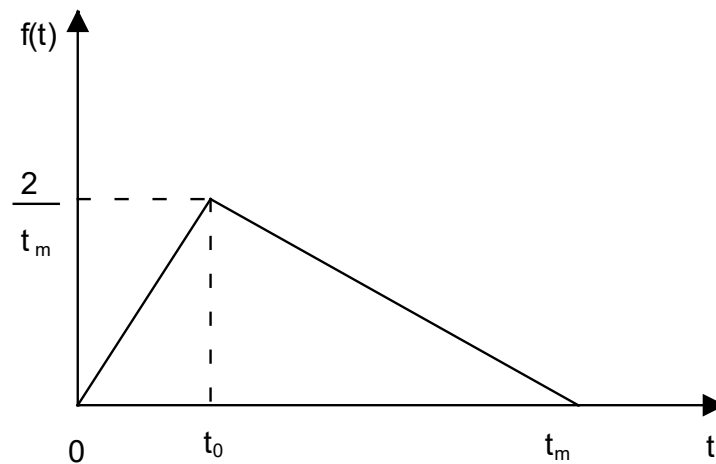


Рис. 2.2. Плотность распределения вероятностей для треугольного распределения

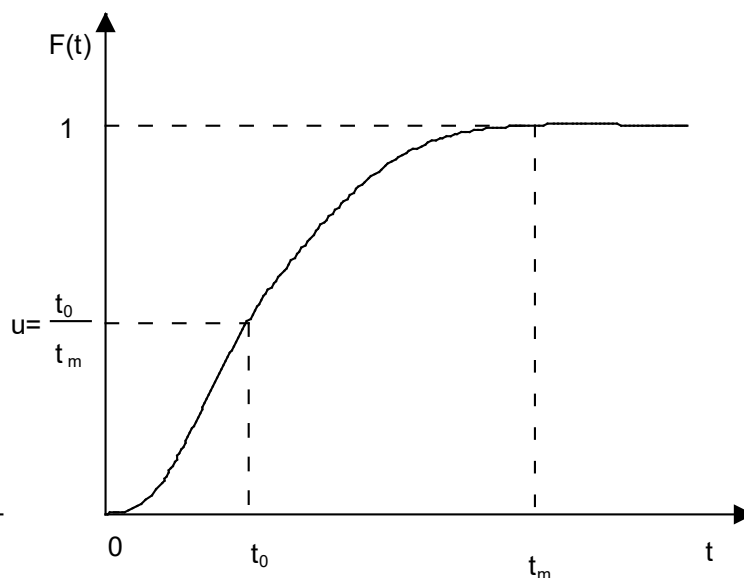


Рис. 2.3. Функция распределения для треугольного распределения

Математическое ожидание ($\bar{t}$), дисперсия (D_t), среднеквадратическое отклонение (σ_t) и коэффициент вариации (k_v) для треугольного распределения равны

$$\bar{t} = \frac{1}{3}(t_m + t_0); \quad (2.2.3)$$

$$D_t = \frac{1}{18}(t_m^2 - t_m \cdot t_0 + t_0^2); \quad (2.2.4)$$

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{2 \cdot (t_m^2 - t_m \cdot t_0 + t_0^2)}}{6}; \quad (2.2.5)$$

$$k_v = \frac{\sigma_t}{\bar{t}} = \frac{\sqrt{2 \cdot (t_m^2 - t_m \cdot t_0 + t_0^2)}}{2(t_m + t_0)}. \quad (2.2.6)$$

Учитывая, что $t_0/t_m = u$, $0 \leq u \leq 1$, величину (2.2.6) можно представить следующим образом

$$k_v = \frac{\sqrt{2 \cdot (1 - u + u^2)}}{2 \cdot (1 + u)}; \quad \frac{1}{2\sqrt{2}} = 0,354 \leq k_v \leq \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707. \quad (2.2.7)$$

При $u=0,5$ $k_v=0,408$.

Если по статистическим данным можно оценить математическое ожидание и экспертно выбрать коэффициент вариации, то параметры t_m и t_o можно определить методом моментов.

Получим и приведем эти модели:

1) из формулы (2.2.7) по значению k_v определяем величину u

$$u = \frac{1 + 4k_v^2 - \sqrt{3(8k_v^2 - 1)}}{2(1 - 2k_v^2)}; \quad (2.2.8)$$

2) из формулы (2.2.3) по значению $\bar{t}$, учитывая, что мода $t_o = u \cdot t_m$, находим t_m , а затем t_o

$$t_m = \frac{3 \cdot \bar{t}}{u + 1}; \quad t_o = \frac{3 \bar{t} \cdot u}{u + 1}. \quad (2.2.9)$$

Алгоритм компьютерного моделирования треугольного распределения

Решая с учетом (2.2.2) уравнение

$$F(t) = r, \quad r \rightarrow R(0,1), \quad (2.2.10)$$

получим алгоритм моделирования времени наработки для треугольного распределения

$$t = \begin{cases} \sqrt{t_m \cdot t_o \cdot r}, & 0 < r \leq \frac{t_o}{t_m}; \quad 0 < t \leq t_o \\ t_m - \sqrt{t_m(t_m - t_o)(1-r)}, & \frac{t_o}{t_m} < r < 1; \quad t_o < t < t_m \end{cases}. \quad (2.2.11)$$

Здесь r – значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале $(0, 1)$ [45, 51].

Точечная оценка $(\tilde{t})$ и доверительный интервал $(t_1; t_2)$ для математического ожидания (2.2.3) по результатам компьютерного моделирования равны [53, 92]

$$\tilde{t} = \frac{1}{n} \sum_{q=1}^n t_q; \quad t_1 = \tilde{t} - \delta; \quad t_2 = \tilde{t} + \delta, \quad (2.2.13)$$

где

$$\delta = \frac{z_\gamma \cdot s}{\sqrt{n}}; \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^n t_q^2 - n \cdot \tilde{t}^2}{n-1}}; \quad (\delta / \tilde{t}) \cdot 100 < e_z, \quad (2.2.13^*)$$

здесь t_q – выборочные значения наработки; z_γ – квантиль нормированного нормального распределения для доверительной вероятности γ , s – оценка среднеквадратического отклонения (2.2.5). Объем выборки n должен обеспечить заданную относительную точность e_z в процентах (2.2.13*).

На рисунке 2.4 приведена гистограмма частот, полученная в результате компьютерного моделирования по алгоритму (2.2.11) при $t_m=11$ и $t_o=4$, объем выборки $n=20000$ (обоснование значений параметров для треугольного распределение приведено в параграфе 3.1). Данный объем выборки обеспечивает относительную точность меньше 1%. Гистограмма частот соответствует плотности (рис. 2.2), что указывает на высокое качество компьютерного моделирования.

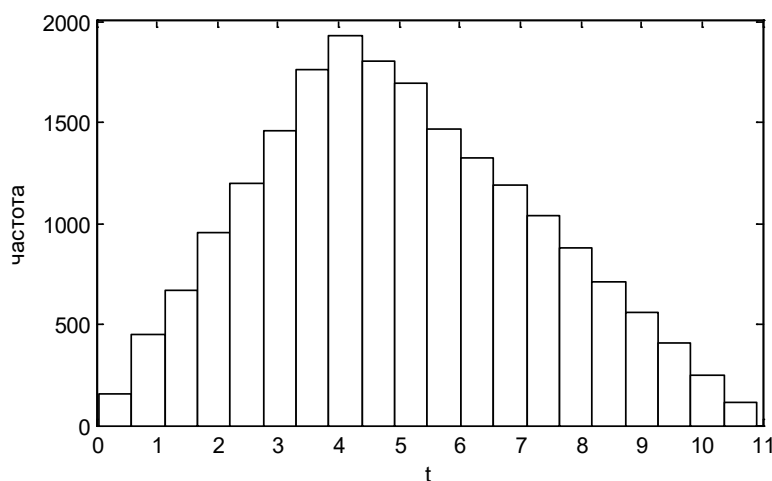


Рис. 2.4. Гистограмма частот для наработки скрепления

Для выборки (рис. 2.4) точечные оценки числовых характеристик и доверительный интервал для математического ожидания (2.2.13) равны:

$$\tilde{t} = 5,008; \quad \tilde{k}_v = 0,454; \quad s=2,272; \quad (t_1; t_2) = (4,976; 5,040). \quad (2.2.14)$$

Значение математического ожидания ($\bar{t} = 5$) попало в доверительный интервал (2.2.14), а коэффициент вариации ($k_v = 0,455$) близок к своей оценке (2.2.14). Это указывает на высокое качество компьютерного моделирования.

Модели показателей надежности для треугольного распределения

Найдем показатели надежности невосстанавливаемого объекта, когда его наработка имеет треугольное распределение с плотностью (2.2.2). Сами показатели надежности приведены в предыдущем параграфе.

Вероятность безотказной работы с учетом (2.2.2) и (2.1.1) равна

$$P(t) = \begin{cases} 1, & t \leq 0 \\ 1 - \frac{t^2}{t_m \cdot t_0}, & 0 < t \leq t_0 \\ \frac{(t_m - t)^2}{t_m \cdot (t_m - t_0)}, & t_0 < t < t_m \\ 0, & t \geq t_m \end{cases} \quad (2.2.15)$$

На рисунке 2.5 приведен график вероятности безотказной работы (2.2.15) при $t_m=11$ и $t_0=4$.

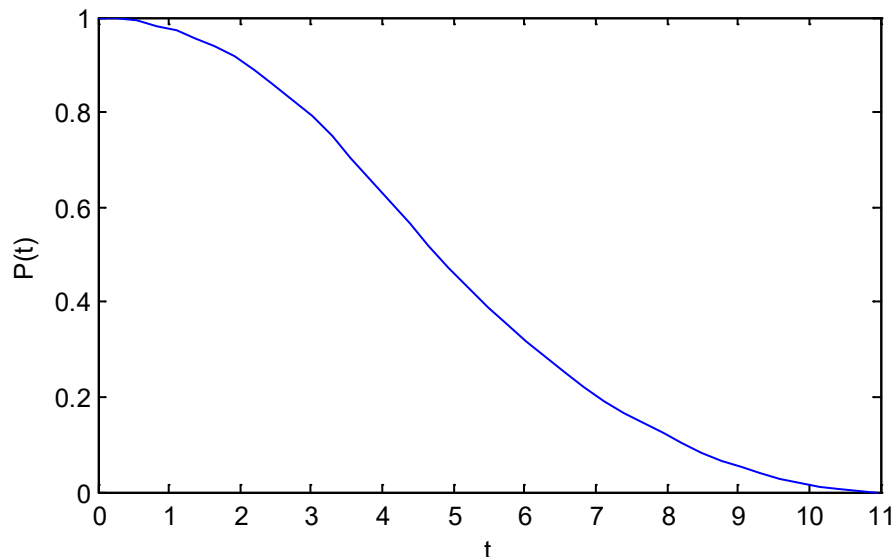


Рис. 2.5. График вероятности безотказной работы

Интенсивность отказов (2.1.2) с учетом (2.2.1) и (2.2.15) равна

$$\lambda(t) = \begin{cases} \frac{2 \cdot t}{t_m \cdot t_0 - t^2}, & 0 \leq t \leq t_0 \\ \frac{2}{t_m - t}, & t_0 < t < t_m \end{cases} . \quad (2.2.16)$$

Значение $\lambda(t_0) = 2/(t_m - t_0)$. При значениях t близких к t_m интенсивность отказов стремится к бесконечности. В таблице 2.1 приведены значения интенсивности отказов для треугольного распределения (2.2.16) при $t_m=11$ и $t_0=4$.

Таблица 2.1

Значения интенсивностей отказов для треугольного распределения

t	$\lambda(t)$	t	$\lambda(t)$
0,00	0,0000	5,50	0,3636
0,25	0,0114	5,75	0,3810
0,50	0,0229	6,00	0,4000
0,75	0,0345	6,25	0,4211
1,00	0,0465	6,50	0,4444
1,25	0,0589	6,75	0,4706
1,50	0,0719	7,00	0,5000
1,75	0,0855	7,25	0,5333
2,00	0,1000	7,50	0,5714
2,25	0,1156	7,75	0,6154
2,50	0,1325	8,00	0,6667
2,75	0,1509	8,25	0,7273
3,00	0,1714	8,50	0,8000
3,25	0,1944	8,75	0,8889
3,50	0,2205	9,00	1,0000
3,75	0,2505	9,25	1,1429
4,00	0,2857	9,50	1,3333
4,25	0,2963	9,75	1,6000
4,50	0,3077	10,00	2,0000
4,75	0,3200	10,25	2,6667
5,00	0,3333	10,50	4,0000
5,25	0,3478	10,75	8,0000

При относительно невысокой грузонапряженности пути интенсивность отказов рельсовых креплений незначительна, но затем она резко возрастает; $\lambda(2) = 0,1$; $\lambda(t_o = 4) = 0,286$; $\lambda(10,75) = 8,0$.

Средняя наработка до отказа (2.1.5) с учетом (2.2.15)

$$\bar{t}_0 = \frac{1}{3}(t_m + t_0). \quad (2.2.17)$$

Величины (2.2.17) и (2.2.3) совпадают, т.к. это одно и то же.

Найдем гамма-процентный ресурс до отказа из уравнения (2.1.6) с учетом (2.2.15)

$$t(\gamma) = \begin{cases} \sqrt{(1-\gamma) \cdot t_m \cdot t_0}, & 1 - \frac{t_0}{t_m} \leq \gamma < 1 \\ t_m - \sqrt{\gamma \cdot t_m \cdot (t_m - t_0)}, & 0 < \gamma < 1 - \frac{t_0}{t_m} \end{cases}. \quad (2.2.18)$$

Вероятность безотказной работы остаточного ресурса (2.1.7) с учетом (2.2.15) для треугольного распределения имеет два случая:

а) $0 < x \leq t_o$;

$$P_x(y) = \begin{cases} 1, & y \leq 0 \\ \frac{t_m \cdot t_0 - (x+y)^2}{t_m \cdot t_0 - x^2}, & 0 < y \leq t_0 - x \\ \frac{t_0 \cdot (t_m - x - y)^2}{(t_m - t_0)(t_m \cdot t_0 - x^2)}, & t_0 - x < y \leq t_m - x \\ 0, & t > t_m - x \end{cases}. \quad (2.2.19)$$

Значение $P_x(t_0 - x) = \frac{t_0 \cdot (t_m - t_0)}{t_m \cdot t_0 - x^2}$, $0 < x \leq t_o$;

б) $t_o < x < t_m$;

$$P_x(y) = \begin{cases} 1, & y \leq 0 \\ \frac{(t_m - x - y)^2}{(t_m - x)^2}, & 0 < y \leq t_m - x \\ 0, & t > t_m - x \end{cases}. \quad (2.2.20)$$

На рисунке 2.6 приведен график вероятности безотказной работы для остаточного ресурса (2.2.19) при $t_m=11$, $t_o=4$, $x=2$.

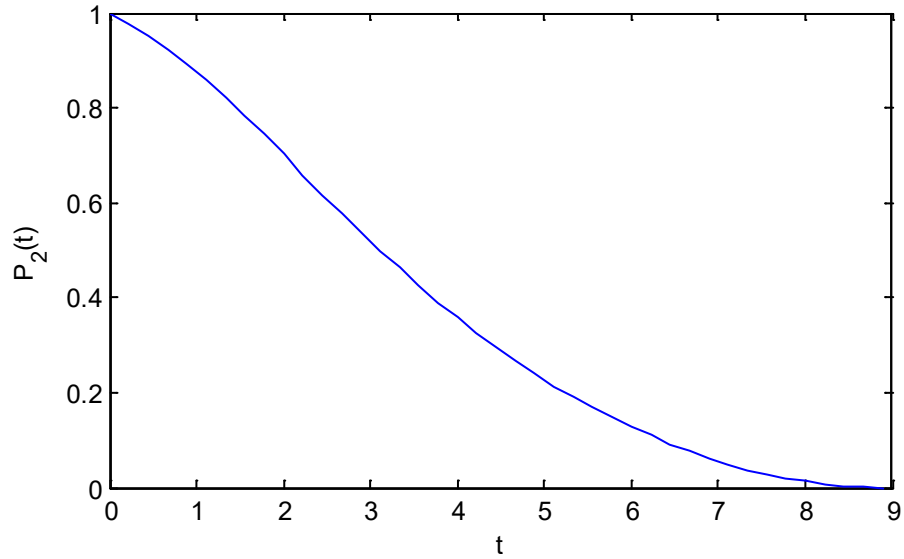


Рис. 2.6. График вероятности безотказной работы для остаточного ресурса, $x=2$

Средний остаточный ресурс до отказа (2.1.9) для треугольного распределения также имеет два случая:

а) $0 < x \leq t_o$, используя (2.2.19)

$$\bar{y}_x = \int_0^{t_m-x} P_x(y) dy = \int_0^{t_o-x} \frac{t_m \cdot t_o - (x+y)^2}{t_m \cdot t_o - x^2} dy + \int_{t_o-x}^{t_m-x} \frac{t_o \cdot (t_m - x - y)^2}{(t_m - t_o)(t_m \cdot t_o - x^2)} dy,$$

$$\bar{y}_x = \frac{x^3 - 3 \cdot t_m \cdot t_o \cdot x + t_m \cdot t_o (t_m + t_o)}{3 \cdot (t_m \cdot t_o - x^2)}; \quad (2.2.21)$$

б) $t_o < x < t_m$, используя (2.2.20)

$$\bar{y}_x = \int_0^{t_m-x} P_x(y) dy = \int_0^{t_m-x} \frac{(t_m - x - y)^2}{(t_m - x)^2} dy,$$

$$\bar{y}_x = \frac{t_m - x}{3}. \quad (2.2.22)$$

При $x=t_o$ формула (2.2.21) совпадает с формулой (2.2.22).

Гамма-процентный остаточный ресурс для треугольного распределения также имеет два случая.

Учитывая (2.1.10):

а) $0 < x \leq t_o$, используя (2.2.19)

$$y_x(\gamma) = \begin{cases} \sqrt{(1-\gamma) \cdot t_m \cdot t_o + \gamma \cdot x^2} - x, & \frac{t_o \cdot (t_m - t_o)}{t_m \cdot t_o - x^2} \leq \gamma < 1 \\ t_m - x - \sqrt{\frac{\gamma \cdot (t_m \cdot t_o - x^2) \cdot (t_m - t_o)}{t_o}}, & 0 < \gamma < \frac{t_o \cdot (t_m - t_o)}{t_m \cdot t_o - x^2} \end{cases}; \quad (2.2.23)$$

б) $t_o < x < t_m$, используя (2.2.20)

$$y_x(\gamma) = (t_m - x) \cdot (1 - \sqrt{\gamma}). \quad (2.2.24)$$

При $x=t_o$ в формуле (2.2.23) надо использовать нижнее выражение или пользоваться формулой (2.2.24).

2.2.2. Численные алгоритмы вычисления показателей надежности рельсовых креплений

В работах [88-92] создан численный подход к вычислению показателей надежности по результатам имитационного (компьютерного) моделирования. Применим его для треугольного распределения и найдем численные алгоритмы вычисления показателей надежности.

Для этого, используя алгоритм (2.2.11), получим выборку наработок объемом n , максимальное выборочное значение обозначим b . Далее сгруппируем ее по J интервалов; длина интервала и узлы равны

$$\Delta t = b/J; \quad t_j = j \cdot \Delta t, \quad j = \overline{1, J}, \quad t_0 = 0; \quad t_J = b. \quad (2.2.25)$$

Введем следующие обозначения: n_j – частоты или число выборочных значений наработок, попавших в интервал (t_{j-1}, t_j) , их сумма $\sum_{j=1}^J n_j = n$, n – объ-

ем выборки; $m_j = \sum_{i=1}^j n_i / n$ – накопленные относительные частоты, последнее значение $m_J = 1$.

Обратная величина относительных частот равна

$$k_j = 1 - m_j; \quad j = 1, \dots, J, \quad k_0 = 1. \quad (2.2.26)$$

При создании численной вероятности безотказной работы используется аппроксимация отрезками прямых, которые соединяют точки с координатами (t_j, k_j) . Учитывая значение величины (2.2.26), получим

$$P_r(t) = \begin{cases} 0, & t \geq t_m \\ k_{j-1} + (t - t_{j-1})(k_j - k_{j-1}) \frac{J}{t_m}, & 0 \leq t < t_m, \\ 1, & t < 0 \end{cases} \quad (2.2.27)$$

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

Используя модель (2.2.27) и рекомендации работ [89, 92], найдем следующие показатели надежности:

а) численная средняя наработка до отказа

$$\bar{t}_r = \int_0^{t_m} P_r(t) dt = \frac{t_m}{J} (0,5 + \sum_{j=1}^J k_j); \quad (2.2.28)$$

б) численный гамма-процентный ресурс до отказа

$$t_r(\gamma) = t_{j-1} + \frac{(\gamma - k_{j-1})}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{t_m}{J}, \quad (2.2.29)$$

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

Статистическая вероятность безотказной работы для остаточного ресурса (2.1.7) равна

$$P_x^c(y) = p_j(i) = k_{j+i} / k_j, \quad p_j(0) = 1, \quad (2.2.30)$$

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 численная вероятность безотказной работы для остаточного ресурса с учетом (2.2.30) равна

$$P_x^r(y) = \begin{cases} 0, & y \geq t_m - x \\ p_j(i-1) + \frac{(y - t_{i-1})(p_j(i) - p_j(i-1)) \cdot J}{t_m}, & \\ 1, & y < 0 \end{cases} \quad (2.2.31)$$

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

Используя модель (2.2.31) и рекомендации работ [89, 92], найдем следующие показатели надежности:

а) численный средний остаточный ресурс до отказа

$$\tilde{y}_x = \frac{t_m}{J} \left[0,5 + \sum_{i=1}^{J-j} p_j(i) \right]; \quad (2.2.32)$$

б) численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа

$$\tilde{y}_j(\gamma) = t_{i-1} + \frac{(\gamma - p_j(i-1))}{p_j(i) - p_j(i-1)} \cdot \frac{t_m}{J}, \quad (2.2.33)$$

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

Зная накопленные относительные частоты, полученные по результатам компьютерного моделирования, найдем численную функцию распределения

$$F_r(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ m_{j-1} + (t - t_{j-1})(m_j - m_{j-1})J / t_m, & 0 \leq t < t_m, \\ 1, & t \geq t_m \end{cases} \quad (2.2.34)$$

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

Далее, используя (2.2.34), решим уравнение (2.2.10) и найдем численный алгоритм моделирования случайной величины

$$t = t_{j-1} + \frac{r - m_{j-1}}{m_j - m_{j-1}} \cdot \frac{t_m}{J}, \quad 0 \leq t < t_m, \quad (2.2.35)$$

где $m_{j-1} \leq r < m_j$, $j = \overline{1, J}$.

Учитывая, что $F_r(t) + P_r(t) = 1$, численный алгоритм (2.2.35) можно представить через величины (2.2.26)

$$t = t_{j-1} + \frac{(r - k_{j-1})}{k_j - k_{j-1}} \cdot \frac{t_m}{J}, \quad (2.2.36)$$

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

Подчеркнем, что алгоритм (2.2.35) или (2.2.36) можно использовать не зная аналитическое значение функции распределения наработки объекта.

Проведем тестирование моделей (2.2.35) и (2.2.36):

1. Используя алгоритм (2.2.11) для треугольного распределения при $t_m=11$ и $t_o=4$, получим выборку объема 20000;
2. Найдем по этой выборке (выборка №1) точечные оценки числовых характеристик и доверительный интервал для математического ожидания (2.2.13);

$$\tilde{t} = 4,997; \tilde{k}_v = 0,454; s = 2,2702; (t_1; t_2) = (4,966; 5,028); \quad (2.2.37)$$

3. Группируя эту выборку, получим накопленные относительные частоты m_j и обратные к ним величины (2.2.26) k_j , число интервалов $J=22$;
4. Получим по алгоритмам (2.2.35) и (2.2.36) две выборки: выборку №2 и выборку №3, соответственно. Объем каждой выборки 20000;
5. Найдем по этим выборкам точечные оценки числовых характеристик и доверительный интервал для математического ожидания (2.2.13).

Выборка №2:

$$\tilde{t} = 4,996; \tilde{k}_v = 0,455; s = 2,273; (t_1; t_2) = (4,964; 5,027); \quad (2.2.38)$$

Выборка №3:

$$\tilde{t} = 5,021; \tilde{k}_v = 0,456; s = 2,290; (t_1; t_2) = (4,989; 5,053). \quad (2.2.39)$$

Значение математического ожидания ($\bar{t} = 5$) попало во все доверительные интервалы: (2.2.37), (2.2.38), (2.2.39), а коэффициент вариации ($k_v = 0,455$) близок к своим оценкам: (2.2.37), (2.2.38), (2.2.39).

На рисунке 2.7 приведена гистограмма частот для выборки № 3. Она хорошо напоминает треугольное распределение. Это указывает на высокое качество моделей (2.2.35) и (2.2.36) для имитационного моделирования.

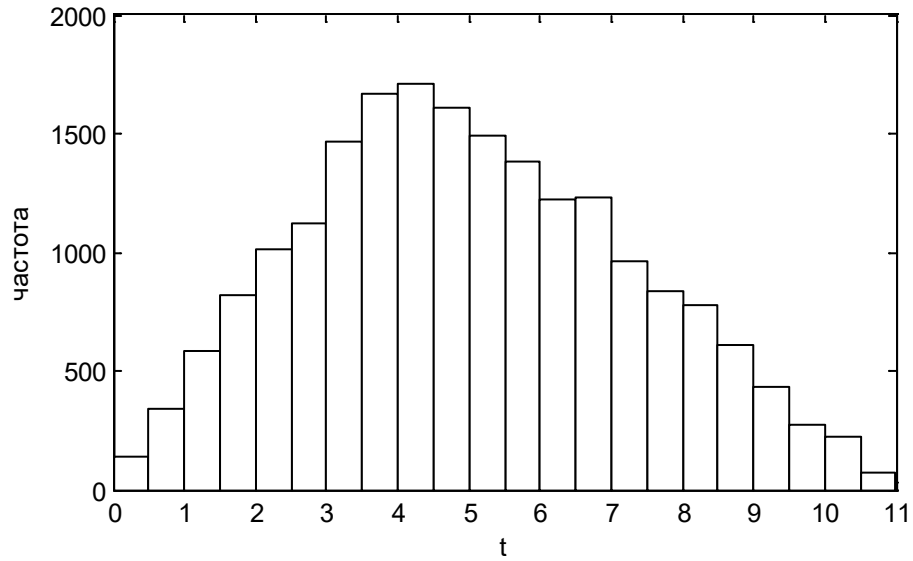


Рис. 2.7. Гистограмма частот для выборки № 3

Численная интенсивность отказов

В цитируемых работах [88-92] речь шла о восстанавливаемых объектах. В данном исследовании речь идет о невосстанавливаемых объектах. В этом случае важное значение имеет интенсивность отказов (2.1.2). Найдем численную интенсивность отказов по результатам имитационного моделирования. Для этого найдем ее значения в узлах

$$\omega_j = \frac{n_j}{n \cdot \Delta t \cdot k_j} = \frac{k_{j-1} - k_j}{\Delta t \cdot k_j}, \quad j = 1, \dots, J-1; \quad \omega_0 = 0. \quad (2.2.40)$$

Узлы (2.2.40) получаются исходя из формулы интенсивности отказов (2.1.2). Численную интенсивность отказов получим как совокупность отрезков прямых, соединяющих точки (t_j, ω_j) с учетом (2.2.40) и (2.2.25)

$$\lambda_r(t) = \omega_{j-1} + (t - t_{j-1})(\omega_j - \omega_{j-1})J/t_m, \quad 0 < t < t_m, \quad (2.2.41)$$

где $t_{j-1} \leq t < t_j$, $j = 1, \dots, J-1$. При значениях t близких к t_m интенсивность отказов стремится к бесконечности.

В таблице 2.2 приведены значения численной интенсивности отказов (2.2.41) при $t_m=11$ и $t_o=4$.

Таблица 2.2

Значения численной интенсивностей отказов

t	$\lambda_r(t)$	t	$\lambda_r(t)$
0,00	0,0000	5,50	0,3703
0,25	0,0056	5,75	0,3900
0,50	0,0169	6,00	0,4072
0,75	0,0279	6,25	0,4273
1,00	0,0417	6,50	0,4228
1,25	0,0478	6,75	0,4709
1,50	0,0652	7,00	0,5043
1,75	0,0807	7,25	0,5446
2,00	0,0999	7,50	0,5884
2,25	0,1150	7,75	0,6473
2,50	0,1259	8,00	0,6492
2,75	0,1525	8,25	0,7726
3,00	0,1725	8,50	0,8963
3,25	0,1919	8,75	0,9655
3,50	0,2203	9,00	1,0192
3,75	0,2495	9,25	1,2393
4,00	0,2834	9,50	1,6113
4,25	0,3099	9,75	1,6600
4,50	0,3110	10,00	2,2745
4,75	0,3325	10,25	3,6119
5,00	0,3513	10,50	5,4035
5,25	0,3380	10,75	10,2123

Сравнивая теоретические значения интенсивности отказов (табл. 2.1) с численными значениями (табл.2.2), можно констатировать, что наблюдается хорошее совпадение.

2.2.3. Нечеткий численный анализ для оценки показателей надежности рельсовых скреплений

Как уже отмечалось выше, второй тип неопределенности приводит к тому, что на практике не удастся однозначно описать наработку как случайную величину, какие-то ее параметры могут быть нечеткими. В данном исследовании предлагается нечеткий численный анализ с привлечением имитационного моделирования, как развитие работы [92] и результатов параграфов 2.2.1 и 2.2.2. Результаты этого параграфа являются важным научным положением диссертационной работы.

При исследовании неопределенности второго типа с использованием треугольного распределения (2.2.2) 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 (моду t_o) наработки случайной величиной, равномерно распределенной на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации.

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

$$a = \bar{t} \cdot (1 - \sqrt{3} \cdot k_r); \quad b = \bar{t} \cdot (1 + \sqrt{3} \cdot k_r). \quad (2.2.42)$$

Алгоритм моделирования значений случайной величины, имеющей равномерное распределение, имеет следующий вид

$$t=a + (b - a) \cdot r, \quad (2.2.43)$$

где r – значение псевдослучайной величины, равномерно распределенной на интервале $(0, 1)$.

Вариант МО

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 определяется по формуле (2.2.3) (предполагаемое значение моды экспертно задается), а коэффициент вариации также назначается экспертным путем.

При варианте МО для нечеткого численного анализа с привлечением имитационного моделирования предлагается следующий алгоритм создания выборки наработок (алгоритм МО) (рис. 2.8):

1. Зная математическое ожидание $(\bar{t})$ математического ожидания наработки как случайной величины и коэффициент ее вариации (k_r) , по формуле (2.2.42) определяем диапазон изменения (a, b) ;

2. По формуле (2.2.43) определяем выборочное значение математического ожидания наработки как случайной величины (t_{Mq}) ;

3. Методом моментов из формулы (2.2.3) получаем значение моды

$$t_{oq}=3 \cdot t_{Mq} - t_m; \quad (2.2.44)$$

4. По формуле (2.2.11) определяем выборочное значение наработки (t_q) ;

5. Пункты 2, 3, 4 повторяем n раз, в результате чего создается искомая выборка объема n значений наработок

$$T_n=(t_1, t_2, \dots, t_q, \dots, t_n). \quad (2.2.45)$$

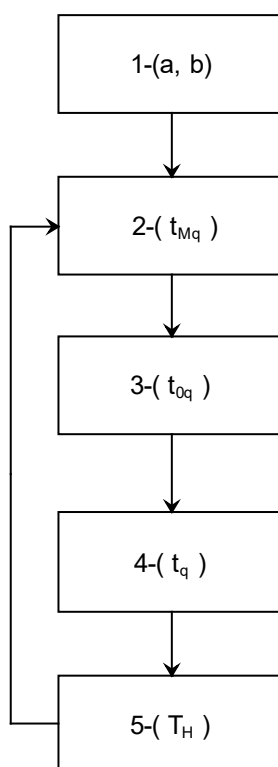


Рис. 2.8. Блок-схема алгоритма МО

В дальнейшем выборка (2.2.45) обрабатывается аналогичным образом, как это осуществлялось при неопределенности первого типа.

Проведем исследование варианта МО при $t_0 = 4$; $t_m = 11$; $\bar{t} = 5$; $k_r = 0,15$; $a = 3,701$; $b = 6,299$.

На рисунке 2.9 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 2.4, полученной для треугольного распределения с теми же параметрами. Отличие связано с тем, что в данном случае (рис. 2.6) выборка (2.2.45) получена в предположении, что математическое ожидание оценивается нечетко и является случайной величиной.

Точечная и интервальная оценки (2.2.13) для этого случая равны

$$\tilde{t} = 5,012; (t_1; t_2) = (4,978; 5,046), \quad (2.2.46)$$

а оценка коэффициента вариации равна

$$\tilde{k}_v = 0,489. \quad (2.2.47)$$

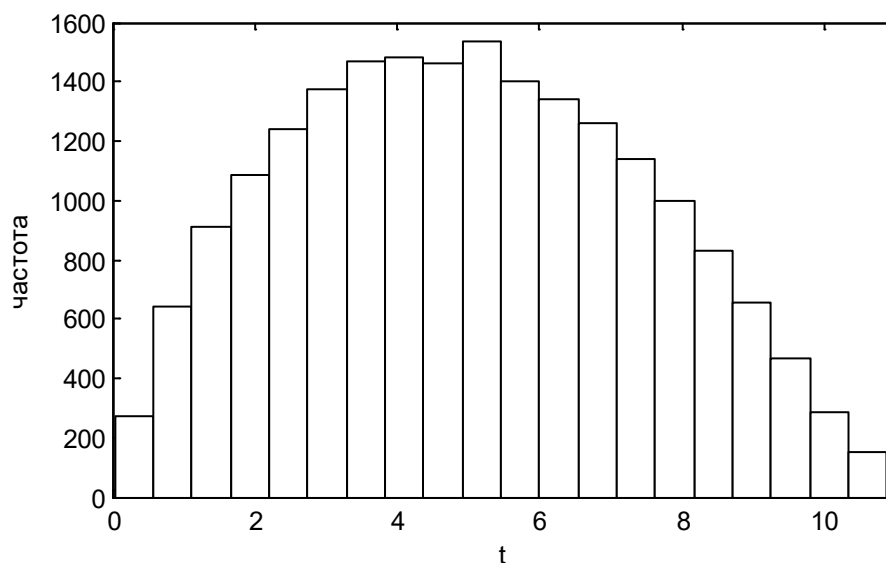


Рис. 2.9. Гистограмма частот для наработки, вариант МО

Математическое ожидание $\bar{t} = 5$ попало в доверительный интервал (2.2.46). Это позволяет сделать вывод о том, что нечеткость математического ожидания не существенно влияет на математическое ожидание наработки. Но нечеткость математического ожидания существенно влияет на коэффициент вариации наработки, он заметно увеличивается: для треугольного распределения он равен 0,455 (2.2.12), а стал 0,489 (2.2.47).

Вариант МД

Пусть для треугольного распределения известно максимальное значение (t_m), а его мода (t_o) четко не определена и имеет равномерное распределение с известными значениями математического ожидания ($\bar{t}_o$) и коэффициента вариации (k_r). При этом математическое ожидание определяется методом моментов из формулы (2.2.3) по выбранному экспертами математическому ожиданию наработки, а коэффициент вариации назначается экспертным путем.

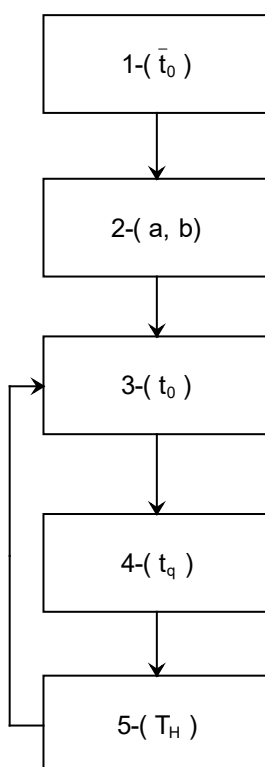


Рис. 2.10. Блок-схема алгоритма МД

При варианте МД для нечеткого численного анализа с привлечением имитационного моделирования предлагается следующий алгоритм создания выборки наработок (алгоритм МД) (рис. 2.10):

1. Зная математическое ожидание ($\bar{t}$) наработки методом моментов из формулы (2.2.3) получаем значение математического ожидания моды

$$\bar{t}_o = 3 \cdot \bar{t} - t_m; \quad (2.2.48)$$

2. Зная значение математического ожидания моды (2.2.48) как случайной величины и коэффициент ее вариации (k_r), по формуле 2.2.42) определяем диапазон изменения (a, b);

3. По формуле (2.2.43) определяем выборочное значение моды наработки как случайной величины (t_o);

4. По формуле (2.2.11) определяем выборочное значение наработки (t_q);

5. Пункты 3, 4 повторяем n раз, в результате чего создается искомая выборка объема n значений наработок (2.2.45), которая обрабатывается аналогично варианту МО.

Подчеркнем, что основное отличие варианта МО от варианта МД заключается в получении значения параметра t_o , используемого в алгоритме (2.2.11).

На рисунке 2.11 приведена гистограмма частот, полученная в результате компьютерного моделирования по алгоритму МД при $\bar{t}=5$, $t_m=11$, объем выборки $n=20000$, коэффициент вариации для моды $k_r=0,15$, диапазон изменения моды (2,961; 5,039). Данная гистограмма отличается и от гистограммы на рисунке 2.4, полученной для треугольного распределения с теми же параметрами, и от гистограммы на рисунке 2.6, полученной по алгоритму МО. Отличие связано с тем, что в данном случае (рис. 2.9) выборка (2.2.45) получена в предположении, что мода оценивается нечетко и является случайной величиной.

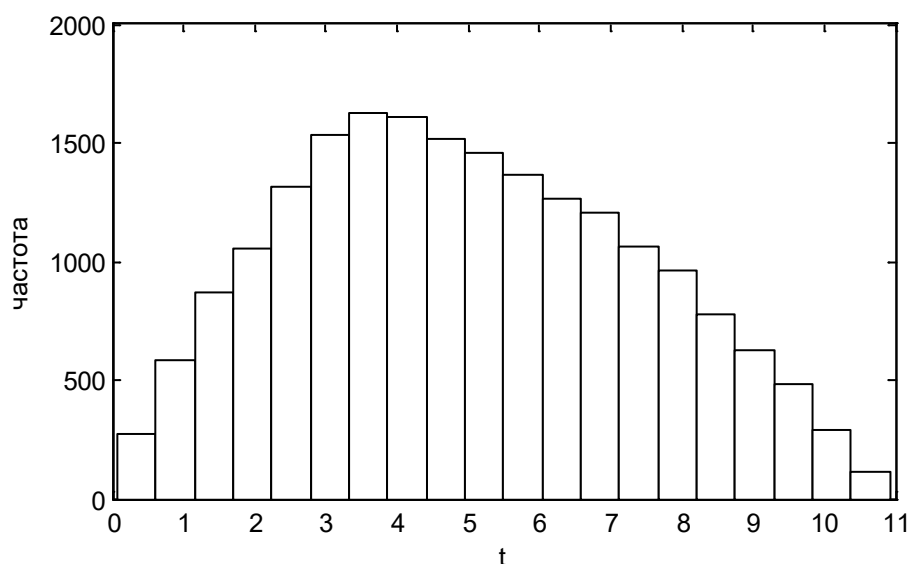


Рис. 2.11. Гистограмма частот для наработки, вариант МД, $k_r=0,15$

Точечная и интервальная оценки (2.2.13) для этого случая равны

$$\tilde{t} = 4,993; (t_1; t_2) = (4,959; 5,027), \quad (2.2.49)$$

а оценка коэффициента вариации равна

$$\tilde{k}_v = 0,485. \quad (2.2.50)$$

Математическое ожидание $\bar{t} = 5$ попало в доверительный интервал (2.2.49). Это позволяет сделать вывод о том, что нечеткость моды не существенно влияет на математическое ожидание наработки. Но нечеткость моды существенно влияет на коэффициент вариации наработки, он заметно увеличивается: для треугольного распределения он равен 0,455 (2.2.12), а стал 0,485 (2.2.50).

На рисунке 2.12 приведена гистограмма частот, полученная в результате компьютерного моделирования по алгоритму МД, объем выборки $n=20000$, коэффициент вариации для моды $k_r=0,50$, диапазон изменения моды (0,536; 7,464).

Данная гистограмма отличается и от гистограммы на рисунке 2.4, полученной для треугольного распределения с теми же параметрами, и от гистограммы на рисунке 2.11, полученной по алгоритму МД при $k_r=0,15$. В первом случае отличие связано с тем, что выборка (2.2.45) получена в предположении, что мода оценивается нечетко и является случайной величиной, а во втором случае отличие связано с более высоким значением коэффициента вариации этой величины.

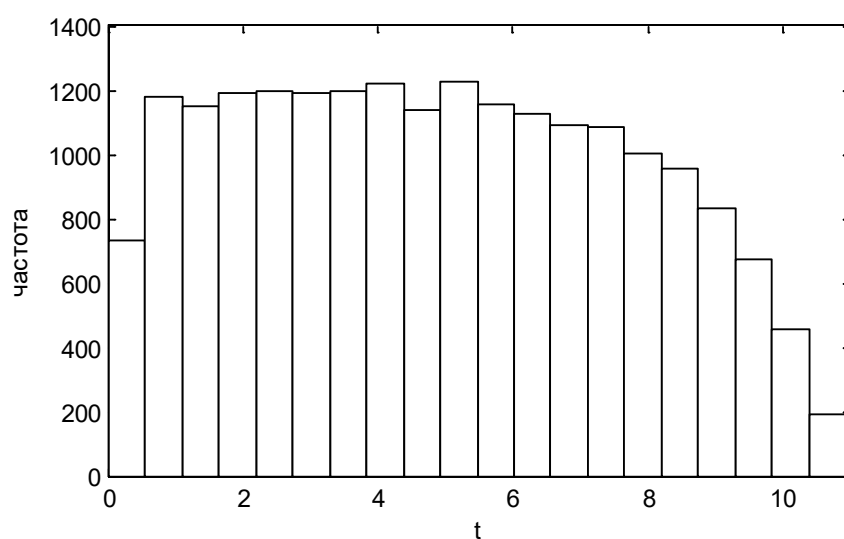


Рис. 2.12. Гистограмма частот для наработки, вариант МД, $k_r=0,50$

Точечная и интервальная оценки (2.2.13) для этого случая равны

$$\tilde{t} = 4,922; (t_1; t_2) = (4,883; 4,961), \quad (2.2.51)$$

а оценка коэффициента вариации равна

$$\tilde{k}_v = 0,568. \quad (2.2.52)$$

Математическое ожидание $\tilde{t} = 5$ не попало в доверительный интервал (2.2.51). Это позволяет сделать вывод о том, что нечеткость моды при увеличении значения коэффициента вариации существенно влияет на математическое ожидание наработки. При этом нечеткость моды очень существенно влияет на коэффициент вариации наработки, он заметно увеличивается: для варианта МД, но при $k_r=0,15$ $\tilde{k}_v = 0,485$ (2.2.50), а при $k_r=0,50$ $\tilde{k}_v = 0,568$ (2.2.52).

Численные показатели надежности при нечетком вероятностном анализе вычисляются по моделям (2.2.27)-(2.2.33), но при этом используется выборка (2.2.45). Влияние нечеткости моды на численные показатели надежности рельсового скрепления будет показана в главе 3.

Подводя итоги относительно предложенного нечеткого численного анализа для вычисления показателей надежности выделим следующие положения, полученные в результате исследования треугольного распределения (2.2.2):

1. В том случае, когда в условиях неопределенности не удастся однозначно описать наработку как случайную величину, какие-то ее параметры могут стать нечеткими. Применительно к треугольному распределению таким параметром является мода (t_o);

2. Нечеткость моды предложено описывать двумя способами:

- а) мода описывается как мода, имеющая равномерное распределение на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации. Эти числовые характеристики вычисляются экспертно. В этом случае нечеткий численный анализ при создании выборочных значений (2.2.45) использует алгоритм МД (рис. 2.10);

б) мода описывается через математическое ожидание наработки, имеющее равномерное распределение на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации. В этом случае по методу моментов нужно связать моду и математическое ожидание наработки (2.2.44), а при создании выборочных значений (2.2.45) использовать алгоритм МО (рис. 2.8);

3. Нечеткое описание наработки как случайной величины оказывает влияние на гистограмму частот (рис. 2.4, рис. 2.9, рис. 2.11 и рис. 2.12), а значит и на показатели надежности рельсового скрепления. Эти исследования будут приведены в главе 3.

2.3. Прогнозирование остаточного ресурса рельсов по их боковому износу

2.3.1. Технологии и модели регрессионного анализа

Покажем связь между алгоритмическим обеспечением оценки показателей надежности, описанного в предыдущем параграфе, и прогнозированием остаточного ресурса рельсов на основе регрессионного анализа, приведенном в этом параграфе.

В теории надежности выделяют внезапные и постепенные отказы. Внезапный отказ приводит к фактическому отказу объекта, а сам отказ происходит неожиданно, т. е. перед этим отказом не удастся обнаружить изменения показателей объекта.

Постепенные или параметрические отказы характеризуются конкретным параметром, значения которого изменяются во времени ($y(t)$). Отказом является достижение параметра некоторого предельного значения. Фактически объект может еще функционировать какое-то время, но нормативно это не желательно.

Параметры, которые измеряются диагностическим вагоном (боковой износ, ширина колеи), изменяются во времени ($y(t)$) и могут аппроксимироваться регрессионной зависимостью, которую можно использовать для прогнозирования будущих значений.

В общем случае технология реализации задачи прогнозирования содержит несколько этапов:

1) выбор параметров технического состояния, прогнозирование которых требуется провести. В нашем случае это боковой износ (средний или максимальный), ширина колеи (минимальная или максимальная) и другие параметры, которые измеряются диагностическим вагоном «Декарт» в результате мониторинга железнодорожного пути. В результате многократного мониторинга происходит накопление измеренных значений (формируется временной ряд по каждому показателю);

2) выбор (подбор, обоснование) прогнозных моделей (функций), аппроксимирующих значения параметров технического состояния;

3) выбор метода оценки параметров выбранных моделей (как правило метод наименьших квадратов);

4) проверка адекватности полученных прогнозных моделей по различным критериям (F -статистика, Дарбина-Уотсона, оценка дисперсии ошибки и другие) [42, 43, 47, 58];

5) проведение прогнозирования параметров технического состояния, построение доверительных интервалов, определение остаточного ресурса.

Применим данную технологию применительно к оценке остаточного ресурса рельсов по их боковому износу.

Диагностический вагон «Декарт» на УБЖД работает достаточно не давно, поэтому временные ряды по параметрам технического состояния достаточно короткие. Это определило выбор типов прогнозных моделей, выбраны функции, которые после преобразований можно считать линейными относительно параметров [35].

В работе, используя результаты анализа, приведенные в параграфе 1.4, рекомендованы три функции:

$$1) \quad \text{полиномиальная} \quad (2.3.1)$$

$$y(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_m t^m ;$$

$$2) \quad \text{экспоненциальная} \quad (2.3.2)$$

$$y(t) = ab^t ;$$

$$3) \quad \text{в виде логарифмической параболы} \quad (2.3.3)$$

$$y(t) = ab^t c^{t^2} .$$

Функции (2.3.2) или (2.3.3) логарифмированием сводится к полиному первой или второй степени.

Для определения значений параметров этих моделей выбран метод наименьших квадратов, когда минимизируется функция [2, 53, 111, 126]

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ip})^2. \quad (2.3.4)$$

Здесь y_i – значения параметра технического состояния для времени t_i , полученные в результате мониторинга железнодорожного пути (например, боковой износ); y_{ip} – расчетные значения для времени t_i , полученные по моделям (2.3.1)-(2.3.3), $y_{ip}=y(t_i)$; n – длина временного ряда.

Минимизация функции (2.3.4) при использовании линейных функций относительно параметров, сводится к решению системы линейных уравнений.

Метод наименьших квадратов можно записать в матричной форме [53, 111]

$$A = (E^T E)^{-1} (E^T Y),$$

где E – матрица значений факторов; E^T – транспонированная матрица E ; (-1) – операция вычисления обратной матрицы; A – искомый вектор параметров прогнозной модели; Y – вектор значений параметра технического состояния.

Проверка статистических гипотез

Качество полученной прогнозной модели зависит от выполнимости предпосылок регрессионного анализа, важнейшей из которых является нормальность результатов мониторинга. Для решения этой задачи необходимо проверить гипотезу [2, 53, 59]

$$H_0: F_o(x) = F_e(x). \quad (2.3.5)$$

Здесь $F_e(x)$ – эмпирическая функция распределения, полученная по результатам мониторинга; $F_o(x)$ – искомая функция распределения (в нашем случае нормальное распределение).

Далее выбирается статистика (критерий согласия). На практике часто используется либо критерий согласия χ^2 [2, 126], для которого требуется достаточно большой объем данных, либо модифицированный критерий Колмогорова [51, 53]. Расчетное значение статистики сравнивается с критическим значением, зависящим от уровня значимости. Исходя из результата сравнения, выбирается основная (2.3.5) или противоположная гипотеза.

Так как в нашем случае объем измерений небольшой, выберем модифицированный критерий Колмогорова и критерий Шапиро-Уилка [53]. Эти критерии хорошо обнаруживают отличие от нормального распределения при небольшом размере выборочных значений [47].

Критерий Колмогорова имеет вид

$$D_n = \max(D_n^+, D_n^-), \quad (2.3.6)$$

где

$$D_n^+ = \max_i [i/n - F_o(x_i)]; \quad D_n^- = \max_i [F_o(x_i) - (i-1)/n].$$

Колмогоровым доказано [51], что критерий согласия (2.3.6) хоть и зависит от объема выборочных значений n , но не зависит от искомой функции распределения $F_o(x)$ (в нашем случае нормальное распределение). При этом есть условие – параметры этой функции распределения известны, что на практике редко выполняется.

Для подобных случаев созданы модифицированные статистики и критические значения к ним, полученные методом Монте-Карло. Для нормального распределения на практике широко используется модификация Лиллиефорса [51]. В связи с этим, в работе рекомендован модифицированный критерий Колмогорова с поправкой Лиллиефорса. Для нормального распределения принимается гипотеза H_0 (2.3.10), когда

$$D_n(\sqrt{n} - 0,01 + 0,85/\sqrt{n}) < d(0,05) = 0,895. \quad (2.3.7)$$

В условии (2.3.7) $d(0,05)$ – критическое значение при уровне значимости 0,05 (можно выбирать и другие уровни значимости).

Критерий согласия Шапиро-Уилка имеет вид

$$W = b^2/s^2, \quad (2.3.8)$$

где $s^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2$, x_i – выборочные значения, $\tilde{x}$ – оценка математического ожидания, n – объем выборки; $b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1}(x_{n-i+1} - x_i)$; если n четно, то $k=n/2$; если n нечетно, то $k=(n-1)/2$; a_{n-i+1} – специальные коэффициенты [53]. Если расчетное значение (2.3.8) больше критического при выбранном уровне значимости, то выбирается основная гипотеза (2.3.5).

Критерий согласия Шапиро-Уилка считается одним из лучших для проверки гипотезы о нормальном распределении при малых выборках, когда числовые характеристики определяются по выборочным данным [53].

Статистический анализ уравнения регрессии

При прогнозировании остаточного ресурса необходимо провести статистический анализ уравнения регрессии, а именно:

а) найти оценку дисперсии ошибки [2]

$$s^2 = \frac{1}{n-p} \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ip})^2. \quad (2.3.9)$$

Здесь y_i – значения параметра технического состояния для времени t_i , полученные в результате мониторинга железнодорожного пути; y_{ip} – расчетные значения для времени t_i , полученные по моделям (2.3.1)-(2.3.3); n – длина

временного ряда; p – число параметров прогнозной модели для параметра технического состояния, например, у параболы (2.3.2) $p=3$;

б) найти значение F -статистики Фишера

$$F = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^n (y_c - y_{ip})^2 / s^2. \quad (2.3.10)$$

Здесь y_c – среднее значение измеренных значений параметра технического состояния; s^2 – оценка (2.3.9). Необходимо, чтобы расчетное значение (2.3.10) 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. Критическое значение находится по таблицам F -распределения;

в) найти оценку дисперсии для прогнозного по модели значения в момент времени t_k

$$s_k^2 = s^2(1/n + (t_k - t_c) / \sum_{i=1}^n (y_i - y_{ip})^2), \quad (2.3.11)$$

где t_c – среднее значение; s^2 – оценка (2.3.9). Оценка дисперсии для прогнозного по модели значения (2.3.11) минимальна в момент времени t_c ;

г) найти верхнюю границу доверительного интервала для прогнозного по модели значения в момент времени t_k

$$h_k(t_k) = y_p(t_k) + s_k \cdot t(mt, \gamma), \quad (2.3.12)$$

где s_k – оценка среднеквадратического значения для прогнозного по модели значения в момент времени t_k (равна корню квадратному из оценки дисперсии (2.3.11)); $t(mt, \gamma)$ – квантиль (критическое значение) для t -распределения при $mt=(n-p)$ степеней свободы и доверительной вероятности γ . Необходимо учитывать, что при определении критического значения вероятность равна $(\gamma+1)/2$. Например, при $\gamma=0,95$ квантиль находится для вероятности 0,975.

Дополнительно рекомендуется находить коэффициент детерминации R^2 , который также может являться мерой оценки «качества» регрессионной модели (чем ближе коэффициент к единице, тем лучше). Заметим, что F -

критерий Фишера (2.3.10) и коэффициент детерминации R^2 связаны между собой функциональной зависимостью

$$F = \frac{R^2 / (p - 1)}{(1 - R^2) / (n - p)}. \quad (2.3.13)$$

Чтобы проверить значимость коэффициентов регрессионной модели рекомендуется использовать t -статистику [2]

$$t_j = a_j / s_j(a_j), j = 0, 1, \dots, p-1, \quad (2.3.14)$$

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. Оценки дисперсий для j -го параметра прогнозной модели являются диагональными коэффициентами матрицы ковариаций.

Если значение (2.3.14) по модулю меньше критического значения для t -распределения при $(n - p)$ степенях свободы и уровне значимости $q/2$, то коэффициент a_j незначим (его значение принимается 0).

Рассмотрим, как на основе полученной прогнозной модели находить остаточный ресурс рельсов.

2.3.2. Оценка остаточного ресурса рельсов на основе регрессионного анализа

Подчеркнем, что достижение некоторого параметра технического состояния железнодорожного пути предельного (нормативного) значения, рассматривается как параметрический отказ. Возникает задача определение остаточного ресурса рельсов относительно последней даты мониторинга.

На рисунке 2.14 представлена блок-схема алгоритма оценки остаточного ресурса рельсов по результатам их мониторинга диагностическим вагоном типа «Декарт». Дадим ее описание:

1. Результаты мониторинга (РМн) в виде временного ряда (табл. 2.3). Дата указывается с точностью до месяца, конкретный день внутри месяца не учитывается. Если в какой-то месяц будет два измерения, то выбирает-

ся любой из них (можно эти значения усреднять). Временем являются числа натурального ряда. Время $t_n=n$ – это время последнего измерения, мы будем его обозначать t_M ; y_i – результаты мониторинга, они образуют временной ряд, который используется в регрессионном анализе, единица измерения миллиметр (мм).

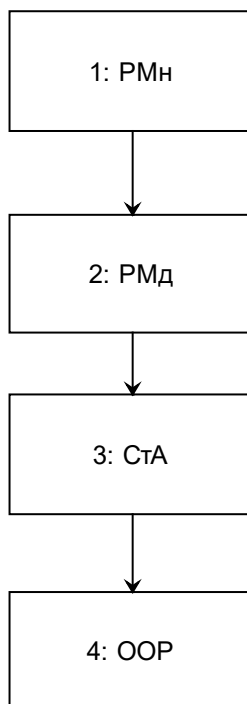


Рис. 2.14. Блок-схема алгоритма оценки остаточного ресурса рельсов по результатам их мониторинга

Таблица 2.3

Результаты мониторинга пути

Дата	Время	Значение
02.2014	$t_1=1$	y_1
03.2014	$t_2=2$	y_2
...	...	
12.2014	$t_i=i$	y_i
...		
02.2016	$t_n=n$	y_n

2. Создание регрессионной модели (РМд) по одной из рассмотренных прогнозных моделей (2.3.5)-(2.3.7). Этот вопрос рассмотрен в параграфе 2.3.1.

3. Статистический анализ (СтА) уравнения регрессии (2.3.1)-(2.3.3). Этот вопрос рассмотрен в параграфе 2.3.1.

4. Оценка остаточного ресурса рельсов (ООР).

Рассмотрим последний (4-й) этап. Предлагается остаточный ресурс рельсов оценивать двумя показателями:

- а) средним остаточным ресурсом (t_{or});
- б) гарантированным (вероятным) остаточным ресурсом (t_{og}).

Средний остаточный ресурс

$$t_{or} = [t_{oc}] - t_M, \text{ (мес.)}, \quad (2.3.15)$$

где t_{oc} – корень уравнения (2.3.20); $[\cdot]$ – операция округления до целого числа; t_M – время последнего измерения;

$$y_p(t) = y_{np}. \quad (2.3.16)$$

Здесь $y_p(t)$ – найденное и статистически проверенное уравнение регрессии (прогнозная модель), описывающая временной ряд для параметра технического состояния (бокового износа рельсов); y_{np} – нормативно установленное предельное значение. Средний остаточный ресурс является аналогом показателя (2.1.5).

Гарантированный остаточный ресурс

$$t_{og} = [h_{oc}] - t_M, \text{ (мес.)}, \quad (2.3.17)$$

где h_{oc} – корень уравнения (2.3.18); $[\cdot]$ – операция округления до целого числа; t_M – время последнего измерения;

$$h_k(t) = y_{np}. \quad (2.3.18)$$

Здесь $h_k(t)$ – верхняя граница доверительного интервала для прогнозного по модели значения (2.3.12); y_{np} – нормативно установленное предельное значение. Гарантированный остаточный ресурс обеспечивает его значение с

доверительной вероятностью γ и является аналогом гамма-процентного остаточного ресурса (2.1.6).

Подчеркнем, что и средний остаточный ресурс и гарантированный остаточный ресурс являются целыми числами, измеряемыми в месяцах.

Использование экспертной информации

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) Кроме результатов измерений диагностическим вагоном используются точечные суждения квалифицированных в предметной области экспертов. Эксперты добавляют к результатам измерений n_3 значений, по одному для каждого месяца в будущем (возможен случай, когда $n_3=1$). В этом случае время последнего измерения не изменяется, а объем измерений увеличивается

$$n = n + n_3. \quad (2.3.19)$$

При создании регрессионной модели и проведении ее статистического анализа используются новый объем данных – (2.3.19).

При использовании экспертной информации она добавляется в таблицу 2.3, как статистическая. Целесообразность помимо статистической использовать дополнительно экспертную информацию, обосновано в параграфе 1.3. Как экспертная информация влияет на точность прогнозирования остаточного ресурса, рассмотрено в параграфе 3.3.

В общем случае корни уравнений (2.3.16) и (2.3.18) решаются численно. Для простых полиномиальных моделей уравнение (2.3.16) решаются аналитически. Так, например, для прямой (2.3.1), $m=1$,

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (2.3.20)$$

Решая уравнение (2.3.16) с учетом (2.3.20), получим

$$t_{oc} = (y_{np} - a_0) / a_1. \quad (2.3.21)$$

Программное обеспечение, реализующее предложенное алгоритмическое обеспечение, описано в параграфе 3.2.

2.4. Выводы по главе 2

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.

3. Используя результаты имитационного моделирования, предложены численные алгоритмы вычисления показателей надежности, включая вероятность безотказной работы для остаточного ресурса и интенсивность отказов.

4. Получен алгоритм моделирования выборочных значений наработок рельсовых креплений, основанный на малых по объему статистических данных. Полученный алгоритм протестирован и показал требуемую точность моделирования.

5. Предложен нечеткий численный вероятностный анализ для оценки показателей надежности рельсовых креплений 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.

6. Разработано 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 суждения квалифицированных в предметной области экспертов.

3. АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МОНИТОРИНГА И ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОМПОНЕНТОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

3.1. Исходные данные для апробации алгоритмического обеспечения мониторинга и оценки показателей надежности

*Исходные данные для оценки остаточного ресурса рельсов
по результатам мониторинга 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.

В таблице 3.1 приведено 27 значений бокового износа: БИ_{мак} – максимальные значения, мм; БИ_{ср} – средние значения, мм.

Таблица 3.1

Значения бокового износа рельсов, мм

БИ _{мак} БИ _{ср}	БИ _{мак} БИ _{ср}	БИ _{мак} БИ _{ср}
5,7 4,8	9,6 8,0	3,1 2,7
5,8 4,7	9,4 7,9	3,2 2,8
5,8 5,0	9,3 7,7	3,0 1,7
5,2 4,6	10,0 8,1	3,0 2,3
5,6 4,8	10,1 7,7	2,7 1,8
6,8 6,1	7,0 6,5	2,7 1,7
7,0 6,0	7,1 6,6	2,6 1,8
6,8 5,9	7,2 6,6	3,0 1,2
6,8 4,3	7,0 6,5	2,4 1,7

В таблице 3.2 приведены различные упорядоченные по возрастанию значения БИ_{мак}, число значений 19. В таблице 3.3 приведены различные упорядоченные по возрастанию значения БИ_{ср}, число значений 20.

Таблица 3.2

Максимальные значения бокового
износа рельсов, мм

БИ _{мак} -х	2,4	2,6	2,7	3,0	3,1
3,2	5,2	5,6	5,7	5,8	6,8
7,0	7,1	7,2	9,3	9,4	9,6
10,0	10,1				

Таблица 3.3

Средние значения бокового износа рельсов, мм

БИ _{ср} -х	1,2	1,7	1,8	2,3	2,7
2,8	4,3	4,6	4,7	4,8	5,0
5,9	6,0	6,1	6,5	6,6	7,7
7,9	8,0	8,1			

По значениям бокового износа (табл. 3.1) проведем регрессионно-корреляционный анализ между БИ_{мак}(х) и БИ_{ср}(у).

На рисунке 3.1 представлена графическая иллюстрация значений бокового износа рельсов из таблицы 3.1. По оси абсцисс отложены значения БИ_{мак}(х), а по оси ординат – БИ_{ср}(у). Используя метод наименьших квадратов, найдены оценки параметров уравнения регрессии

$$y = 0,893 \cdot x - 0,423; 2,4 \leq x \leq 10,1. \quad (3.1.1)$$

Значение F-статистики равно 474.5, что подтверждает высокую адекватность регрессионной модели (3.1.1).

Найдем оценку коэффициента корреляции между БИ_{мак}(х) и БИ_{ср}(у). Эта оценка имеет вид [2]

$$r_{xy} = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{s(x) \cdot s(y)}. \quad (3.1.2)$$

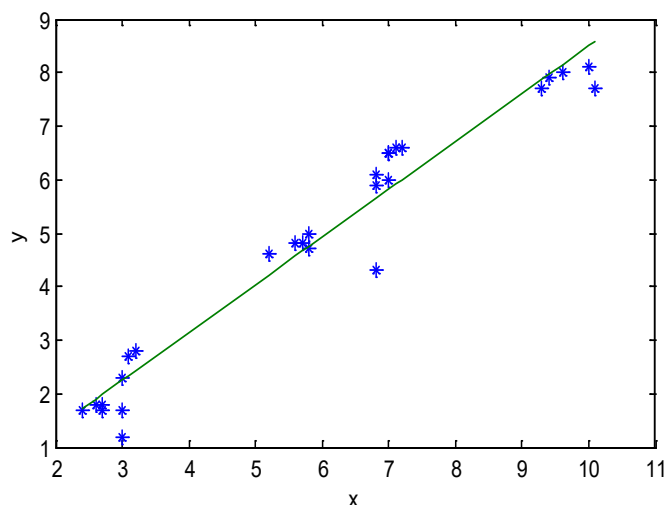


Рис. 3.1. Графическая иллюстрация значений бокового износа рельсов

Здесь переменные с чертой – оценки математического ожидания; $s(x)$, $s(y)$ – оценки среднеквадратического значения. Для данных таблицы 3.1

$$r_{xy}=0,975. \quad (3.1.3)$$

Значение (3.1.3) достаточно близко к 1, что показывает высокую коррелированность максимального и среднего значений бокового износа рельсов. Дополнительно отметим, что если коэффициент перед x в модели (3.1.1) обозначить через a , то

$$r_{xy}=a \cdot s(x)/s(y).$$

Проведем проверку гипотезы о виде функции распределения для бокового износа рельсов как случайной величины. Для этого будем использовать значения максимального и среднего бокового износа, представленные в таблицах 3.2 и 3.3. Гипотеза H_0 (2.3.9) заключается в том, что выборочные значения получены из нормальной генеральной совокупности. Это важнейшая предпосылка регрессионного анализа, используемая при создании прогнозных моделей показателей мониторинга.

В параграфе 2.3.1 для этой задачи обоснованы модифицированная статистика Колмогорова с поправкой Лиллиефрса (2.3.11) и статистика Шапиро-Уилка (2.3.12).

Модифицированная статистика Колмогорова

Для максимальных значений бокового износа рельсов (табл. 3.2), значения параметров нормального распределения (оценки математического ожидания и среднеквадратического значения) соответственно равны: 6,095; 2,728. При этих значениях величина критерия (2.3.10) равна:

$$D_{19}^{+} = 0,172; \quad D_{19}^{-} = 0,143 \Rightarrow D_n = 0,172.$$

Условие (2.3.11) при уровне значимости 0,05 выполняется, т.к.

$$D_n^{*} = 0,172 \cdot (\sqrt{19} - 0,01 + \frac{0,85}{19}) = 0,754. \quad (3.1.4)$$

Учитывая, что полученное значение модифицированной статистики Колмогорова (3.1.4) меньше критического значения ($d(0,05)=0,895$), гипотезу о нормальности генеральной совокупности максимальных значений бокового износа рельсов при уровне значимости 0,05 можно принять.

На рисунке 3.2 представлены две функции распределения: $F_o(x)$ – функция нормального распределения для вычисленных выше параметров; $F_e(x)$ – эмпирическая функция распределения (i/n). Как уже отмечено, максимальное отклонение равно 0,172.

Для средних значений бокового износа рельсов (табл. 3.3), значения параметров нормального распределения (оценки математического ожидания и среднеквадратического значения) соответственно равны: 4,935; 2,246.

При этих значениях величина критерия (2.3.10) равна:

$$D_{20}^{+} = 0,129; \quad D_{19}^{-} = 0,116 \Rightarrow D_n = 0,129.$$

Условие (2.3.11) при уровне значимости 0,05 выполняется, т.к.

$$D_n^{*} = 0,129 \cdot (\sqrt{20} - 0,01 + \frac{0,85}{20}) = 0,582. \quad (3.1.5)$$

Учитывая, что полученное значение модифицированной статистики Колмогорова (3.1.5) меньше критического значения ($d(0,05)=0,895$ [51]), ги-

потезу о нормальности генеральной совокупности средних значений бокового износа рельсов при уровне значимости 0,05 можно принять.

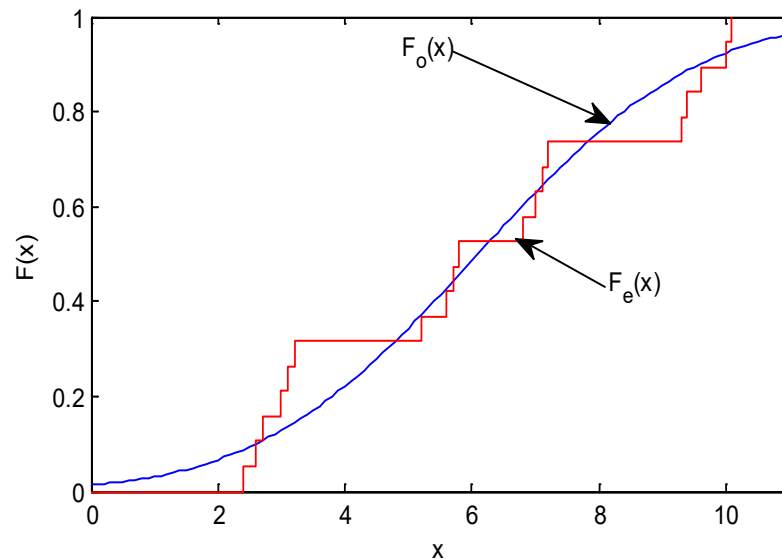


Рис. 3.2. Функции распределения для максимального бокового износа

Критерий согласия Шапиро-Уилка

В таблице 3.4 приведена информация для расчета коэффициента b (БИмак), необходимого для вычисления статистики Шапиро-Уилка (2.3.12).

Найдем значение статистики (2.3.12), используя данные таблицы 3.2:

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \frac{1}{19} \sum_{i=1}^{19} x_i = 6,095 ; \\ s^2 &= \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2 = \sum_{i=1}^{19} (x_i - 6,095)^2 = 133,929 ; \\ b &= \sum_{i=1}^9 a_{(n-i+1)} \cdot (x_{(n-i+1)} - x_i) = 11,001 \Rightarrow b^2 = 121,022 ; \\ W &= \frac{b^2}{s^2} = \frac{121,022}{133,929} = 0,904 .\end{aligned}\tag{3.1.6}$$

При объеме выборки $n=19$ и уровне значимости $\alpha=0.05$, критическое значение равно $W_\alpha = 0,901$ [53]. Это значение меньше расчетного (3.1.6), поэтому гипотезу о нормальном распределении генеральной совокупности максимальных значений бокового износа рельсов можно принять.

Проведем подобные вычисления для средних значений бокового износа рельсов (БИСр-х), мм. Эти значения представлены в таблице 3.3, объем выборки $n=20$.

Таблица 3.4

Информация для расчета коэффициента b , БИмак

i	a_{n-i+1}	$x_{n-i+1} - x_i$	$a_{n-i+1}(x_{n-i+1} - x_i)$
1	0,481	7,7	3,702
2	0,323	7,4	2,392
3	0,256	6,9	1,767
4	0,206	6,4	1,318
5	0,164	6,2	1,017
6	0,127	4,0	0,508
7	0,093	1,9	0,178
8	0,061	1,4	0,086
9	0,030	1,1	0,033
сумма			11,001

Таблица 3.5

Информация для расчета коэффициента b , БИср

i	a_{n-i+1}	$x_{n-i+1} - x_i$	$a_{n-i+1}(x_{n-i+1} - x_i)$
1	0,473	6,9	3,266
2	0,321	6,3	2,023
3	0,257	6,1	1,565
4	0,208	5,4	1,126
5	0,169	3,9	0,657
6	0,133	3,7	0,493
7	0,101	1,8	0,182
8	0,071	1,4	0,100
9	0,042	1,2	0,051
10	0,014	0,2	0,003
сумма			9,466

В таблице 3.5 приведена информация для расчета коэффициента b (БИСр), необходимого для вычисления статистики Шапиро-Уилка (2.3.12).

Найдем значение статистики (2.3.12):

$$\begin{aligned}\tilde{x} &= \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} x_i = 4,935; \\ s^2 &= \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x})^2 = \sum_{i=1}^{20} (y_i - 4,935)^2 = 95,825; \\ b &= \sum_{i=1}^{10} a_{(n-i+1)} \cdot (x_{n-i+1} - x_i) = 9,466 \Rightarrow b^2 = 89,612; \\ W &= \frac{b^2}{s^2} = \frac{89,612}{95,825} = 0,935.\end{aligned}\quad (3.1.7)$$

При объеме выборки $n=20$ и уровне значимости $\alpha=0.05$, критическое значение равно $W_\alpha = 0,905$ [53]. Это значение меньше расчетного (3.1.7), поэтому гипотезу о нормальном распределении генеральной совокупности средних значений бокового износа рельсов можно принять.

Таким образом, по обеим статистикам гипотеза о нормальности генеральной совокупности бокового износа подтвердилась.

Таблица 3.6

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

Далее экспертно были отобраны максимальные и средние боковые износы рельсов для апробации алгоритмического обеспечения прогнозирования

ния остаточного ресурса рельсов по их боковому износу. Эти значения представлены в таблице 3.6, они будут использованы в параграфе 3.3.1. Описание столбцов таблицы 3.6 приведено в параграфе 2.3.2 (табл. 2.3).

Как уже обосновывалось, для повышения точности оценки показателей остаточного ресурса, при создании прогнозных моделей, помимо результатов мониторинга пути (табл. 3.6), рекомендовано использовать дополнительно точечные суждения квалифицированных экспертов.

В таблице 3.7 представлены эти оценки, число экспертных суждений $n_3=2$. Общее число измерений (2.3.23) равно 14.

Таблица 3.7

Экспертные точечные оценки

Дата	Время	БИ _{мак} (Сц-П)	БИ _{мак} (Сц-О)	БИ _{ср} (Сц-П)	БИ _{ср} (Сц-О)
01.2016	13	10,3	10,4	8,3	8,4
02.2016	14	10,4	10,6	8,4	8,6

Эксперты рассмотрели два сценария: пессимистический, когда грузонапряженность пути в будущем не растет (Сц-П); оптимистический, когда грузонапряженность пути в будущем растет (Сц-О). Экспертные оценки (табл. 3.7) будут использованы в параграфе 3.3.2.

*Исходные данные для оценки показателей надежности
рельсовых креплений*

В качестве вероятностной модели наработки рельсовых креплений при малом числе наблюдений принято треугольное распределение (2.2.1), которое характеризуется максимальным (t_m) и наиболее вероятным (t_o) значениями.

Искомые исходные данные 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 креплений APC. Выбор этого типа

скрепления основывается на рекомендациях монгольских экспертов. Дополнительно это подтверждается рекомендациями специалистами МИИТа [66] и Дальневосточной железной дороги [74].

В работе [74] описаны опытные участки пути на ВСЖД и ДВЖД, которые расположены на самых сложных и грузонапряженных направлениях – это участок от станции Большой луг до станции Слюдянка и от станции Шкотово до станции Партизанск, а также на Тулунской и Биробиджанской дистанциях пути. Замеры параметров состояния проводятся согласно методике сравнительных эксплуатационных испытаний конструкций промежуточных рельсовых скреплений № 219 от 01.04.2015 г. Анализ и аккумуляция информации организован в центрах диагностики и мониторинга. Подобные замеры проводятся и на УБЖД на участках с малым радиусом и большой грузонапряженностью.

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:

$$t_m=11 \text{ (550 млн. ткм.)}, t_o=4 \text{ (200 млн. ткм.)}. \quad (3.1.8)$$

Следует подчеркнуть, что описываемое исследование носит методический характер и не претендует на точность оценки параметров для наработки.

3.2. Программное обеспечение для оценки остаточного ресурса рельсов

Для реализации программного обеспечения «Оценка остаточного ресурса рельсов» (ПО ООРР) выбран свободно распространяемый интерпретирующий язык программирования «R» [70, 71]. Язык программирования для статистической обработки данных «R» – это, с одной стороны, среда для проведения статистических расчетов, а с другой стороны интерпретируемый язык программирования с широким диапазоном возможностей. Данный про-

граммный продукт был создан в 1993 году, как бесплатная альтернатива с открытым исходным кодом мощного коммерческого продукта «S». Большинство американских и западноевропейских ВУЗов проводят исследования, используя именно «R». При создании данного программного продукта принимал участие канд. техн. наук Лузгин А.Н. [27].

Основными возможностями языка программирования «R» являются [71]:

- ввод и хранение данных (включая фильтрацию, нормализацию, восстановление пропущенных значений и т.п.);
- использование переменных различных типов (количественных, категориальных);
- построение таблиц, графиков, диаграмм;
- анализ данных и расчет описательных статистик (коэффициентов ковариации, корреляции т.п.);
- построение математических моделей различных типов (регрессионных, кластерных, нейронных и т.п.);
- создание объектно-ориентированного интерфейса для разработанных программ.

В настоящее время существует большое количество дополнительных пакетов расширения «R», благодаря которым данный продукт может успешно конкурировать с такими коммерческими продуктами, как, например, «MATLAB» или «STATISTICA». Более того открытые исходные коды алгоритмов позволяют исследователю видеть и понимать весь происходящий процесс от «исходного» до «конечного» результата, с возможностью оценить, скорректировать или усовершенствовать используемое алгоритмическое и математическое обеспечение.

Существуют различные оболочки для «R», облегчающие написание и отладку программ, такие как, например, пакет RCommander, RKWard, RStudio, Weka, и т.п.

Программный продукт «R» является кроссплатформенным и распространяется как для 32-битных, так и для 64-битных операционных систем.

Чрезвычайная гибкость, открытость, кроссплатформенность, скорость выполнения программ, свобода распространения и хорошая документированность делают «R» все более популярным и востребованным продуктом в научном мире.

Сравнение возможностей языка «R» с другими системами программирования приведены в работе [71]. Использование программного обеспечения на основе языка «R» применительно к интервальному прогнозированию нестационарных динамических показателей приведены в работах [70, 71].

На рисунке 3.3 приведено главное окно программы «Определение остаточного ресурса рельсов».

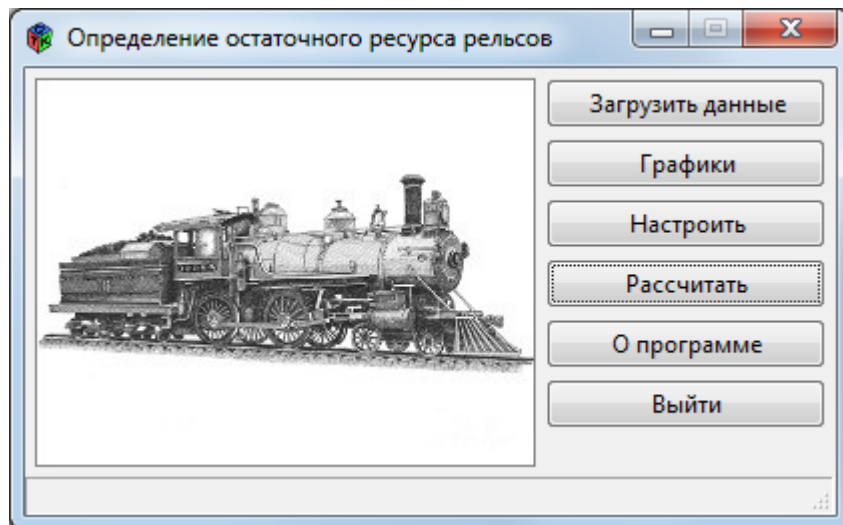


Рис. 3.3. Главное окно программы

В этом окне, используя различные «кнопки», имеется возможность загрузить данные, отобразить их в виде графиков, провести настройку программы, получить результаты и выйти из программы.

При нажатии «кнопки» «Загрузить данные» появляется окно (рис. 3.4) в котором выбирается файл с данными по участку.

Нажав кнопку «Настроить», получим новое окно, приведенное на рисунке 3.5. В этом окне можно выбрать тип прогнозной модели: (2.3.5), (2.3.6), (2.3.7); наименование прогнозного параметра (боковой износ, ширина колеи); предельное значение для параметра; при необходимости указать экспертные оценки.

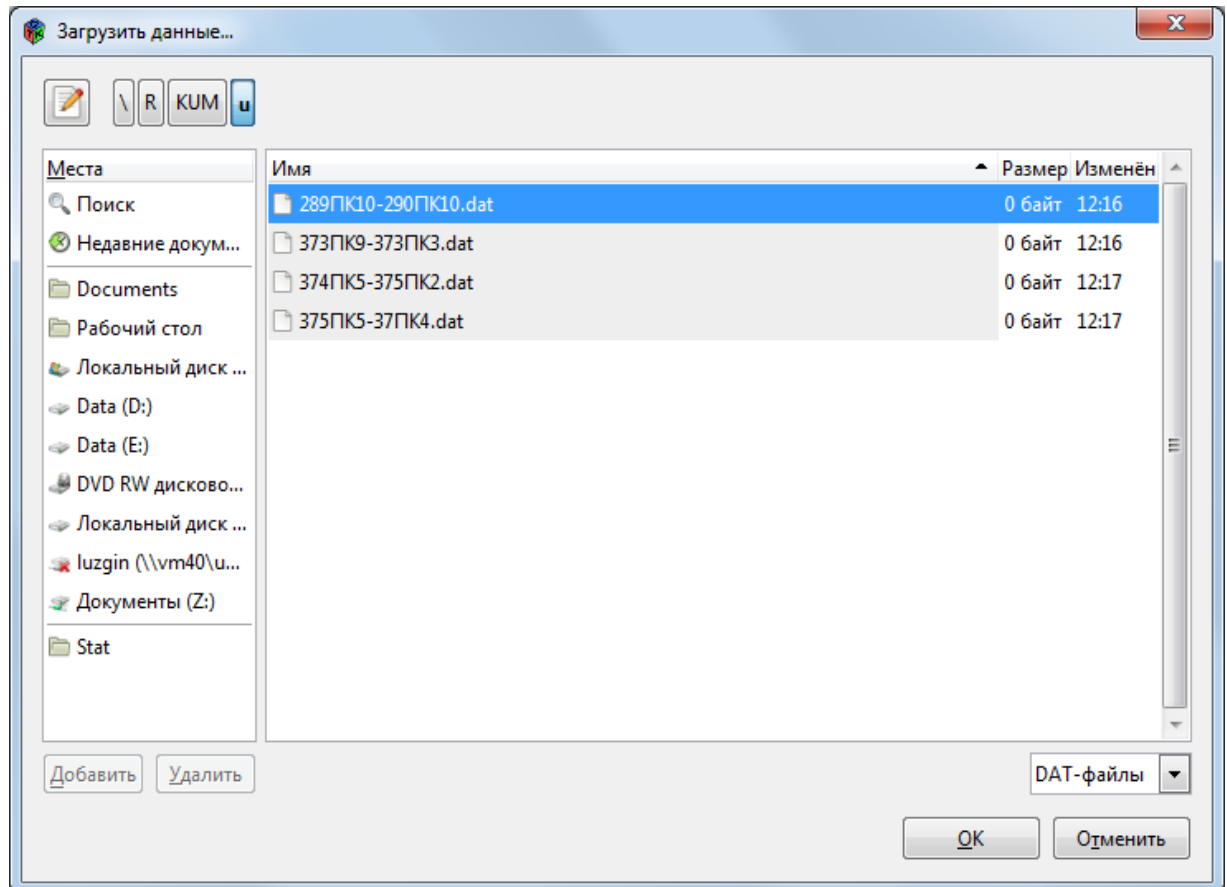


Рис. 3.4. Окно «Загрузить данные»

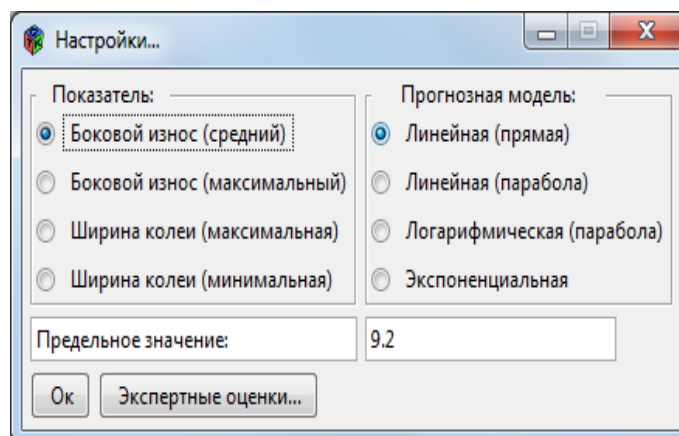
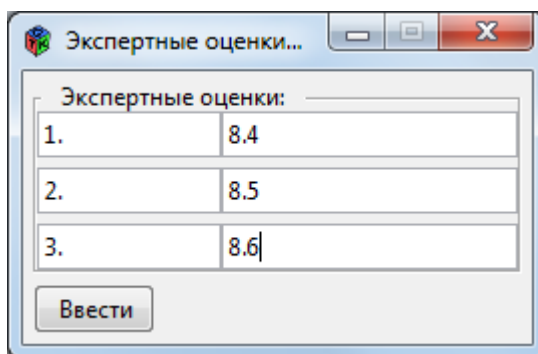


Рис. 3.5. Окно для настройки программы

Если экспертные оценки необходимы, то появится окно (рис. 3.6). Каждая экспертная оценка затем «привязывается» ко времени. Например, если последнее измерение по времени имеет номер 12, то экспертные оценки (рис. 3.6) получают номера 13, 14, 15.

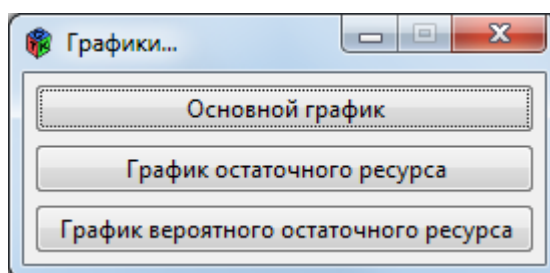


Экспертные оценки:	
1.	8.4
2.	8.5
3.	8.6

Ввести

Рис. 3.6. Окно для ввода экспертных оценок

При нажатии на кнопку «Графики» появляется окно (рис. 3.7) выбора вида графика: основной график, когда выводятся результаты мониторинга и аппроксимирующая их функция; график остаточного ресурса, когда графически показывается технология определения среднего остаточного ресурса; график вероятного остаточного ресурса, когда графически показывается технология определения вероятного остаточного ресурса.



Основной график

График остаточного ресурса

График вероятного остаточного ресурса

Рис. 3.7. Окно для выбора вида графика

Применение данного программного обеспечения рассмотрено в параграфе 3.3.

3.3. Оценка остаточного ресурса рельсов по их боковому износу

Алгоритмическое обеспечение прогнозирования остаточного ресурса рельсов приведено в параграфе 2.3. Напомним, что оно содержит две процедуры: создание прогнозной модели, адекватно аппроксимирующей результаты мониторинга пути и при необходимости экспертные оценки квалифицированных специалистов; вычисление показателей, характеризующих остаточный ресурс рельсов. Исходные данные по мониторингу пути приведены в таблице 3.6. Учитывая, что временные ряды короткие, в качестве прогнозных моделей использовались лишь прямая и парабола (2.3.1).

3.3.1. Оценка остаточного ресурса рельсов по их боковому износу по статистическим данным

Использование максимальных значений бокового износа

Предположим, что результаты мониторинга пути для БИ_{мак} можно аппроксимировать уравнением прямой:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (3.3.1)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 8,929; a_1 = 0,112. \quad (3.3.2)$$

На рисунке 3.8 приведена графическая иллюстрация исходных данных (табл. 3.6) и прогнозной модели (3.3.1) с учетом (3.3.2). Внешне прямая хорошо описывает результаты мониторинга (БИ_{мак}).

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00476;

значение F -статистики (2.3.10) – 377,2;

коэффициент детерминации R^2 – 0,974;

t -статистики для параметров (2.3.18) – 209,9 (a_0), 19,4 (a_1).

Критическое значение для F -статистики равно 5.0, поэтому значимость модели подтвердилась.

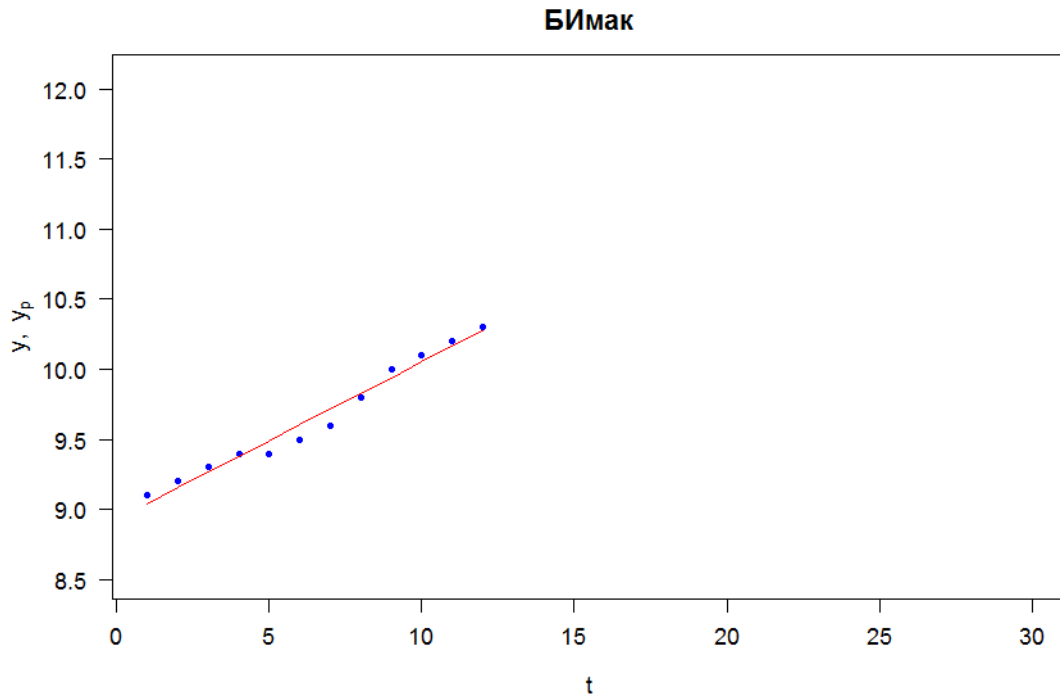


Рис. 3.8. Графическая иллюстрация, модель (3.3.1)

Критическое значение для t -статистики равно 2.3, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.19). На рисунке 3.9 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.20), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

Корень уравнения (2.3.20) $t_{oc}=18,5$ мес. Используя формулу (2.3.19) получим, что средний остаточный ресурс $t_{or}=7$ мес.

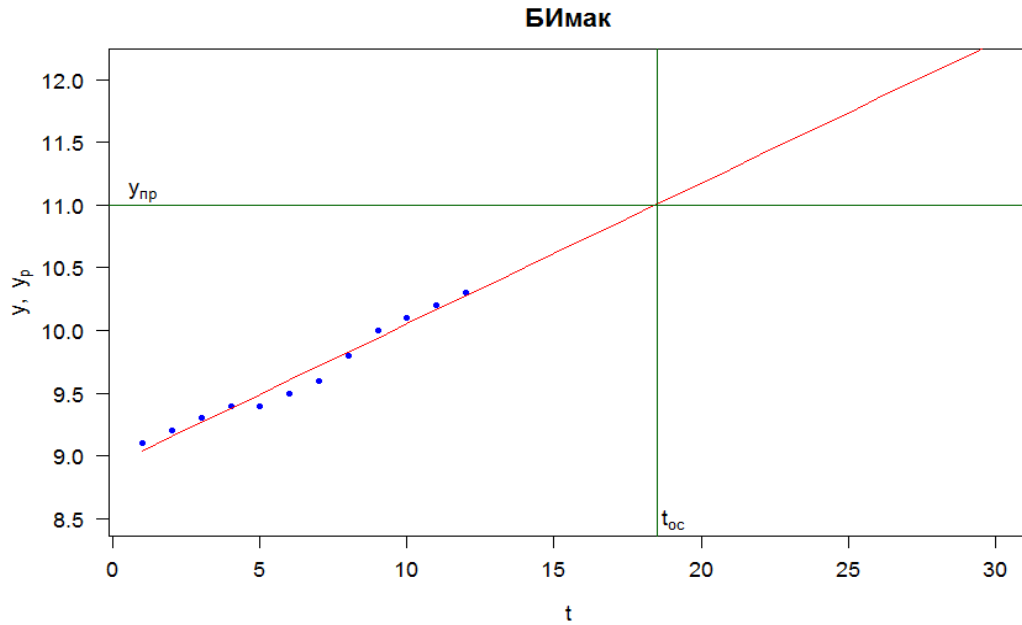


Рис. 3.9. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.1)

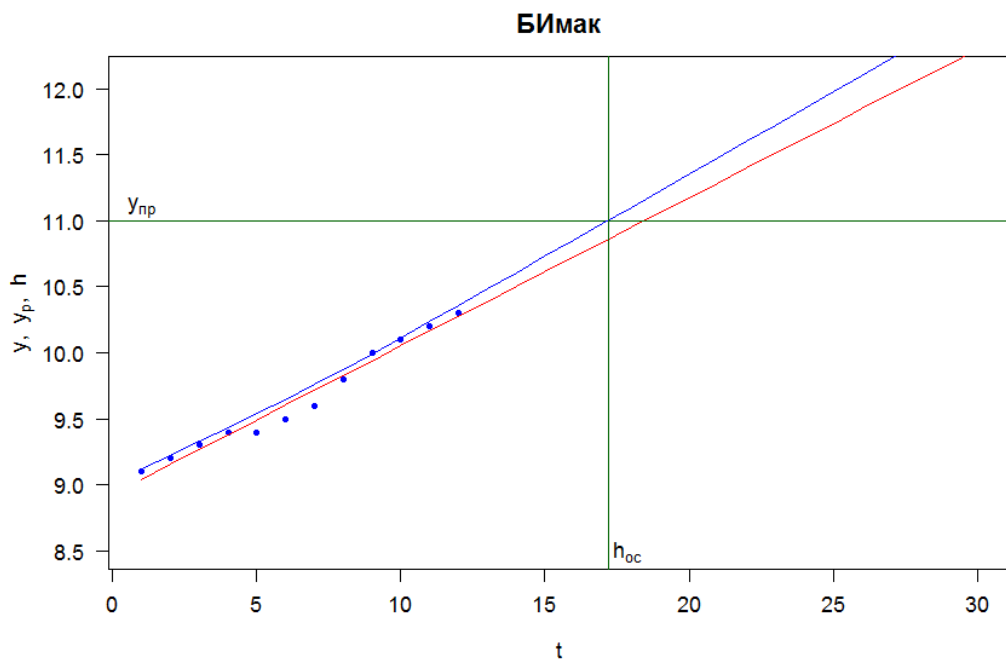


Рис. 3.10. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.1)

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.21). На рисунке 3.10 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.22), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

Корень уравнения (2.3.22) $h_{oc}=17,2$ мес. Используя формулу (2.3.21) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{og}=5$ мес.

Зная значение гарантированного остаточного ресурса по максимальному боковому износу рельсов, можно сделать вывод о том, что с вероятностью 0,95 следующее измерение диагностическим вагоном можно проводить через 5 месяцев.

Предположим, что результаты мониторинга пути можно аппроксимировать уравнением параболы:

$$y_p(t)=a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 . \quad (3.3.3)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0=9,052; a_1=0,059; a_2=0,004. \quad (3.3.4)$$

На рисунке 3.11 приведена графическая иллюстрация исходных данных (табл. 3.6) и прогнозной модели (3.3.3) с учетом (3.3.4). Внешне парабола хорошо описывает результаты мониторинга (БИмак).

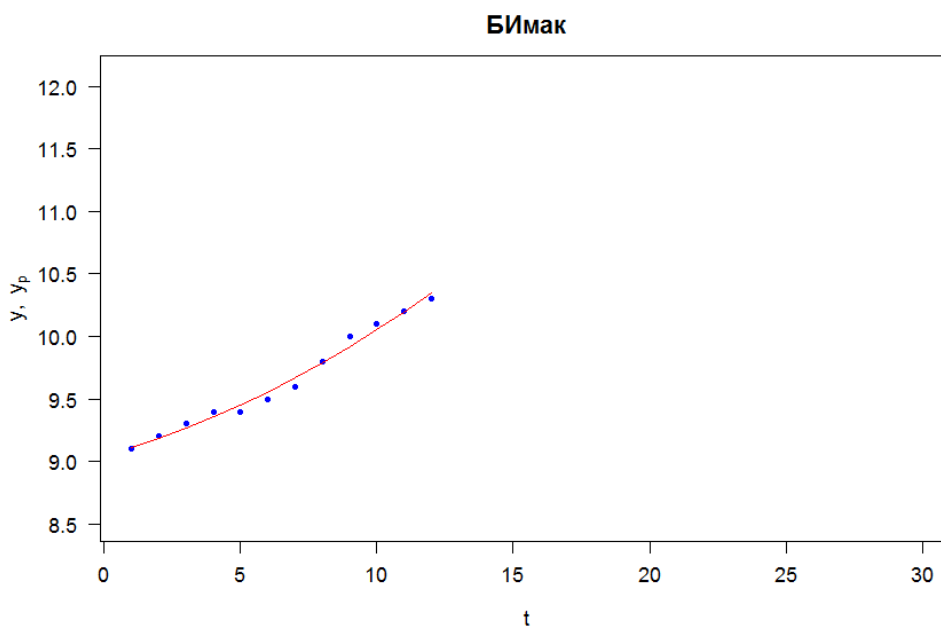


Рис. 3.11. Графическая иллюстрация, модель (3.3.3)

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.13) – 0,00281;

значение F -статистики (2.3.14) – 320,1;

коэффициент детерминации $R^2 = 0,986$;

t -статистики для параметров (2.3.14) –164,1 (a_0), 3,0 (a_1), 2,8 (a_2).

Критическое значение для F -статистики равно 4.3, поэтому значимость модели подтвердилась.

Критическое значение для t -статистики равно 2.3, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

При равных условиях на практике рекомендуется предпочтение отдать прогнозной модели с меньшей оценкой дисперсии ошибки (2.3.9). В нашем случае это парабола (3.3.3) с учетом (3.3.4).

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.15). На рисунке 3.12 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.16), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

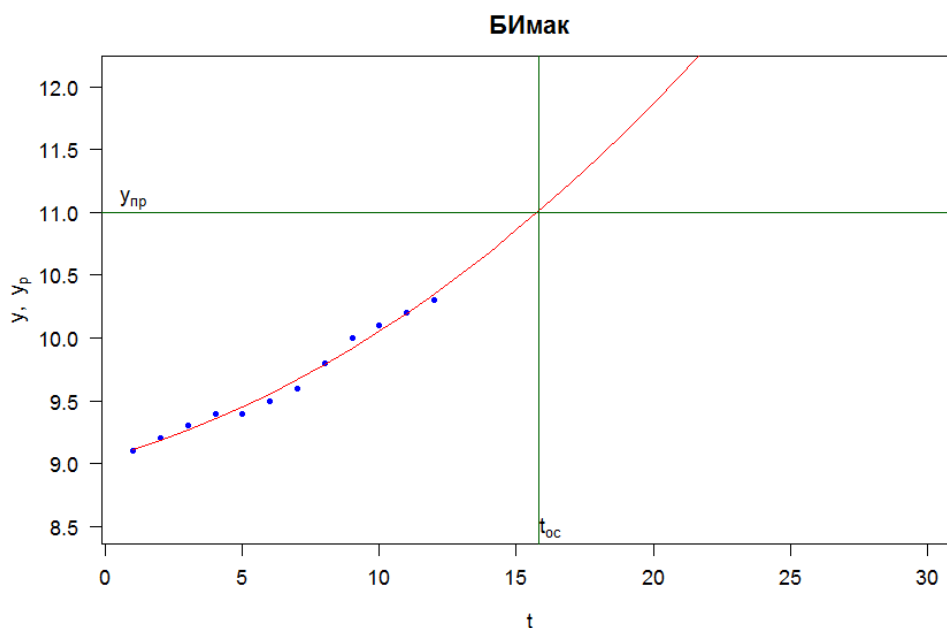


Рис. 3.12. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.3)

Корень уравнения (2.3.16) $t_{ос}=15,8$ мес. Используя формулу (2.3.15) получим, что средний остаточный ресурс $t_{ор}=4$ мес.

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.17). На рисунке 3.13 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.18, предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

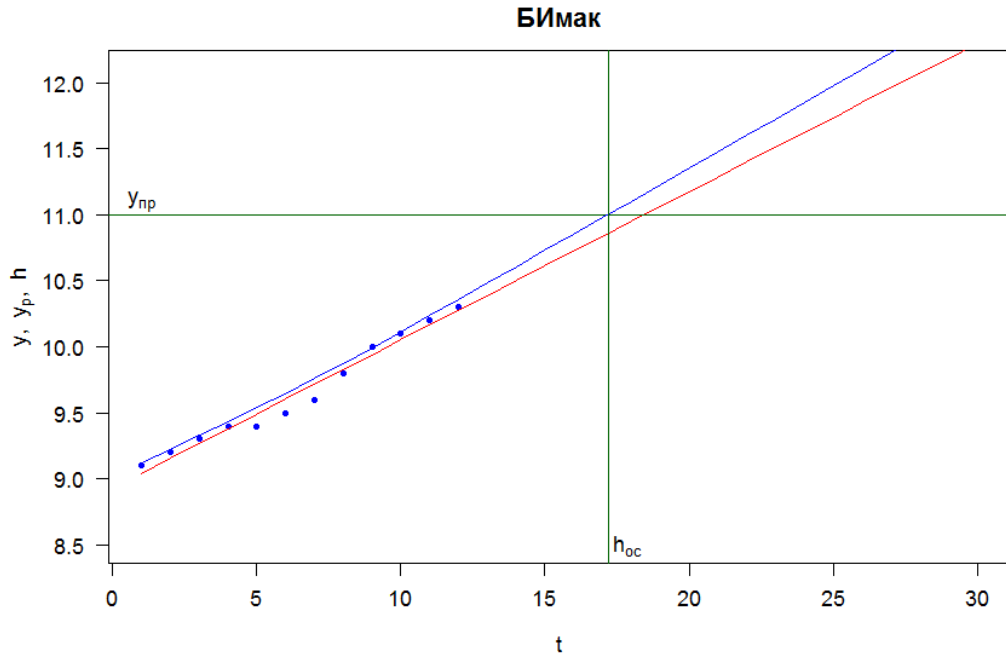


Рис. 3.13. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.3)

Корень уравнения (2.3.22) $h_{ог}=15,3$ мес. Используя формулу (2.3.17) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{ог}=3$ мес.

Учитывая, что прогнозная модель (3.3.3) с учетом (3.3.4) имеет меньшую оценку дисперсии ошибки, сделаем вывод о том, что по максимальному боковому износу рельсов с вероятностью 0,95 следующее измерение диагностическим вагоном можно проводить через 3 месяца.

Использование средних значений бокового износа

Предположим, что результаты мониторинга пути для БИср можно аппроксимировать уравнением прямой:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (3.3.5)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 7,521; a_1 = 0,069. \quad (3.3.6)$$

На рисунке 3.14 приведена графическая иллюстрация исходных данных (табл. 3.6) и прогнозной модели (3.3.5) с учетом (3.3.6). Внешне прямая хорошо описывает результаты мониторинга (БИср).

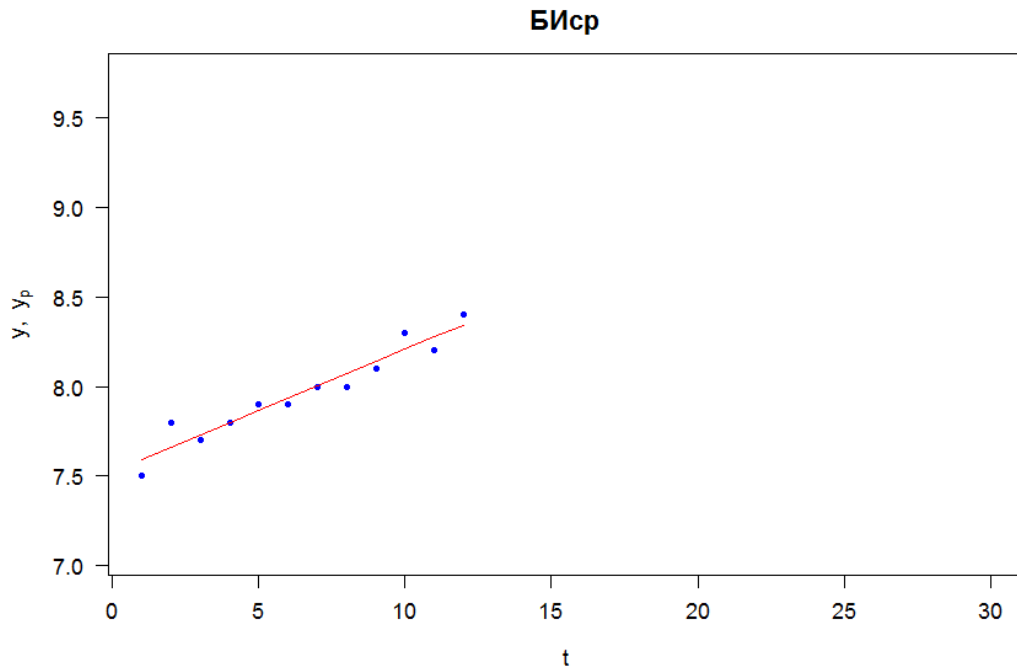


Рис. 3.14. Графическая иллюстрация, модель (3.3.5)

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00548;

значение F -статистики (2.3.10) – 122,0;

коэффициент детерминации R^2 – 0,924;

t -статистики для параметров (2.3.14) – 164,7 (a_0), 11,0 (a_1).

Критическое значение для F -статистики равно 5.0, поэтому значимость модели подтвердилась.

Критическое значение для t -статистики равно 2.3, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.15). На рисунке 3.15 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.16), предельное значение равно 9.5 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

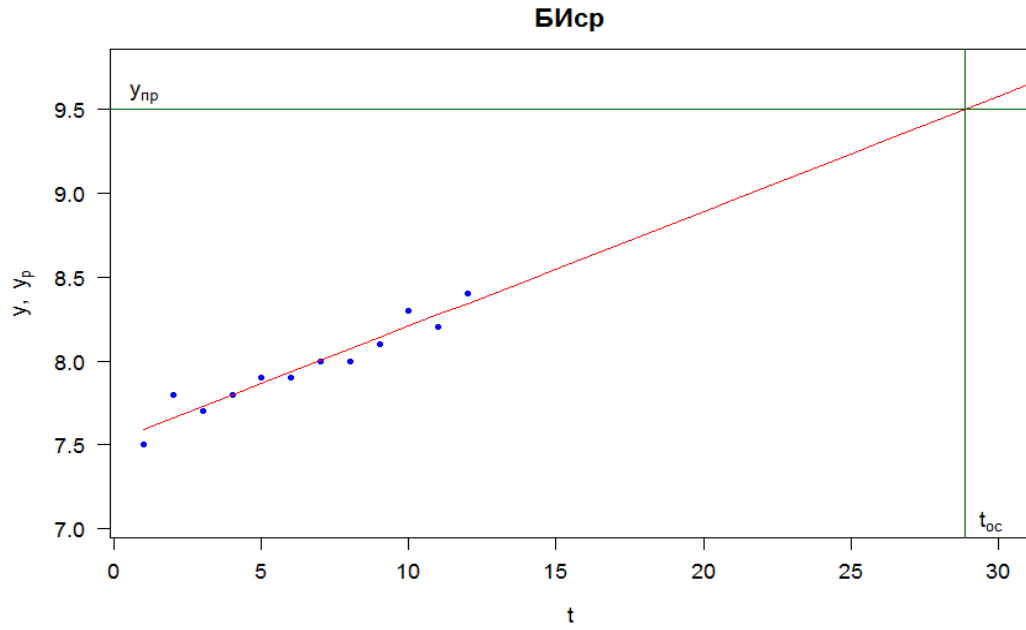


Рис. 3.15. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.5)

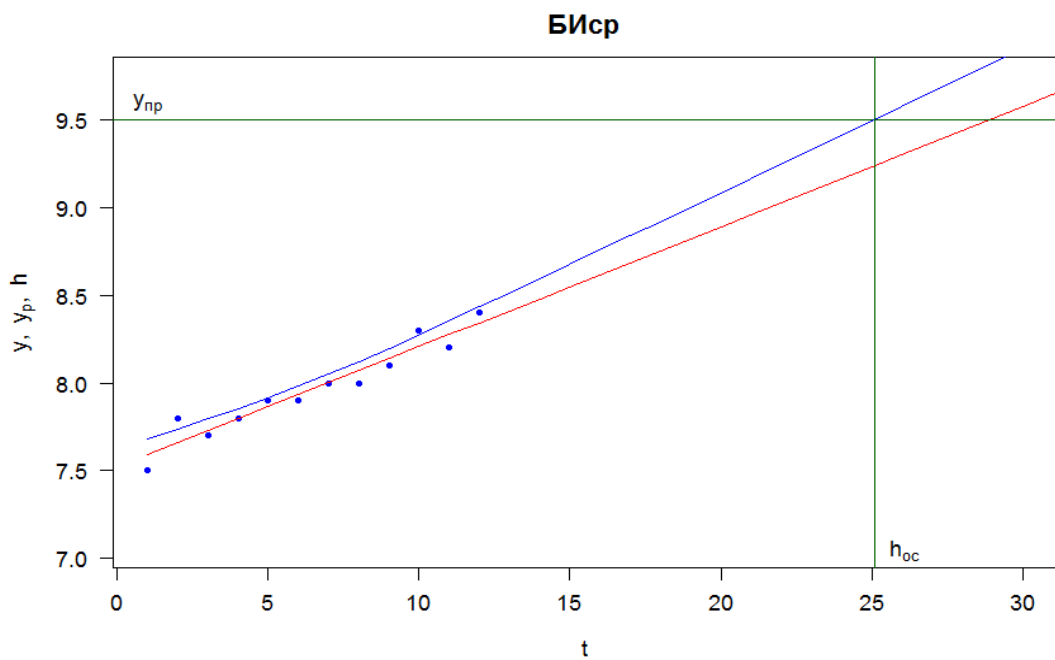


Рис. 3.16. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.5)

Корень уравнения (2.3.16) $t_{oc}=28,9$ мес. Используя формулу (2.3.15) получим, что средний остаточный ресурс $t_{or}=17$ мес.

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.17). На рисунке 3.16 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.18), предельное значение равно 9,5 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

Корень уравнения (2.3.18) $h_{oc}=25,1$ мес. Используя формулу (2.3.17) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{og}=13$ мес.

Зная значение гарантированного остаточного ресурса по среднему боковому износу рельсов, можно сделать вывод о том, что с вероятностью 0,95 следующее измерение диагностическим вагоном можно проводить через 13 месяцев. Подчеркнем, что эти результаты носят методический характер.

Предположим, что результаты мониторинга пути для БИср можно аппроксимировать уравнением параболы:

$$y_p(t)=a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 . \quad (3.3.7)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0=7,541; a_1=0,060; a_2=0,001. \quad (3.3.8)$$

На рисунке 3.17 приведена графическая иллюстрация исходных данных и прогнозной модели (3.3.7) с учетом (3.3.8). Внешне парабола не очень хорошо описывает результаты мониторинга (БИср).

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00608;

значение F -статистики (2.3.10) – 55,5;

коэффициент детерминации R^2 – 0,925;

t -статистика для параметра a_2 равна 0,3.

Критическое значение для F -статистики равно 4.3, поэтому значимость модели подтвердилась.

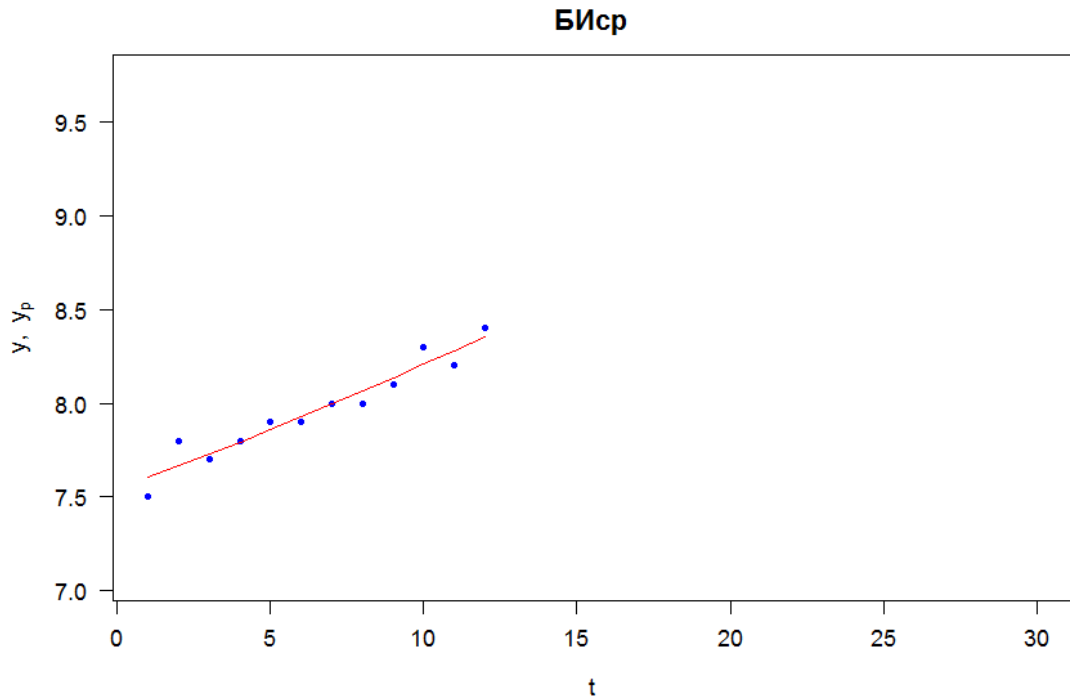


Рис.

3.17. Графическая иллюстрация, модель (3.3.7)

Критическое значение для t -статистики равно 2.3, поэтому значимость параметра a_2 не подтвердилась. В связи с этим, модель (3.3.7) с учетом (3.3.8) рассматривать не будем.

3.3.2. Оценка остаточного ресурса рельсов по их боковому износу с использованием экспертных суждений

Использование максимальных значений бокового износа, пессимистический сценарий

Предположим, что исходные данные вместе с пессимистическими оценками экспертов для БИмак (табл. 3.6 и табл. 3.7) можно аппроксимировать уравнением прямой:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (3.3.9)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 8.953; a_1 = 0,107. \quad (3.3.10)$$

На рисунке 3.18 приведена графическая иллюстрация исходных данных вместе с оценками экспертов и прогнозной модели (3.3.9) с учетом (3.3.10). Внешне прямая хорошо описывает исходные данные (БИмак).

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00476;

значение F -статистики (2.3.10) – 547,9;

коэффициент детерминации R^2 – 0,979;

t -статистики для параметров (2.3.14) – 229,5 (a_0), 23,4 (a_1).

Критическое значение для F -статистики равно 4.7, поэтому значимость модели подтвердилась.

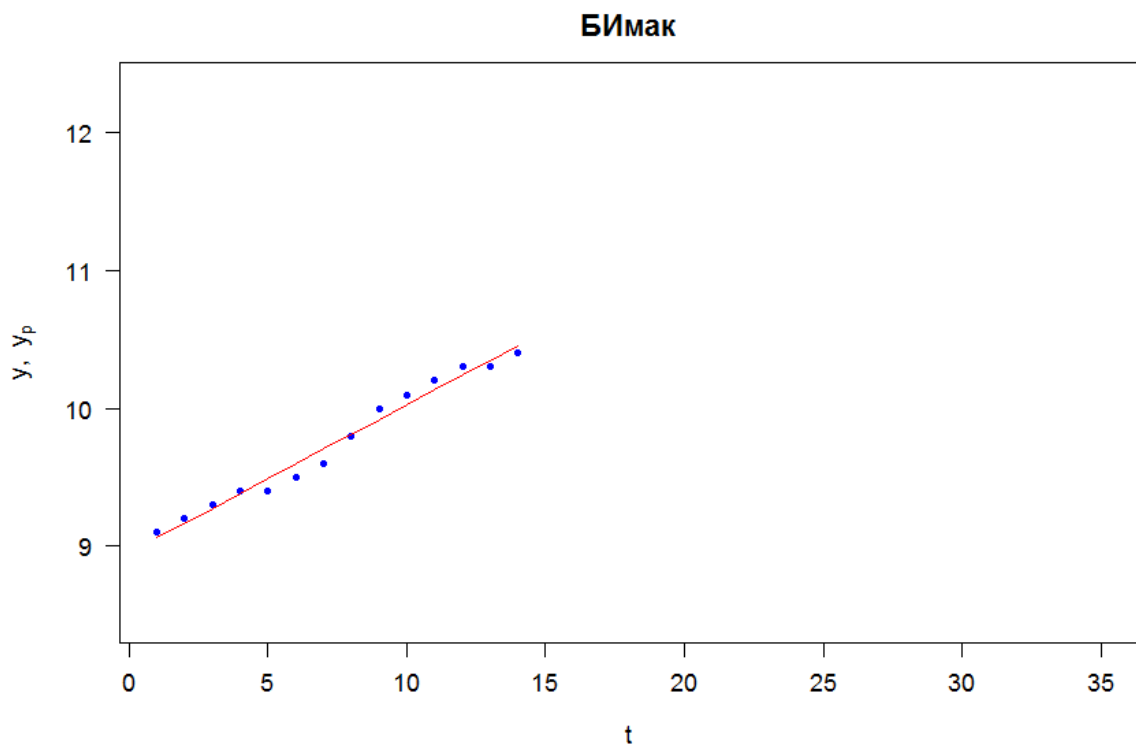


Рис. 3.18. Графическая иллюстрация, модель (3.3.9)

Критическое значение для t -статистики равно 2.2, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.15). На рисунке 3.19 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.16), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

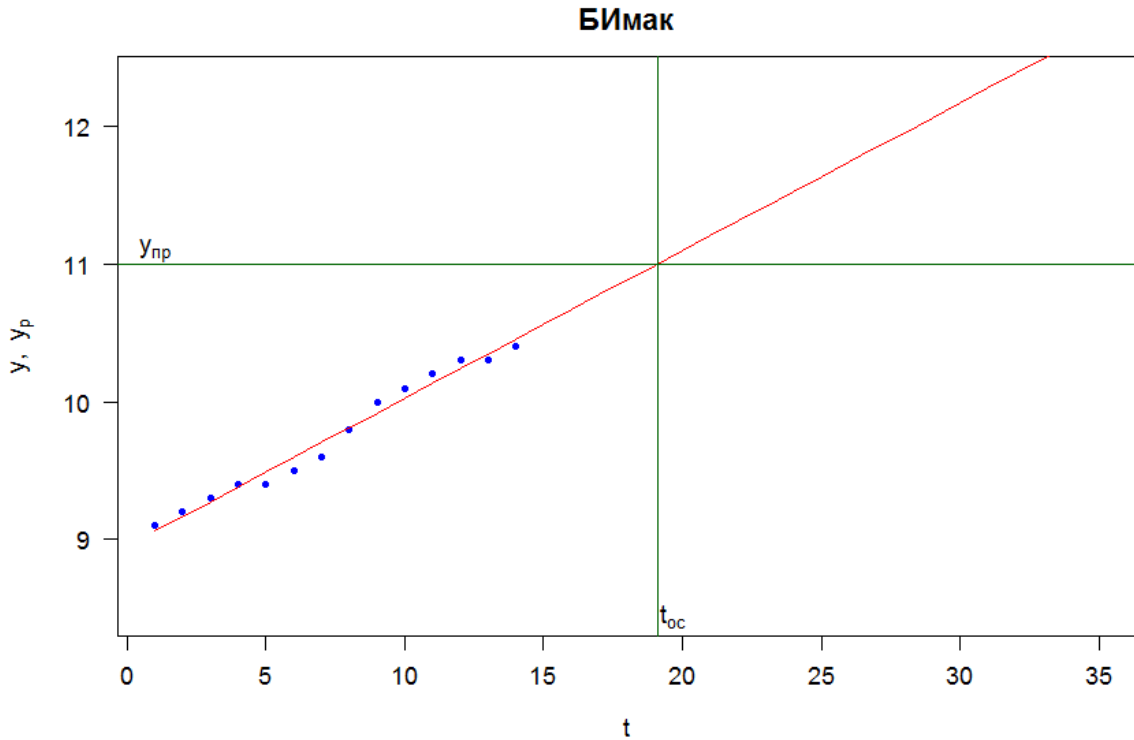


Рис. 3.19. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.9)

Корень уравнения (2.3.16) $t_{oc}=19,1$ мес. Используя формулу (2.3.15) получим, что средний остаточный ресурс $t_{or}=7$ мес.

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.17). На рисунке 3.20 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.18), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

Корень уравнения (2.3.18) $h_{oc}=18,1$ мес. Используя формулу (2.3.17) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{og}=6$ мес.

Наличие пессимистических экспертных оценок увеличило гарантированный остаточный ресурс относительно модели (3.3.1) с учетом (3.3.2) на один месяц.

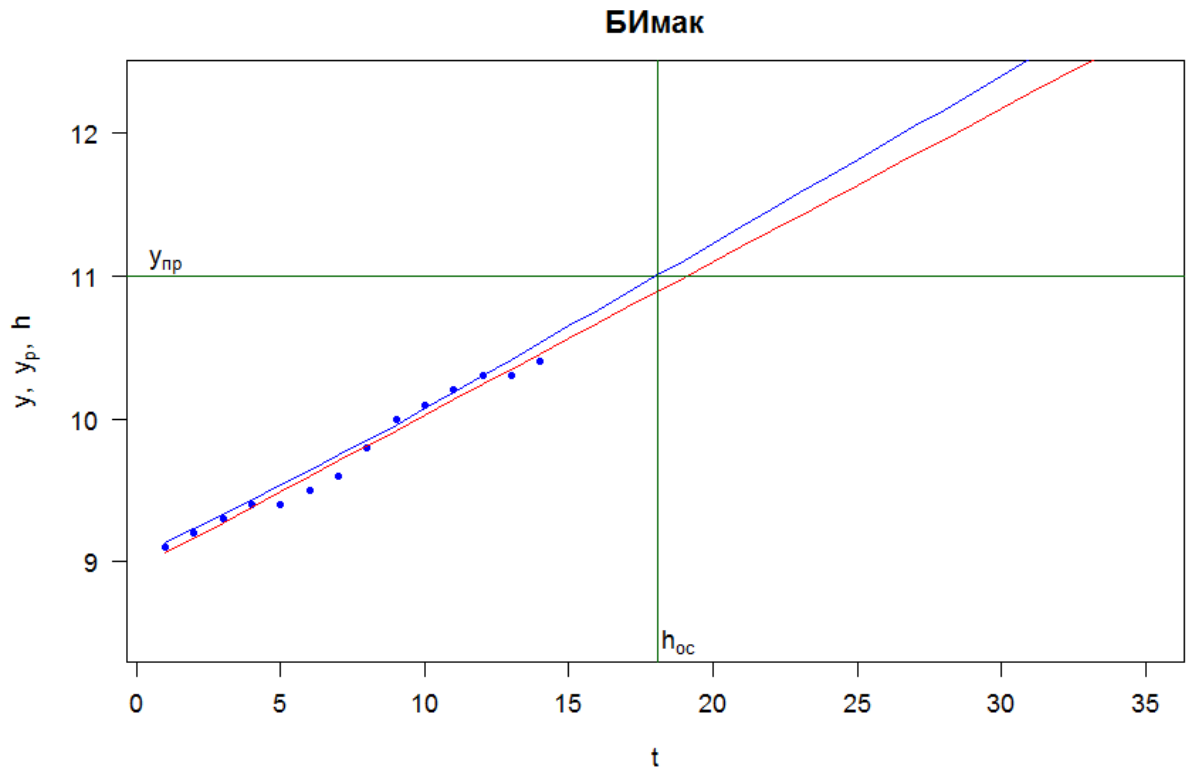


Рис. 3.20. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.9)

Предположим, что исходные данные вместе с пессимистическими оценками экспертов для БИмак (табл. 3.6 и табл. 3.7) можно аппроксимировать уравнением параболы:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2. \quad (3.3.11)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 8,975; a_1 = 0,099; a_2 = 0,001. \quad (3.3.12)$$

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00518;

значение F -статистики (2.3.10) – 255,1;

коэффициент детерминации R^2 – 0,979;

t -статистика для параметра a_2 – 0,4.

Критическое значение для t -статистики равно 2.2, поэтому значимость модели не подтвердилась.

*Использование максимальных значений бокового износа,
оптимистический сценарий*

Предположим, что исходные данные вместе с оптимистическими оценками экспертов для БИмак (табл. 3.6 и табл. 3.7) можно аппроксимировать уравнением прямой:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (3.3.13)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 8.913; a_1 = 0.115. \quad (3.3.14)$$

На рисунке 3.21 приведена графическая иллюстрация исходных данных вместе с оценками экспертов и прогнозной модели (3.3.13) с учетом (3.3.14). Внешне прямая хорошо описывает исходные данные (БИмак).

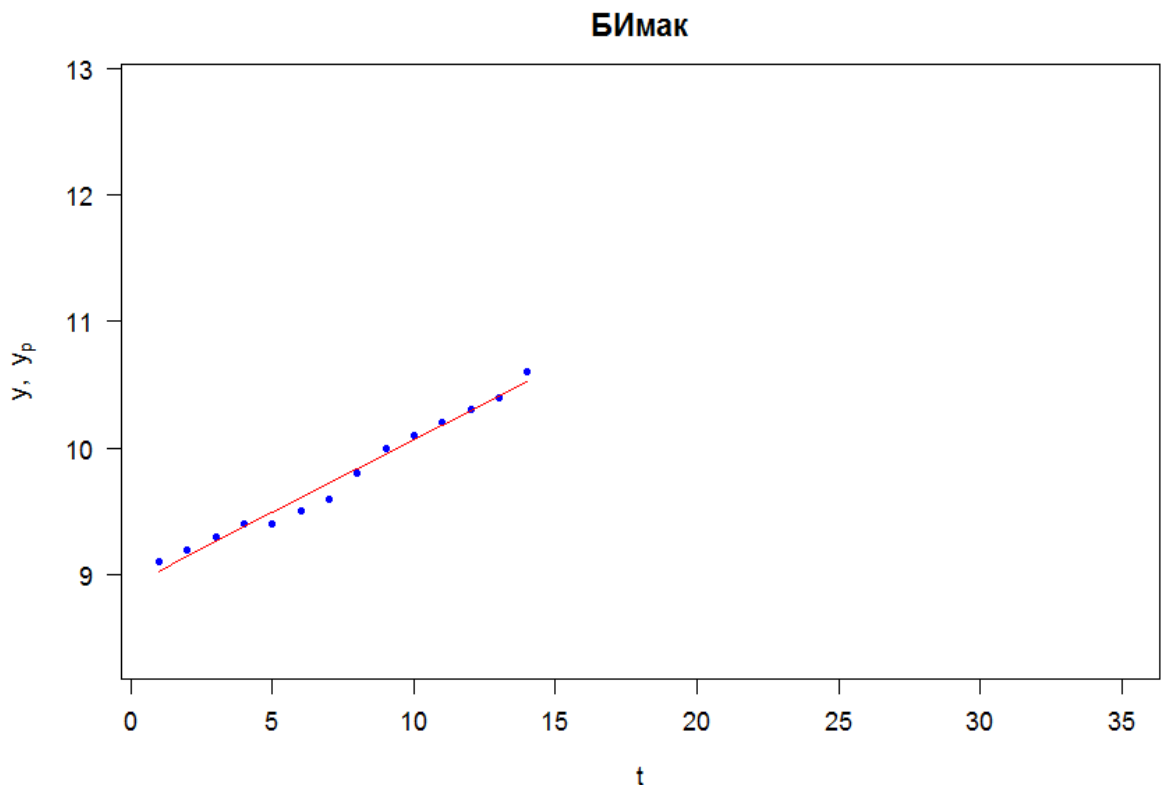


Рис. 3.21. Графическая иллюстрация, модель (3.3.13)

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00462;

значение F -статистики (2.3.10) – 664,2;

коэффициент детерминации R^2 – 0,982;

t -статистики для параметров (2.3.14) – 233,8 (a_0), 25,8 (a_1).

Критическое значение для F -статистики равно 4.7, поэтому значимость модели подтвердилась.

Критическое значение для t -статистики равно 2.2, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.15). На рисунке 3.22 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.16), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

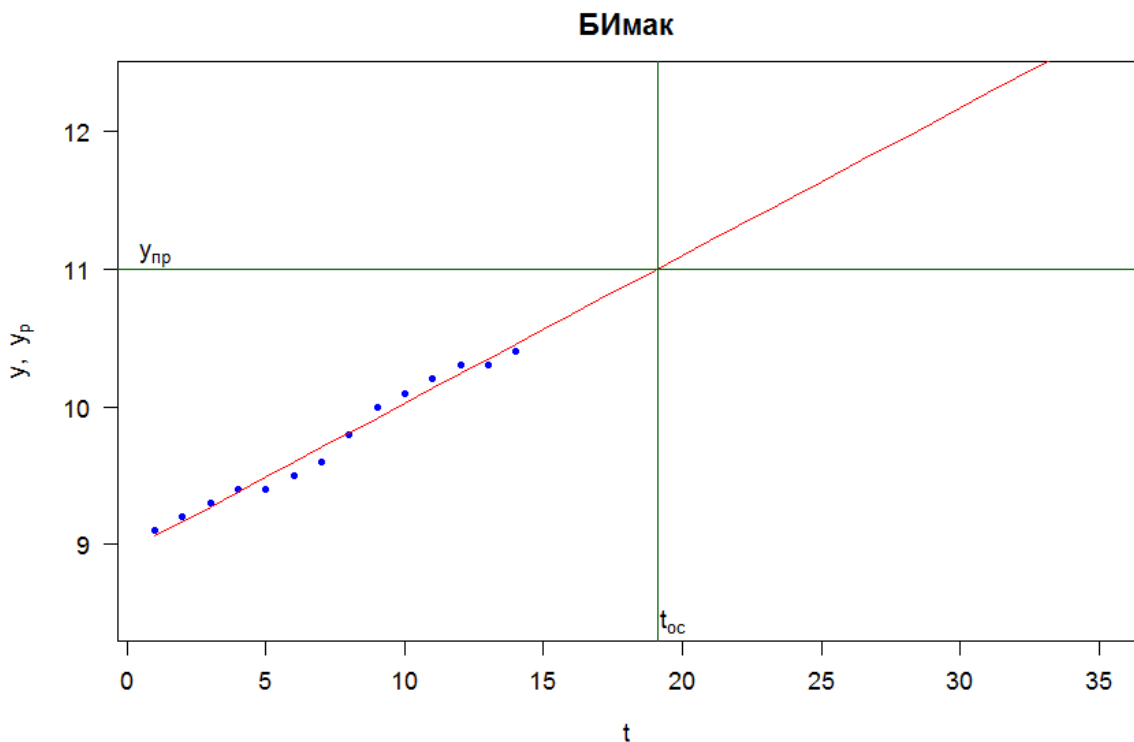


Рис. 3.22. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.13)

Корень уравнения (2.3.16) $t_{oc}=18,1$ мес. Используя формулу (2.3.15) получим, что средний остаточный ресурс $t_{or}=6$ мес.

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.17). На рисунке 3.23 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.18), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

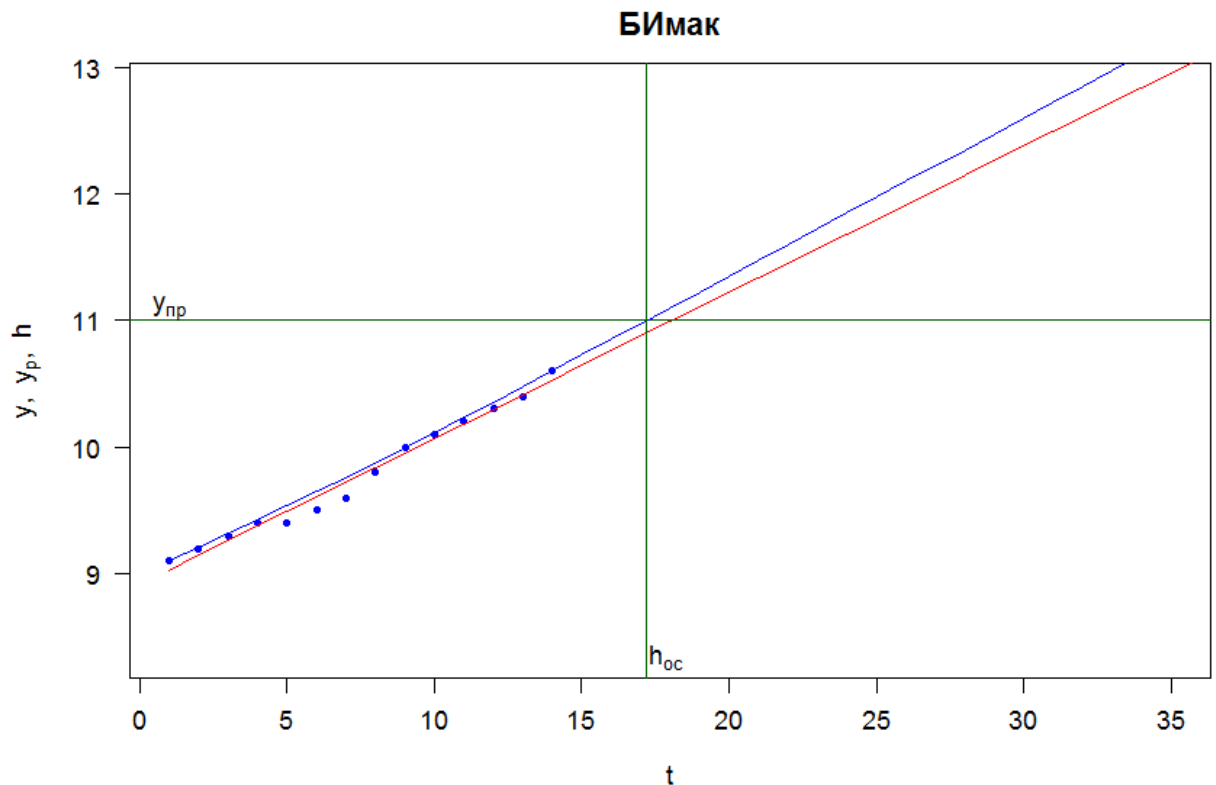


Рис. 3.23. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.13)

Корень уравнения (2.3.18) $h_{oc}=17,2$ мес. Используя формулу (2.3.17) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{og}=5$ мес.

Наличие оптимистических экспертных оценок уменьшило гарантированный остаточный ресурс относительно модели (3.3.9) с учетом (3.3.10) на один месяц.

Предположим, что исходные данные вместе с оптимистическими оценками экспертов для БИмак (табл. 3.6 и табл. 3.7) можно аппроксимировать уравнением параболы:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2. \quad (3.3.15)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 9,026; a_1 = 0,073; a_2 = 0,003. \quad (3.3.16)$$

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00292;

значение F -статистики (2.3.10) – 530,6;

коэффициент детерминации R^2 – 0,990;

t -статистики для параметров (2.3.14) – 180,6 (a_0), 4,8 (a_1), 2,8 (a_2).

Критическое значение для t -статистики равно 2,2, поэтому значимость всех параметров модели подтвердилась.

На рисунке 3.24 приведена графическая иллюстрация исходных данных и прогнозной модели (3.3.15) с учетом (3.3.16). Внешне парабола хорошо описывает результаты мониторинга (БИмак).

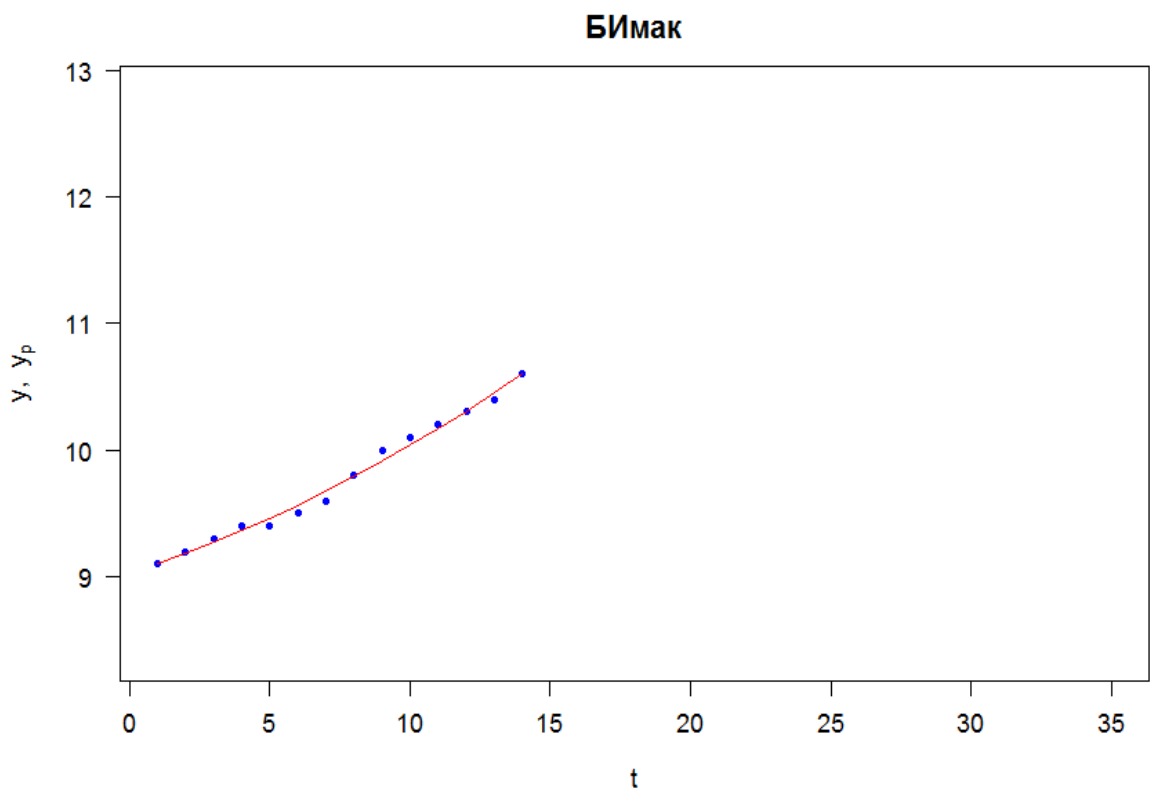


Рис. 3.24. Графическая иллюстрация, модель (3.3.15)

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00281;

значение F -статистики (2.3.10) – 320,1;

коэффициент детерминации $R^2 = 0,986$;

t -статистики для параметров (2.3.14) – 164,1 (a_0), 3,0 (a_1), 2,8 (a_2).

Критическое значение для F -статистики равно 4.3, поэтому значимость модели подтвердилась.

Критическое значение для t -статистики равно 2.2, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

При равных условиях на практике рекомендуется предпочтение отдать прогнозной модели с меньшей оценкой дисперсии ошибки (2.3.9). В нашем случае это парабола (3.3.15) с учетом (3.3.16).

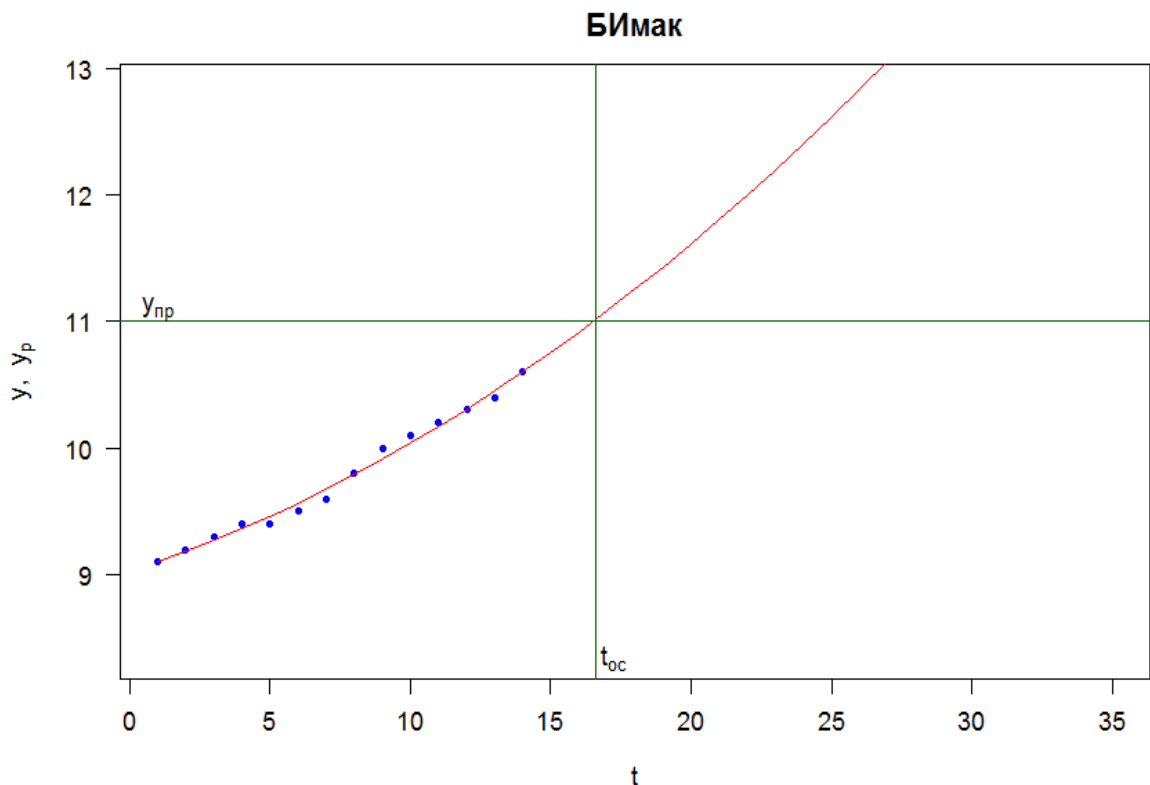


Рис. 3.25. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.15)

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.15). На рисунке 3.25 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.16), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

Корень уравнения (2.3.16) $t_{oc}=16,6$ мес. Используя формулу (2.3.15) получим, что средний остаточный ресурс $t_{or}=5$ мес.

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.17). На рисунке 3.26 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.18), предельное значение равно 11 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

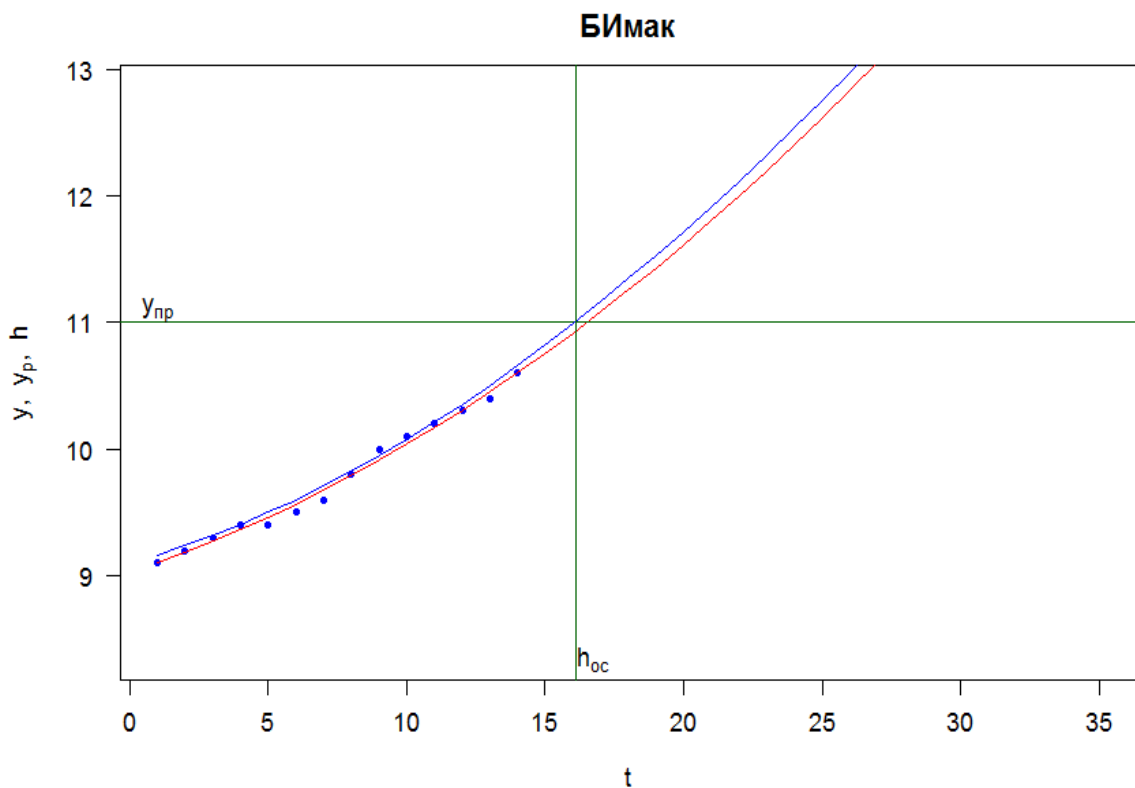


Рис. 3.26. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.15)

Корень уравнения (2.3.18) $h_{oc}=16,1$ мес. Используя формулу (2.3.17) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{og}=4$ мес.

Учитывая, что прогнозная модель (3.3.15) с учетом (3.3.16) имеет меньшую оценку дисперсии ошибки, сделаем вывод о том, что по максимальному боковому износу рельсов при оптимистических экспертных оцен-

ках с вероятностью 0,95 следующее измерение диагностическим вагоном можно проводить через 4 месяца.

*Использование средних значений бокового износа,
пессимистический сценарий*

Предположим, что исходные данные вместе с пессимистическими оценками экспертов для БИср (табл. 3.6 и табл. 3.7) можно аппроксимировать уравнением прямой:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (3.3.17)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 7.545; a_1 = 0.064. \quad (3.3.18)$$

На рисунке 3.27 приведена графическая иллюстрация исходных данных вместе с оценками экспертов и прогнозной модели (3.3.17) с учетом (3.3.18). Внешне прямая хорошо описывает исходные данные (БИср).

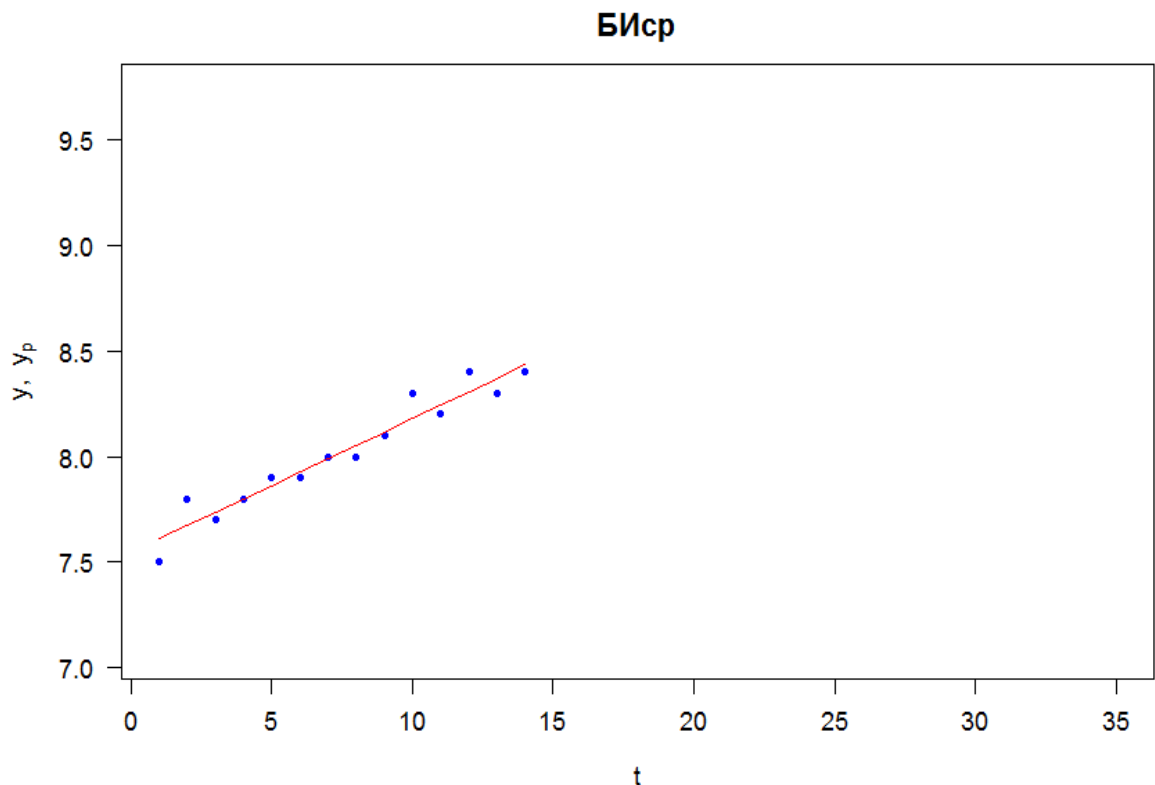


Рис. 3.27. Графическая иллюстрация, модель (3.3.17)

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00548;

значение F -статистики (2.3.10) – 167,5;

коэффициент детерминации $R^2 = 0,933$;

t -статистики для параметров (2.3.14) – 180,6 (a_0), 13,0 (a_1).

Критическое значение для F -статистики равно 4.7, поэтому значимость модели подтвердилась.

Критическое значение для t -статистики равно 2.2, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.15). На рисунке 3.28 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.16), предельное значение равно 9,5 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

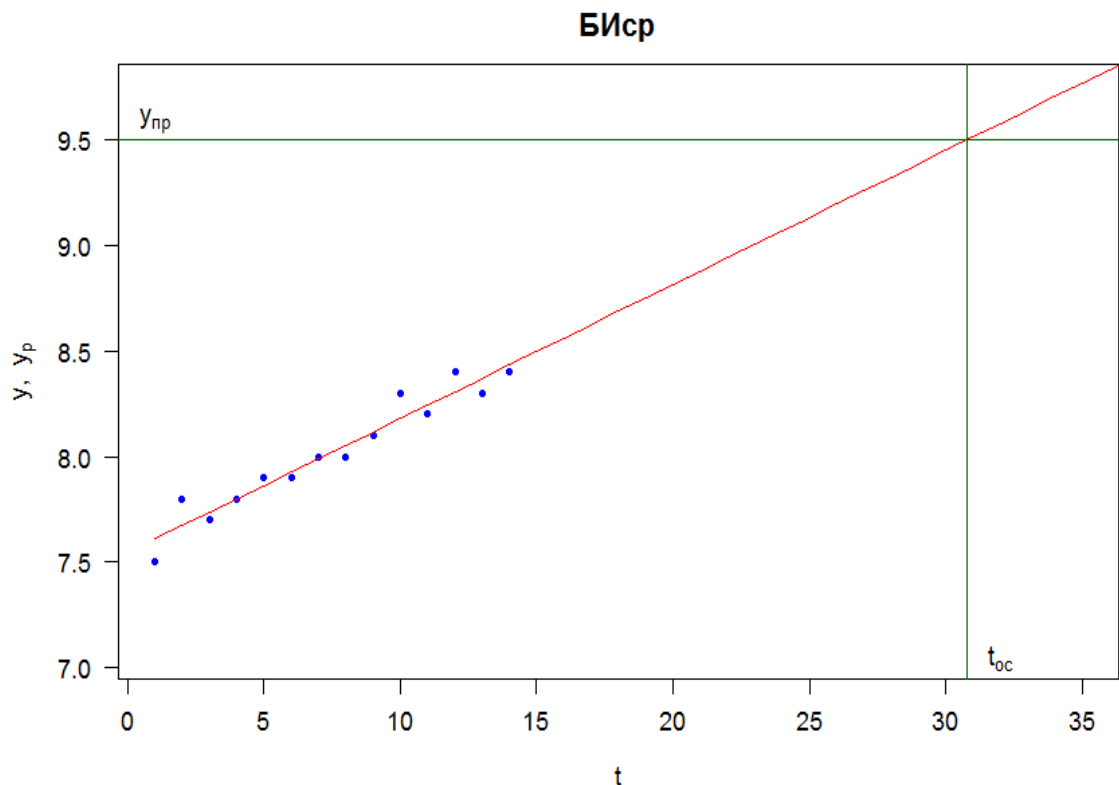


Рис. 3.28. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.17)

Корень уравнения (2.3.16) $t_{oc}=30,8$ мес. Используя формулу (2.3.15) получим, что средний остаточный ресурс $t_{or}=19$ мес.

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.17). На рисунке 3.29 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.18), предельное значение равно 9,5 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

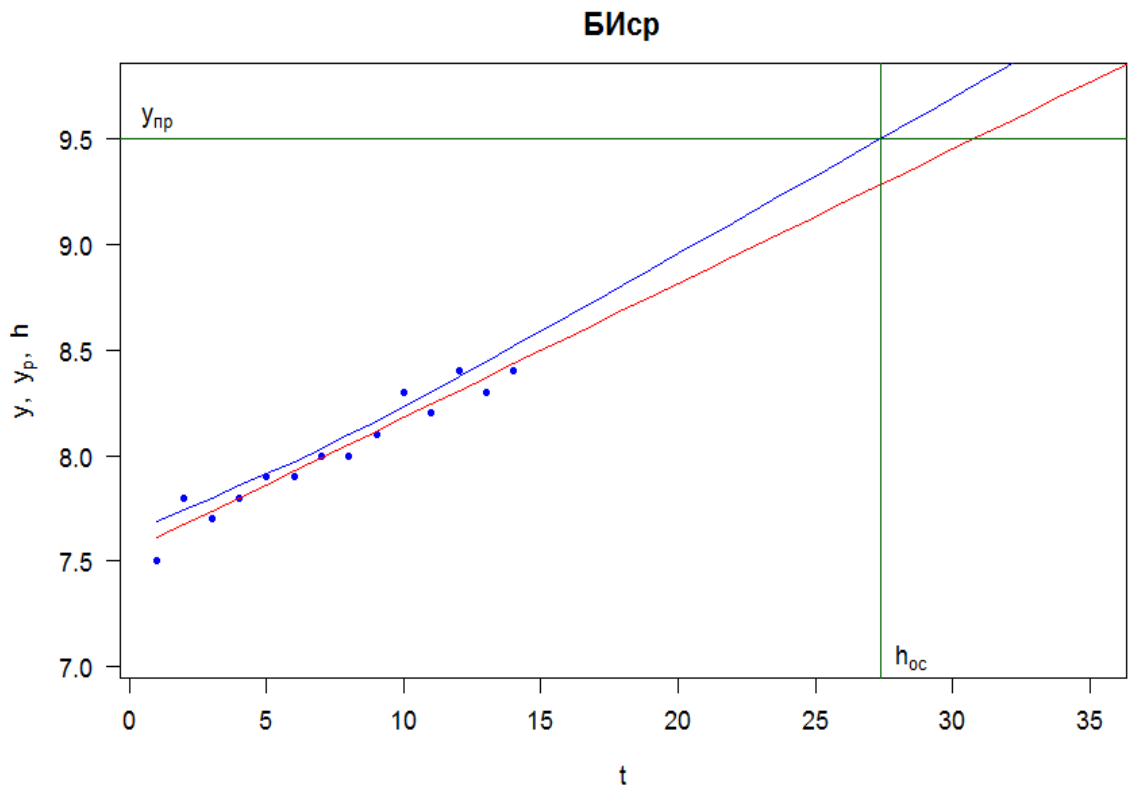


Рис. 3.29. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.17)

Корень уравнения (2.3.18) $h_{oc}=27,4$ мес. Используя формулу (2.3.17) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{og}=15$ мес.

Наличие пессимистических экспертных оценок увеличило гарантированный остаточный ресурс относительно модели (3.3.5) с учетом (3.3.6) на два месяца.

Уравнение параболы для исходных данных вместе с пессимистическими оценками экспертов для БИСр (табл. 3.6 и табл. 3.7) оказалось незначимым.

*Использование средних значений бокового износа,
оптимистический сценарий*

Предположим, что исходные данные вместе с оптимистическими оценками экспертов для БИср (табл. 3.6 и табл. 3.7) можно аппроксимировать уравнением прямой:

$$y_p(t) = a_0 + a_1 \cdot t. \quad (3.3.19)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0 = 7,505; a_1 = 0,072. \quad (3.3.20)$$

На рисунке 3.30 приведена графическая иллюстрация исходных данных вместе с оценками экспертов и прогнозной модели (3.3.19) с учетом (3.3.20). Внешне прямая хорошо описывает исходные данные (БИср).

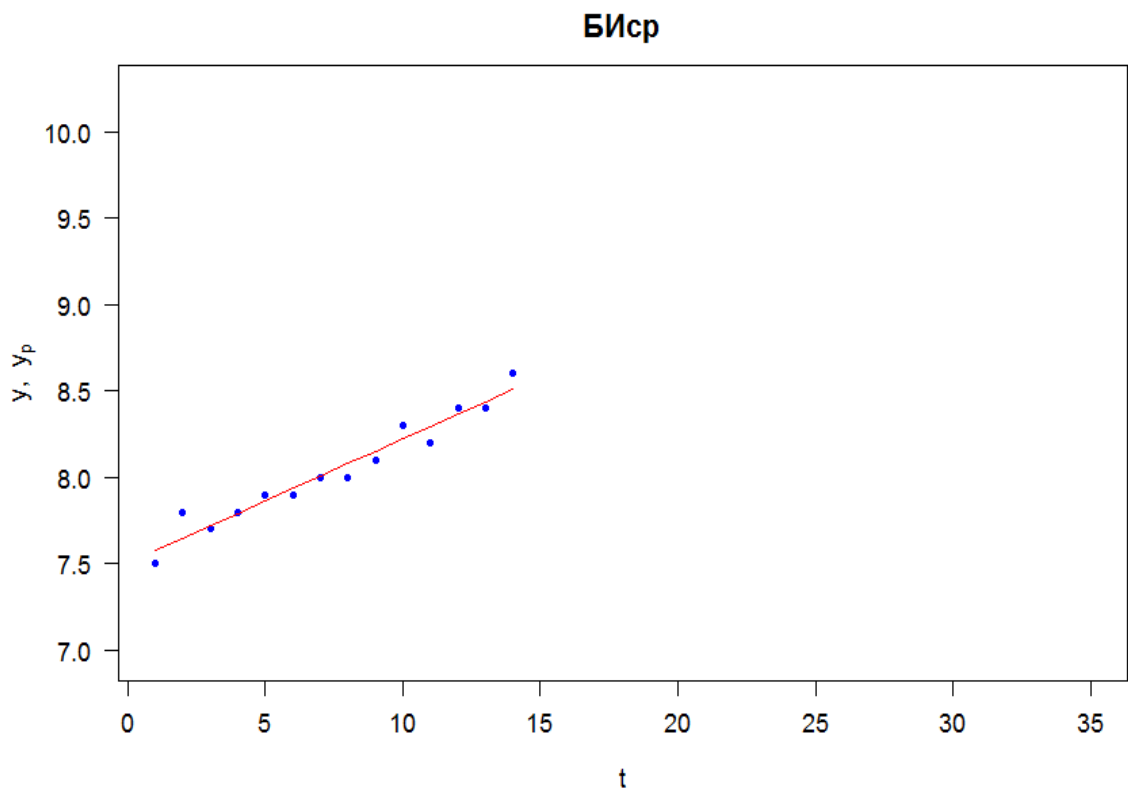


Рис. 3.30. Графическая иллюстрация, модель (3.3.19)

Приведем результаты статистического анализа полученной прогнозной модели:

оценка дисперсии ошибки (2.3.9) – 0,00548;

значение F -статистики (2.3.10) – 211,0;

коэффициент детерминации $R^2 = 0,946$;

t -статистики для параметров (2.3.14) – 178,7 (a_0); 14,5 (a_1).

Критическое значение для F -статистики равно 4.7, поэтому значимость модели подтвердилась.

Критическое значение для t -статистики равно 2.2, поэтому значимость параметров модели подтвердилась.

Найдем средний остаточный ресурс рельсов (2.3.15). На рисунке 3.31 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.16), предельное значение равно 9,5 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

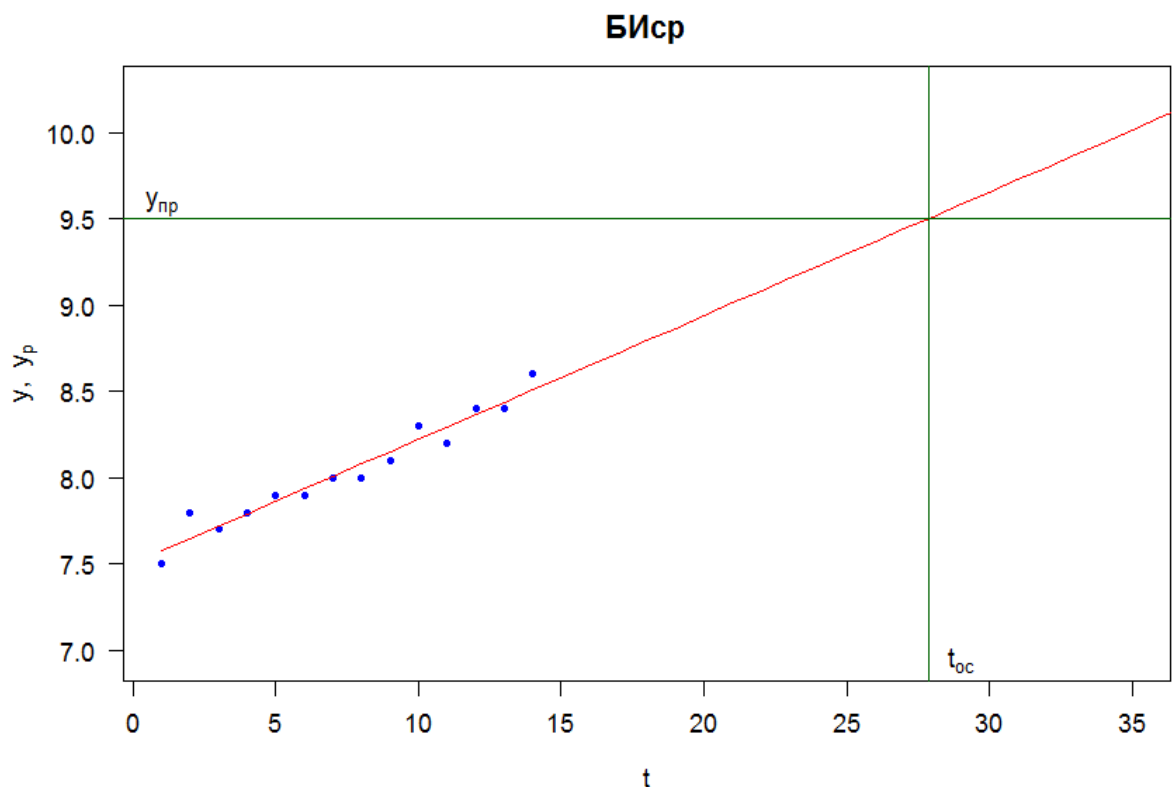


Рис. 3.31. Графическая иллюстрация для среднего остаточного ресурса, модель (3.3.19)

Корень уравнения (2.3.16) $t_{ос}=27,9$ мес. Используя формулу (2.3.15) получим, что средний остаточный ресурс $t_{ор}=18$ мес.

Найдем гарантированный остаточный ресурс (2.3.17). На рисунке 3.32 представлена графическая иллюстрация решения уравнения (2.3.18), предельное значение равно 9,5 мм, время последнего измерения $t_M=12$ мес.

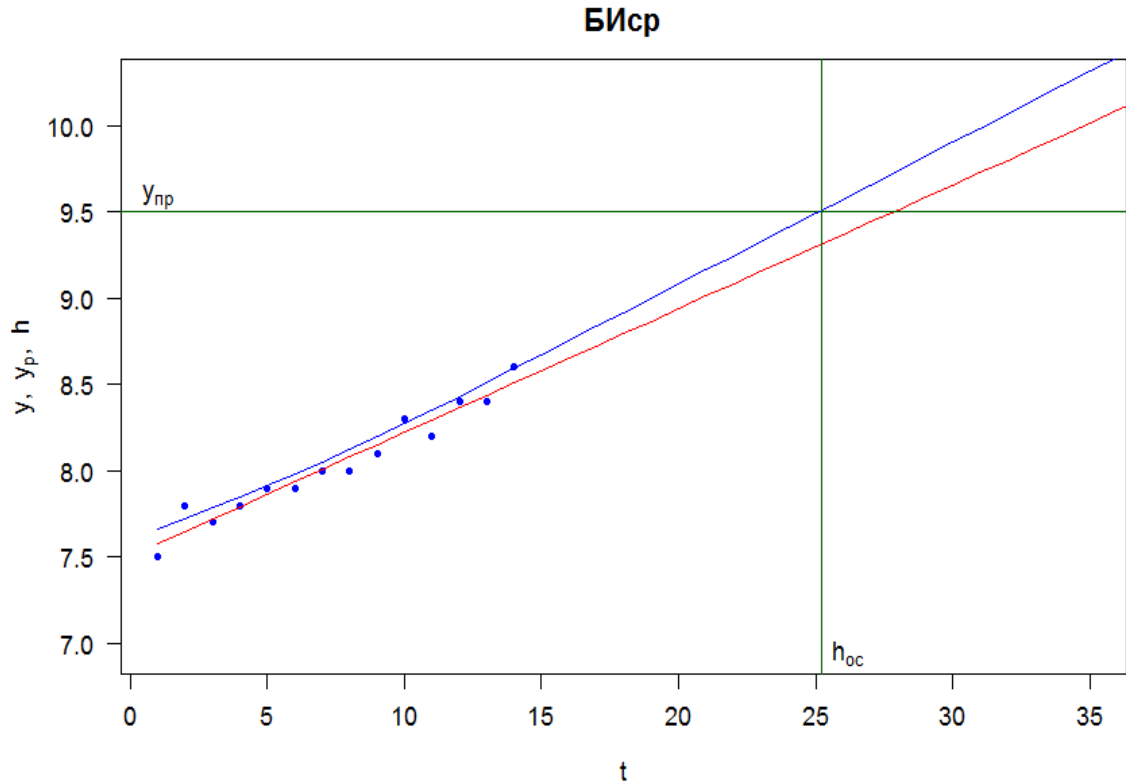


Рис. 3.32. Графическая иллюстрация для гарантированного остаточного ресурса, модель (3.3.19)

Корень уравнения (2.3.18) $h_{ог}=25,2$ мес. Используя формулу (2.3.17) получим, что гарантированный остаточный ресурс $t_{ог}=13$ мес.

Наличие оптимистических экспертных оценок не изменило гарантированный остаточный ресурс относительно модели (3.3.5) с учетом (3.3.6).

Предположим, что исходные данные вместе с оптимистическими оценками экспертов для БИср (табл. 3.6 и табл. 3.7) можно аппроксимировать уравнением параболы:

$$y_p(t)=a_0 + a_1 \cdot t + a_2 \cdot t^2 . \quad (3.3.21)$$

Используя метод наименьших квадратов, найдем значения параметров:

$$a_0=7,558; a_1=0,052; a_2=0,001. \quad (3.3.22)$$

Уравнение параболы для исходных данные вместе с оптимистическими оценками экспертов для БИср (табл. 3.6 и табл. 3.7) оказалось незначимым.

Итоговые значения показателей остаточного ресурса рельсов

Таблица 3.8

Итоговые значения показателей остаточного ресурса рельсов

Варианты	t_{or} , мес.	t_{og} , мес.
1	7	5
2	4	3
3	7	6
4	6	5
5	17	13
6	19	15
7	18	13

В таблице 3.8 приведены итоговые значения показателей остаточного ресурса рельсов:

1 – только результаты мониторинга пути, БИмак, модель (3.3.1) с учетом (3.3.2);

2 – только результаты мониторинга пути, БИмак, модель (3.3.3) с учетом (3.3.4);

3 – результаты мониторинга пути совместно с пессимистическими оценками экспертов, БИмак, модель (3.3.9) с учетом (3.3.10);

4 – результаты мониторинга пути совместно с оптимистическими оценками экспертов, БИмак, модель (3.3.13) с учетом (3.3.14);

5 – только результаты мониторинга пути, БИср, модель (3.3.5) с учетом (3.3.6);

6 – результаты мониторинга пути совместно с пессимистическими оценками экспертов, БИср, модель (3.3.17) с учетом (3.3.18);

7 – результаты мониторинга пути совместно с оптимистическими оценками экспертов, БИср, модель (3.3.19) с учетом (3.3.20).

Экспертные оценки меняют значения параметров прогнозных моделей и тем самым влияют и на средний остаточный ресурс рельсов (t_{or}) и на гарантированный ресурс (t_{og}). Так как экспертные оценки увеличивают объем исходных данных и учитывают сценарии развития перевозочного процесса в будущем, их использование при оценке показателей остаточного ресурса рельсов по их боковому износу следует считать целесообразным и эффективным.

На показатели остаточного ресурса рельсов существенное влияние оказывает предельное значение, в данном исследовании оно выбрано произвольно.

3.4. Исследование показателей надежности рельсовых креплений

Тестирование численных алгоритмов вычисления

показателей надежности

Протестируем численные алгоритмы показателей надежности рельсовых креплений, предложенных и описанных в параграфе 2.2.2. Для этого будем использовать аналитические модели показателей надежности, созданных на основе треугольного распределения и представленных в параграфе 2.2.1. Исходные данные для наработки рельсовых креплений обоснованы в параграфе 3.1 (3.1.8) – ($t_m=11$, $t_o=4$). По этим исходным данным, используя алгоритм (2.2.11), получим выборочные значения, которые являются исходными для численных алгоритмов. Объем выборки 20000, число интервалов 44. Как уже отмечалось в параграфе 2.2.1, данный объем выборки обеспечивает относительную точность e_z (2.2.13*) меньше 1%.

На рисунке 3.33 приведены вероятности безотказной работы (ВБР): 1 – ВБР для аналитической модели (2.2.15); 2 – ВБР для численной модели (2.2.27). Графическое представление моделей хорошо совпадает.

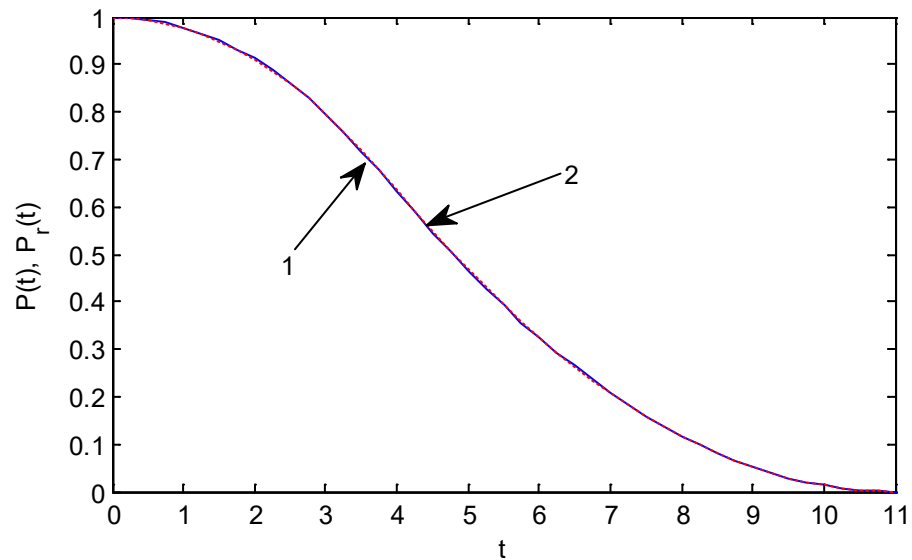


Рис. 3.33. Вероятности безотказной работы

На рисунке 3.34 приведены интенсивности отказов (ИНО): 1 – ИНО для аналитической модели (2.2.16); 2 – ИНО для численной модели (2.2.40). Графическое представление моделей хорошо совпадает.

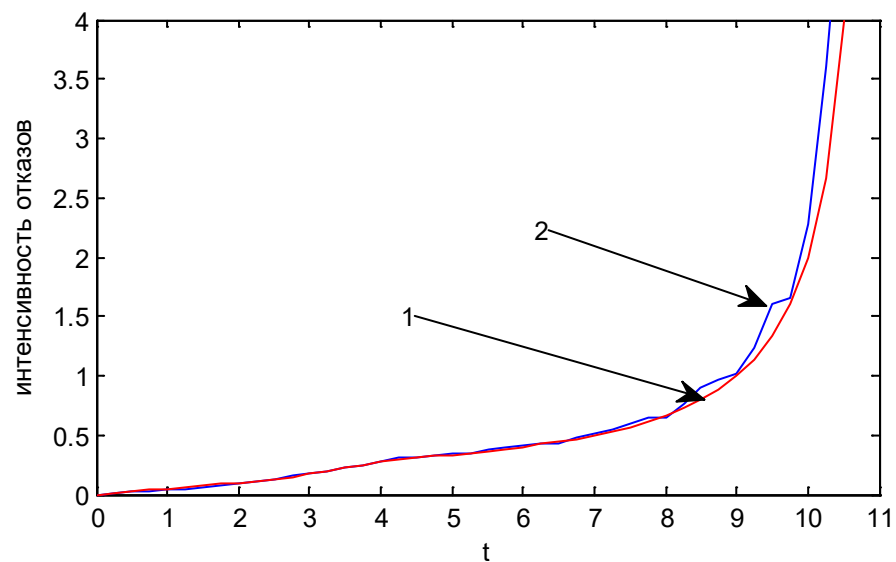


Рис. 3.34. Интенсивности отказов

На рисунке 3.35 приведены вероятности безотказной работы для остаточного ресурса (ВБРОР) ($x=4$): 1 – ВБРОР для аналитической модели

(2.2.19); 2 – ВБРОР для численной модели (2.2.31) с учетом (2.2.30). Графическое представление моделей хорошо совпадает.

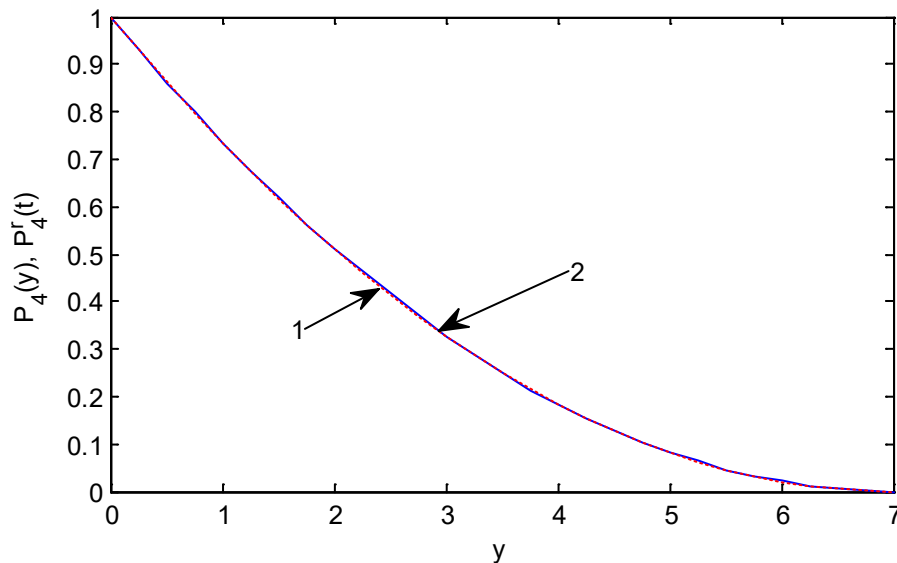


Рис. 3.35. Вероятности безотказной работы остаточного ресурса

Средняя наработка до отказа по аналитической модели (2.2.17) равна 5, а по численной (2.2.28) – 4,997.

Гамма-процентный ресурс до отказа по аналитической модели (2.2.18) при $\gamma=0,9$ равен 2,098, а по численной (2.2.29) – 2,080.

Средний остаточный ресурс до отказа при $x=2$ по аналитической модели (2.2.21) равен 3,367, а по численной (2.2.32) – 3,371.

Средний остаточный ресурс до отказа при $x=6$ по аналитической модели (2.2.22) равен 1,667, а по численной (2.2.32) – 1,659.

Численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа при $x=2$ и $\gamma=0,9$ по аналитической модели (2.2.23) равен 0,828, а по численной (2.2.33) – 0,831.

Численный гамма-процентный остаточный ресурс до отказа при $x=6$ и $\gamma=0,9$ по аналитической модели (2.2.24) равен 0,257, а по численной (2.2.33) – 0,255.

Значения, полученные по численным моделям близки к значениям, полученным по аналитическим моделям. Это показывает высокую адекватность

численных алгоритмов, полученных по результатам имитационного моделирования.

*Апробация нечеткого численного анализа
вычисления показателей надежности, вариант МО*

Вариант МО (рис. 2.8), описан в параграфе 2.2.3. Гистограмма частот наработки представлена на рисунке 2.9, точечные и интервальные оценки, описывающие математическое ожидание как случайную величину, представлены в (2.2.46) и (2.2.47).

На рисунке 3.36 представлены вероятности безотказной работы: 1 – ВБР для аналитической модели (2.2.15); 2 – ВБР для численной модели (2.2.27). Нечеткость математического ожидания влияет на эту функцию. Подчеркнем, что для времени $t < t_l$ $P(t) > P_r(t)$, а при $t > t_l$ наоборот (рис. 3.36).

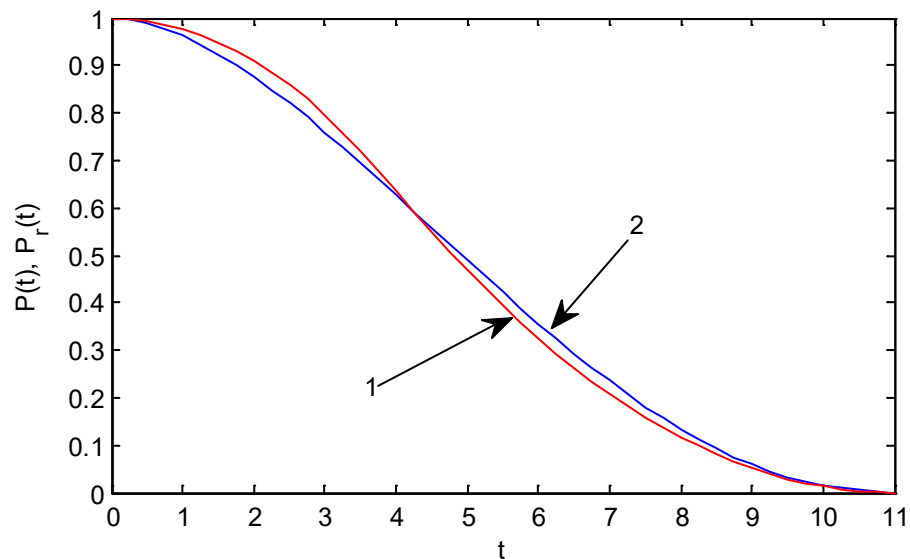


Рис. 3.36. Вероятности безотказной работы, вариант МО

С учетом (2.2.28) численная средняя наработка до отказа равна

$$\bar{t}_r = 5,012. \quad (3.4.1)$$

Значение (3.4.1) попало в доверительный интервал (2.2.46), т.е. нечеткость математического ожидания не повлияла на среднюю наработку до отказа.

При $\gamma = 0,9$ с учетом (2.2.29) численный гамма-процентный ресурс до отказа равен

$$t_r(0,9) = 1,743. \quad (3.4.2)$$

Учитывая (3.4.2), нечеткость математического ожидания повлияла на гамма-процентный ресурс до отказа, равный для аналитической модели 2,098. Следует подчеркнуть, что существенность отличия гамма-процентного ресурса для варианта МО зависит от значения вероятности γ .

На рисунке 3.37 представлены вероятности безотказной работы для остаточного ресурса: 1 – ВБРОР для аналитической модели (2.2.15); 2 – ВБРОР для численной модели (2.2.27) 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.

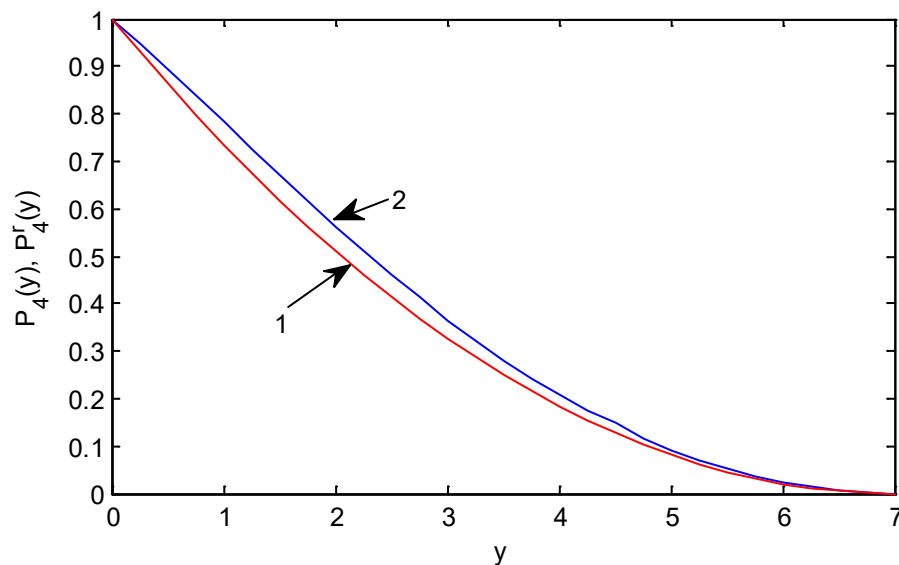


Рис. 3.37. Вероятности безотказной работы для остаточного ресурса, вариант МО

С учетом (2.2.32) численный средний остаточный ресурс до отказа равен

$$\bar{y}_4 = 2,538. \quad (3.4.3)$$

При $\gamma = 0,9$ с учетом (2.2.33) численный гамма-процентный остаточный ресурс равен

$$\bar{y}_4(0,9) = 0,450. \quad (3.4.4)$$

При сравнении со значениями, полученными по аналитическим моделям (2.2.21) и (2.2.23) ($\bar{y}_4 = 2,333$; $y_4(0,9) = 0,359$), значения (3.4.3) и (3.4.4) увеличились.

Проверим, как влияет нечеткость описания наработки на интенсивность отказа для варианта МО.

На рисунке 3.38 приведены интенсивности отказов: 1 – ИНО для аналитической модели (2.2.16); 2 – ИНО для численной модели (2.2.40). Графическое представление моделей не совсем совпадают, т.е. нечеткость математического ожидания влияет на эту функцию.

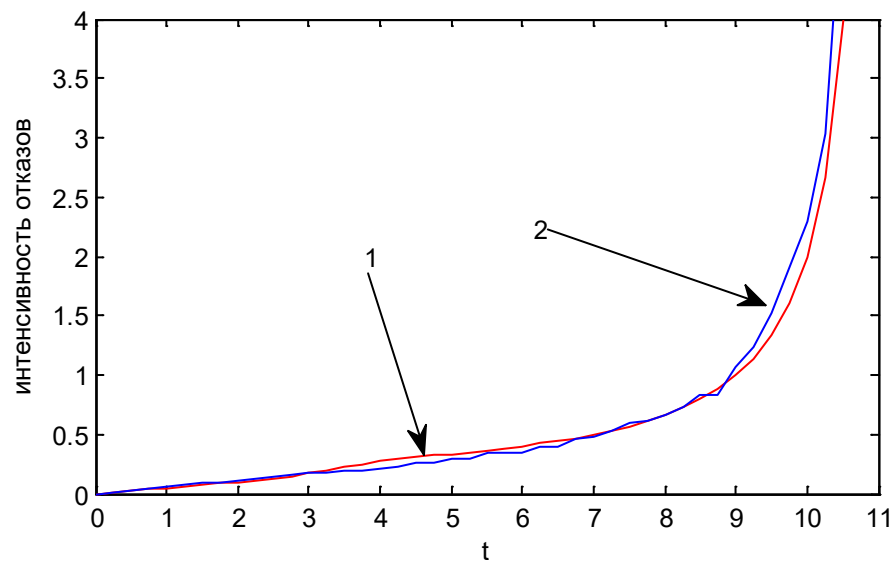


Рис. 3.38. Интенсивности отказов, вариант МО

Апробация нечеткого численного анализа

вычисления показателей надежности, вариант МД, $k_r=0,15$

Вариант МД (рис. 2.10), описан в параграфе 2.2.3. Этот вариант исследуется для двух значений коэффициента вариации моды, в данном случае $k_r=0,15$. Гистограмма частот наработки представлена на рисунке 2.11, точеч-

ные и интервальные оценки, описывающие моду как случайную величину, представлены в (2.2.49) и (2.2.50).

На рисунке 3.39 представлены вероятности безотказной работы: 1 – ВБР для аналитической модели (2.2.15); 2 – ВБР для численной модели (2.2.27). Нечеткость моды влияет на эту функцию. Подчеркнем, что для времени $t < t_l$ $P(t) > P_r(t)$, а при $t > t_l$ наоборот (рис. 3.46).

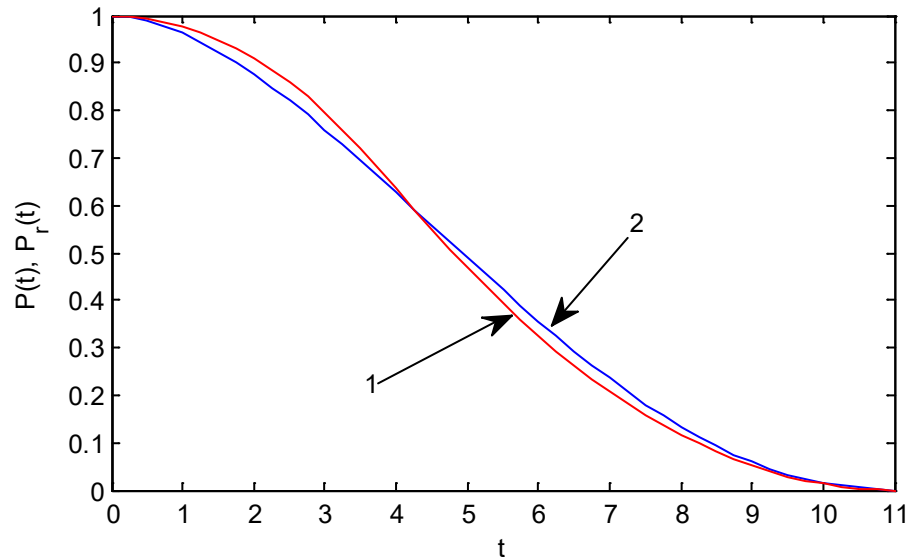


Рис. 3.39. Вероятности безотказной работы, вариант МД, $k_r=0,15$

С учетом (2.2.28) численная средняя наработка до отказа равна

$$\bar{t}_r = 4,993. \quad (3.4.5)$$

Значение (3.4.5) попало в доверительный интервал (2.2.49), т.е. нечеткость математического ожидания не повлияла на среднюю наработку до отказа.

При $\gamma = 0,9$ с учетом (2.2.29) численный гамма-процентный ресурс до отказа равен

$$t_r(0,9) = 1,855. \quad (3.4.6)$$

Учитывая (3.4.6), нечеткость моды повлияла на гамма-процентный ресурс до отказа, равный для аналитической модели 2,098. Следует подчерк-

нать, что существенность отличия гамма-процентного ресурса для варианта МД зависит от значения вероятности γ .

На рисунке 3.40 представлены вероятности безотказной работы для остаточного ресурса: 1 – ВБРОР для аналитической модели (2.2.15); 2 – ВБРОР для численной модели (2.2.27) 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.

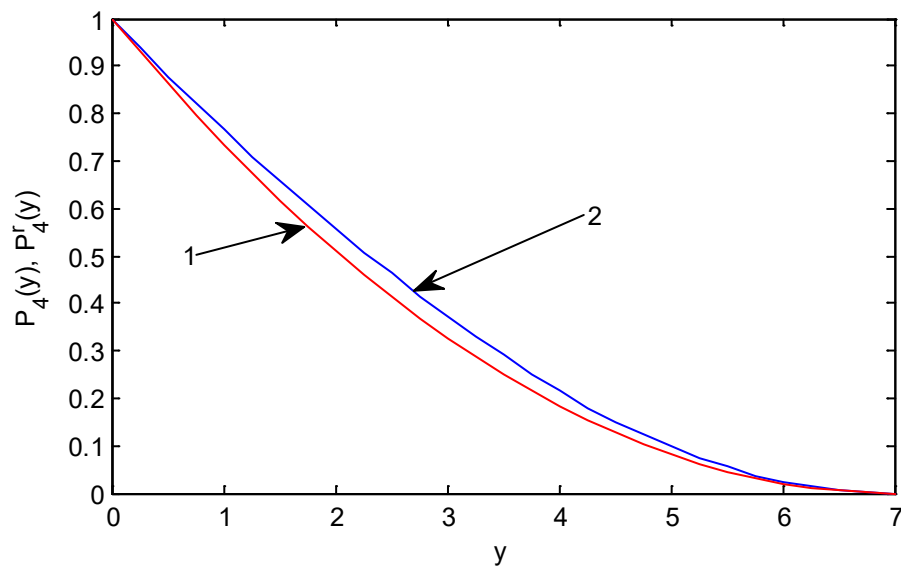


Рис. 3.40. Вероятности безотказной работы для остаточного ресурса, вариант МД, $k_r=0,15$

С учетом (2.2.32) численный средний остаточный ресурс до отказа равен

$$\bar{y}_4 = 2,512. \quad (3.4.7)$$

При $\gamma = 0,9$ с учетом (2.2.33) численный гамма-процентный остаточный ресурс равен

$$\bar{y}_4(0,9) = 0,411. \quad (3.4.8)$$

При сравнении со значениями, полученными по аналитическим моделям (2.2.21) и (2.2.23) ($\bar{y}_4 = 2,333$; $y_4(0,9) = 0,359$), значения (3.4.7) и (3.4.8) увеличились. Нечеткость описания моды влияет и на интенсивность отказов.

Апробация нечеткого численного анализа

вычисления показателей надежности, вариант МД, $k_r=0,50$

Гистограмма частот наработки для этого случая представлена на рисунке 2.12, точечные и интервальные оценки, описывающие моду как случайную величину, представлены в (2.2.51) и (2.2.52).

На рисунке 3.41 представлены вероятности безотказной работы: 1 – ВБР для аналитической модели (2.2.15); 2 – ВБР для численной модели (2.2.27). Нечеткость моды влияет на эту функцию, причем с увеличением коэффициента вариации в большей степени.

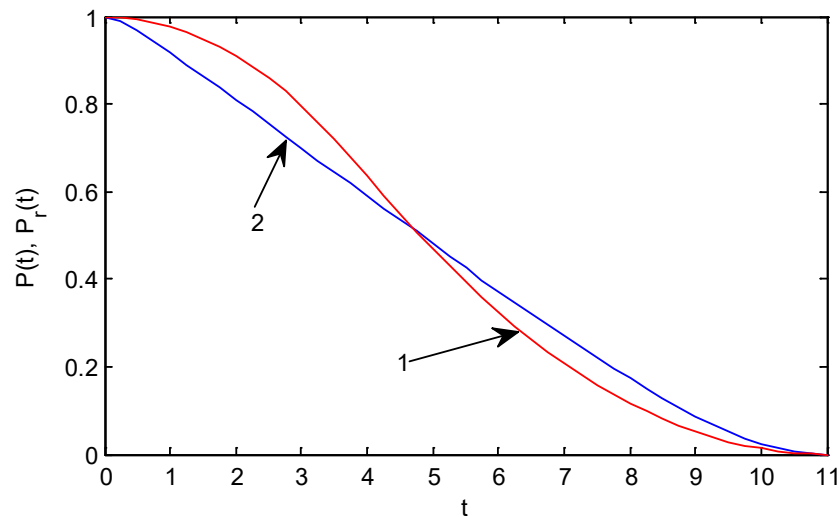


Рис. 3.41. Вероятности безотказной работы, вариант МД, $k_r=0,50$

С учетом (2.2.28) численная средняя наработка до отказа равна

$$\bar{t}_r = 4,923. \quad (3.4.9)$$

Значение (3.4.5) уже отличается от аналитического значения (5), т.е. нечеткость математического ожидания при $k_r=0,50$ повлияла на среднюю наработку до отказа.

При $\gamma = 0,9$ с учетом (2.2.29) численный гамма-процентный ресурс до отказа равен

$$t_r(0,9) = 1,855. \quad (3.4.10)$$

Учитывая (3.4.6), нечеткость моды повлияла на гамма-процентный ресурс до отказа, равный для аналитической модели 2,098. Следует подчеркнуть, что существенность отличия гамма-процентного ресурса для варианта МД зависит от значения вероятности γ .

На рисунке 3.42 представлены вероятности безотказной работы для остаточного ресурса: 1 – ВБРОР для аналитической модели (2.2.15); 2 – ВБРОР для численной модели (2.2.27) 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.

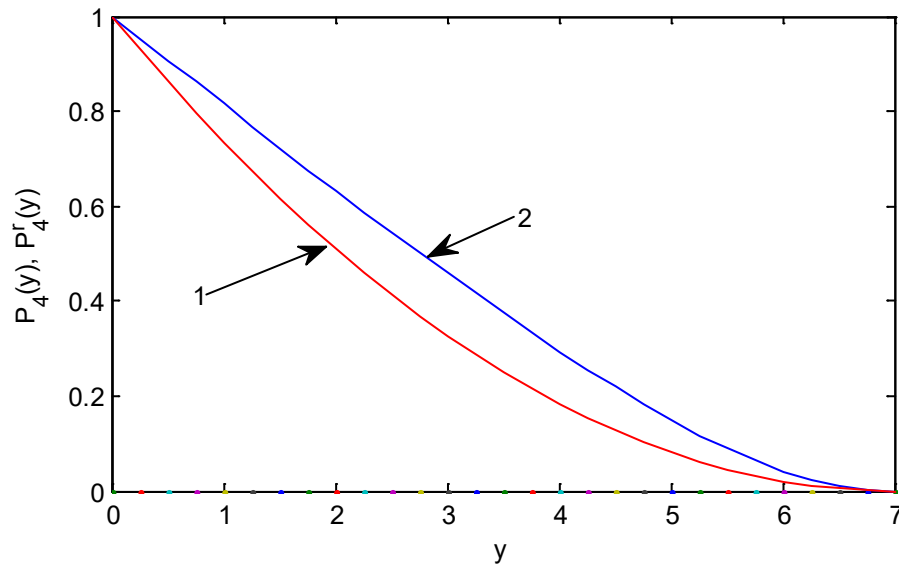


Рис. 3.42. Вероятности безотказной работы для остаточного ресурса, вариант МД, $k_r=0,50$

С учетом (2.2.32) численный средний остаточный ресурс до отказа равен

$$\bar{y}_4 = 2,876. \quad (3.4.11)$$

При $\gamma = 0,9$ с учетом (2.2.33) численный гамма-процентный остаточный ресурс равен

$$\bar{y}_4(0,9) = 0,539. \quad (3.4.12)$$

При сравнении со значениями, полученными по аналитическим моделям (2.2.21) и (2.2.23) ($\bar{y}_4 = 2,333$; $y_4(0,9) = 0,359$), значения (3.4.7) и (3.4.8) существенно увеличились.

На рисунке 3.43 приведены интенсивности отказов: 1 – ИНО для аналитической модели (2.2.16); 2 – ИНО для численной модели (2.2.40). Графическое представление моделей не совсем совпадают, т.е. нечеткость моды влияет на эту функцию.

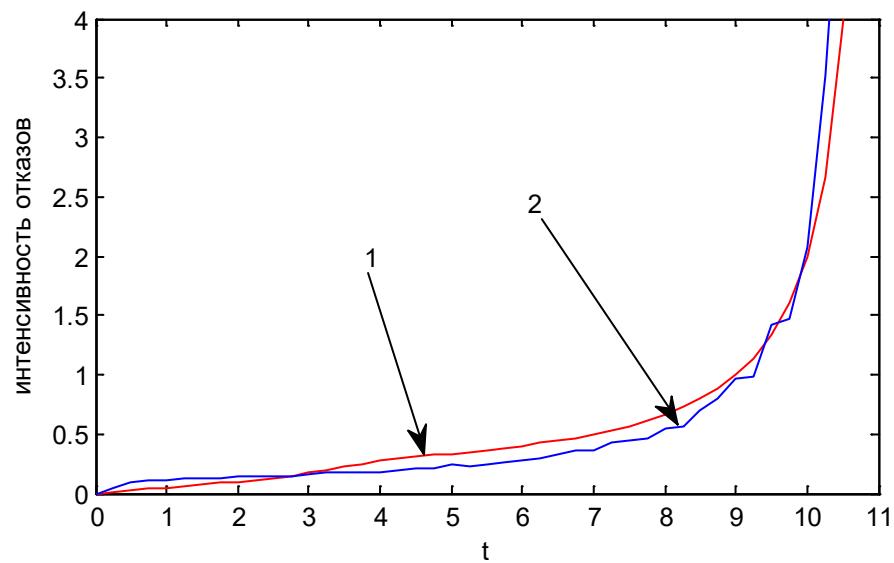


Рис. 3.43. Интенсивности отказов, вариант МД, $k_r=0,50$

Подводя итоги относительно предложенного нечеткого численного анализа для вычисления показателей надежности рельсовых скреплений выделим следующие положения, полученные в результате проведенного исследования:

1. В том случае, когда в условиях неопределенности не удастся однозначно описать наработку как случайную величину, какие-то ее параметры могут стать нечеткими. Применительно к треугольному распределению таким параметром является мода (t_o);
2. Нечеткость моды предложено описывать двумя способами: а) мода описывается как мода, имеющая равномерное распределение на интервале (a , b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента

вариации. В этом случае нечеткий численный анализ при создании выборочных значений использует алгоритм МД; б) мода описывается через математическое ожидание наработки, имеющее равномерное распределение на интервале (a, b) с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации. В этом случае при создании выборочных значений необходимо использовать алгоритм МО;

3. Нечеткое описание наработки как случайной величины оказывает влияние на значения показателей надежности, но эти значения можно получить, используя созданное алгоритмическое обеспечение.

3.5. Выводы по главе 3

1. Создано программное обеспечение «Оценка остаточного ресурса рельсов» (ПО ООРР) 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 мониторинга пути и экспертных оценок.

2. Проведена апробация созданного программного обеспечения с использованием исходных данных диагностического вагона «Декарт» при его использовании 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.

3. Показано, что экспертные оценки меняют значения параметров прогнозных моделей и тем самым влияют и на средний остаточный ресурс рельсов и на гарантированный ресурс. Так как экспертные оценки увеличивают объем исходных данных и учитывают сценарии развития перевозочного процесса в будущем, их использование при оценке показателей остаточного

ресурса рельсов по их боковому износу следует считать целесообразным и эффективным.

4. Проведено тестирование численных алгоритмов показателей надежности рельсовых креплений по аналитическим моделям, созданных на основе предложенного треугольного распределения для наработки до отказа при малом числе наблюдений

5. Проведено исследование нечеткого численного анализа вычисления показателей надежности рельсовых креплений с привлечением экспертной информации по двум предложенным вариантам: а) вариант МО, когда эксперты предлагают считать математическое ожидание наработки случайной величиной с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации; б) вариант МД, когда эксперты предлагают считать наиболее вероятное значение наработки случайной величиной с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами исследования:

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. Получен алгоритм моделирования выборочных значений наработок рельсовых скреплений, основанный на малых по объему статистических данных. Полученный алгоритм протестирован и показал требуемую точность моделирования. Предложен нечеткий численный анализ для оценки показа-

телей 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 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 суждения квалифицированных в предметной области экспертов.

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 мониторинга пути и экспертных оценок. Проведена апробация созданного программного обеспечения с

использованием исходных данных диагностического вагона «Декарт» при его использовании 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.

6. Показано, что экспертные оценки меняют значения параметров прогнозных моделей и тем самым влияют и на средний остаточный ресурс рельсов и на гарантированный ресурс. Так как экспертные оценки увеличивают объем исходных данных и учитывают сценарии развития перевозочного процесса в будущем, их использование при оценке показателей остаточного ресурса рельсов по их боковому износу следует считать целесообразным и эффективным. Проведено тестирование численных алгоритмов показателей надежности рельсовых скреплений по аналитическим моделям, созданных на основе предложенного треугольного распределения для наработки до отказа при малом числе наблюдений. Проведено исследование нечеткого численного анализа вычисления показателей надежности рельсовых скреплений с привлечением экспертной информации по двум предложенным вариантам: а) вариант МО, когда эксперты предлагают считать математическое ожидание наработки случайной величиной с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации; б) вариант МД, когда эксперты предлагают считать наиболее вероятное значение наработки случайной величиной с известными значениями математического ожидания и коэффициента вариации.

7. Апробация созданного алгоритмического и программного обеспечения для мониторинга и оценки показателей надежности компонентов железнодорожного пути подтвердила его работоспособность и практическую значимость. Получен акт внедрения результатов диссертационной работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ададуров С.Е. Оптимизация управления инфраструктурой и безопасностью движения / С.Е. Ададуров, Е.Н. Розенберг, И.Н. Розенберг // Железнодорожный транспорт. – 2009. – № 9. – С. 25-30.
2. Айвазян, С.А. Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: Юнити. – 1998. – 1022 с.
3. Анализ и оценивание рисков информационной безопасности / Корченко А.Г., Архипов А.Е., Казимирчук С.В. К.: ООО «Лазурит-Полиграф». – 2013. – 275 с.
4. Антипов А.Г., Марков А.А. Новые возможности магнитодинамического метода контроля рельсов. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 8. – С. 27-32.
5. Антипов А.Г., Марков А.А. Автоматизация анализа сигналов магнитодинамического метода контроля рельсов. // В мире неразрушающего контроля. – 2014. – № 2(64). – С. 25-30.
6. Архангельский С.В. КВЛ-П2.1 — эффективный инструмент обеспечения безопасности движения на железнодорожном транспорте // Транспортная безопасность и технологии. – 2005. – №2. – С. 36-42.
7. Аштитз Е.С. Развитие системы мониторинга пути // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 30-32.
8. Балдин К.В. Инвестиции: Системный анализ и управление. – М.: Дашков и К°. – 2007. – 206 с.
9. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. – М.: Радио и связь. – 1988. – 392 с.
10. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. – М.: Статистика. – 1980. – 263 с.

11. Бирюзов В.П. Об основных направлениях развития систем диагностики и мониторинга путевого хозяйства до 2025 г. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 4-8.
12. Бокс Дж., Дженкинс Г.М. Анализ временных рядов, прогноз и управление. – М.: Мир. – 1974. – 406 с.
13. Бугаенко В.М. Мониторинг и диагностика инфраструктуры скоростных мобильных комплексов. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 12-16.
14. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. – М.: Наука. – 1988. – 208 с.
15. Вишняков Я.Д., Радаев Н.Н. Общая теория рисков. – М.: Издательский центр «Академия». – 2007. – 368 с.
16. Воробьев О.Ю., Дугин А.Н. Рельсовые скрепления ЖБР. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 20-21.
17. Гапанович В.А. Система УРРАН – универсальный инструмент поддержки принятия решений // Железнодорожный транспорт. – 2012. – №10. – С. 16-22.
18. Гапанович В.А. Математическое и информационное обеспечение системы УРРАН/ В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, И.Б. Шубинский // Надежность. – 2013. – №1. – С. 3-11.
19. Гарт Е. Рельсовое скрепление W30 (VOSSLON). // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 20-21.
20. Головченко В.Б. Прогнозирование временных рядов по разнородной информации. Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН. – 1999. – 88 с.
21. Головченко В.Б., Носков С.И. Оценивание параметров эконометрической модели по статистической и экспертной информации // Автоматика и телемеханика. – 1991. – №4. – С. 123-134.

22. Горделий Л.В. и др. Комплексная оценка состояния рельсов современными средствами дефектоскопии. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 7-8.

23. ГОСТ Р 54505 – 2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. – М.: Изд-во стандартов. – 2011. – 32 с.

24. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов. – 1989. – 36 с.

25. 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.

26. 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.

27. 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.

28. Даваадорж Батбаатар. Численные алгоритмы вычисления показателей надежности рельсовых скреплений / Б. Даваадорж, Ю.М. Краковский // Вопросы естествознания. – 2016. – №2(10). – С. 9-15.

29. 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.

30. 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.
31. Даваадорж Батбаатар. Алгоритмическое обеспечение вычисления показателей надежности рельсовых скреплений / Б. Даваадорж, Ю.М. Краковский // Безопасность критических инфраструктур и территорий: Материалы VII Всеросс. конф. и XVII школы молодых ученых. Екатеринбург: УрО РАН. – 2016. – С. 34–37.
32. Давааням Тамир. Создание модели многофакторного прогнозирования основных показателей УБЖД // Материалы 5-й всероссийской НПК с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2014. – Том 1. – С. 408-413.
33. Давааням Тамир. Многофакторное оценивание показателей перевозочного процесса на основе моделей второго порядка / Ю.М. Краковский, Т. Давааням, А.С. Яхина // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №2(50). – С. 82-85.
34. Давааням Тамир. Комплексное прогнозирование базовых показателей перевозочного процесса / Ю.М. Краковский, Т. Давааням // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – №3(51). – С. 179-184.
35. Давааням Тамир. Алгоритмическое обеспечение комплексного прогнозирования базовых показателей перевозочного процесса. :диссертация к-та техн. наук /Т. Давааням. Иркутск. – 2017. – 127 с.
36. Добронец Б.С., Попова О.А. Численный вероятностный анализ неопределенных данных. Красноярск: Сиб. Федер. Ун-тет. – 2014. – 167 с.
37. Добронец Б.С., Попова О.А. Элементы численного вероятностного анализа. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – №2. – С. 19-23.

38. Домбровский И.А., Краковский Ю.М. Прогнозирование показателей грузовых перевозок Улан-Баторской железной дороги // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – №4. – С. 225-228.
39. Домбровский И.А. Вероятностный анализ безубыточности грузовых перевозок на основе метода Монте-Карло / И.А. Домбровский, Ю.М. Краковский // Известия Трансиба. – 2013. – №1 (13). – С. 125-130.
40. Домбровский И.А., Краковский Ю.М. Прогнозирование грузооборота дороги на основе статистической и экспертной информации // Вестник стипендиатов DAAD. – 2013. – Т.1. – №1-1(10). – С. 18-25.
41. Домбровский И.А. Исследование показателей грузовых перевозок на основе статистической и экспертной информации // Материалы 5-й всероссийской НПК с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2014. – Том 1. – С. 142-145.
42. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика. – 1973. – 342 с.
43. Дубров А.М. Многомерные статистические методы для экономистов и менеджеров / А.М. Дубров, В.С. Мхитарян, Л.И. Трошин. – М: Финансы и статистика. – 2003. – 352 с.
44. Егоров А.О. Вагон - путеобследовательская станция ЦНИИ-4МД /А.О. Егоров, Б.Н. Зензинов, П.Н. Кулешов // Путь и путевое хозяйство. – 2006. – № 6. – С. 17–24.
45. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. М.: Наука, 1982. 296 с.
46. Ефимов А.Т. Оценка остаточного ресурса металлических пролетных строений современными диагностическими средствами. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 12-14.
47. Закс Л. Статистическое оценивание – М.: Статистика. – 1976. – 598 с.

48. Зверев А.В. Тандем АСТРА-КАСКАД – диагностика и мониторинг / А.В. Зверев // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – №3. – С. 69-71.
49. Игонькин С.Н. О методах статистического анализа состояния рельсовой колеи. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 29-31.
50. Кашкимбаев Ж.Б., Уразбеков А.И. Развитие системы диагностики и мониторинга инфраструктуры АО НК «Казакстан тетір жолы». // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 25-27.
51. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Спб.: Питер. – 2004. – 847 с.
52. Кириленков С.А. Опыт эксплуатации скреплений VOSSLOH и RANDROL на Октябрьской дороге. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 24-25.
53. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. – М.: Физматлит. – 2006. – 238 с.
54. Комплексный анализ состояния рельсового пути с помощью нового вагона-дефектоскопа АВИКОН-03М./ Марков А.А. и др. // В мире неразрушающего контроля. – 2013. – № 3(61). – С.74-79.
55. Конаков В.Л. Комплексная оценка состояния пути/ В.Л. Конаков и др. // Железнодорожный транспорт. – 2013. – №3. – С. 64-67.
56. Косарев А.Б. и др. О нормативно-техническом обеспечении диагностики и мониторинга объектов путевой инфраструктуры. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 28-29.
57. Королев В.Ю. Математические основы теории риска / В.Ю. Королев, В.Е. Бенинг, С.Я Шоргин. – М.: Физматлит. – 2011. – 620 с.
58. Кохрен У. Методы выборочного исследования. – М.: Статистика. – 1976. – 440 с.
59. Краковский Ю.М., Карнаухова В.К. Моделирование регионального рынка образовательных услуг: мониторинг, анализ, прогнозирование. - Palmarium Academic Publishing. – 2012. – 208 с.

60. Краковский Ю.М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. Новосибирск: Наука. – 2006. – 228 с.

61. Краковский Ю.М., Начигин В.А., Начигин А.В. Оценка технического состояния рельсов по данным мониторинга пути. // Вестник ВНИИЖТ. – 2012. – №5. – С. 40-43.

62. Краковский Ю.М., Начигин В.А. Прогнозирование бокового износа рельсов как процедура оценки их остаточного ресурса. // Контроль. Диагностика. – 2010. – №6. – С. 30-35.

63. Краковский Ю.М., Начигин А.В., Лукьянов Д.А. Автоматизированный расчет показателей динамических рисков при наличии отказов технических средств // Известия Транссиба. – 2013. – №4 (16). – С. 84-88.

64. Краковский Ю.М., Начигин В.А. Формализация селективной технологии содержания инфраструктуры и страховой фонд. // Мир Транспорта. – 2015. – №1. – С. 94-99.

65. Краснов О.Г., Анашев М.Г., Ефименко А.В. Результаты оценки состояния пути диагностическим поездом геометрически-силовым методом. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 9. – С. 20-24.

66. Кузнецов В.В. Мониторинг работы скрепления APC. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 18-23.

67. Лapidус В.А. Методика оценки показателей процессов, влияющих на безопасность движения на основе оценки рисков. / В.А. Лapidус. – М.: ЗАО «Центр «Приоритет». – 2011. – 12 с.

68. Лебедев А.В., Петров А.В. Совершенствование конструкции рельсового скрепления ПФК-350. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 1. – С. 17-20.

69. Левин Д.Ю. Управление перевозочным процессом на железнодорожном Транспорте // Труды конференции «Технические и программные

средства систем управления, контроля и измерений»». – М.: МИИТ. – 2010. – С. 74-81.

70. Лузгин А.Н. адаптивная вероятностно-статистическая модель интервального прогнозирования нестационарных динамических показателей /А.Н. Лузгин, Ю.М. Краковский // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 1. – С. 80-84.

71. Лузгин А.Н. Комплексное исследование интервального прогнозирования нестационарных показателей с применением кластерных и нейронных моделей: диссертация к-та техн. наук /А.Н. Лузгин. Иркутск. – 2015. – 151 с.

72. Мазов Ю.Н., Сычев В.П. Обоснование классификации и сроков замены остродефектных рельсов. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 8-12.

73. Макаров А.В. Оценка состояния конструкции скреплений в пути в зависимости от их деформируемости // Вестник ВНИИЖТ. – 2015. – №3. – С. 53-57.

74. Максимцев С.В., Начигин В.А., Архипенко Ю.А. Скрепления как основной элемент стабильности верхнего строения. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 6. – С. 8-12.

75. Марков А.А. Комплексный диагностический мониторинг рельсового пути // В мире неразрушающего контроля. – 2008. – №3. – С. 34-36.

76. Марков А.А. Современное состояние, проблемы и направления развития диагностики рельсов и элементов инфраструктуры. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 19-24.

77. Марков А.А. Зарубежные системы контроля рельсов // Путь и путевое хозяйство. – 2010. – №9. – С. 32-40.

78. Марков А.А., Антипов А.Г. Магнитодинамический метод контроля рельсов в вагонах-дефектоскопах. // Путь и путевое хозяйство. – 2012. – №12. – С. 9-12.

79. Михалкин И.К., Симаков О.Б. Новые задачи и принципы построения системы диагностики и мониторинга инфраструктуры ОАО «РЖД». // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 4. – С. 9-11.

80. Морозов В.Н. Транссиб – национальная магистраль международного значения. // Железнодорожный транспорт. 2013, №11. С. 6-9.

81. Надежность железнодорожного пути / Под ред. В.С. Лысюка. – М.: Транспорт. – 2001. – 286 с.

82. Надежность технических систем. / Под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь. – 1985. – 608 с.

83. Начигин А.В. Алгоритмическое и математическое обеспечение вычисления показателей опасности и динамического риска при отказах технических средств: диссертация к-та техн. наук /А.В. Начигин. Иркутск. – 2013. – 136 с.

84. Начигин В.А., Краковский Ю.М. Программное обеспечение по прогнозированию остаточного ресурса рельсов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2009. – № 4. – С. 180-184.

85. Начигин В.А. Об определении остаточного ресурса рельсов. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 26-28.

86. Начигин В.А. Разработка моделей и программных средств для прогнозирования остаточного ресурса рельсов: диссертация к-та техн. наук /В.А. Начигин. Иркутск. – 2010. – 127 с.

87. Начигин В.А., Краковский Ю.М. Металлические части пути как компоненты его эффективной эксплуатации // VII Международная НПК «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: – 2016. – Том 1. – С. 482-486.

88. Нго З. Д. Имитационная модель многокомпонентного оборудования для определения закона распределения его наработки / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 7. – С. 25 – 32.

89. Нго З. Д. Вычислительный алгоритм численной оценки параметра потока отказов многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 10. – С. 15 – 20.

90. Нго З. Д. Численные модели оценки показателей надежности многокомпонентного оборудования по результатам компьютерного моделирования / Ю. М. Краковский, О. А. Захарова, З. Д. Нго // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – № 4. – С. 66 – 70.

91. Нго З. Д. Численные модели оценки коэффициента оперативной готовности и параметра потока восстановления многокомпонентного оборудования / Ю. М. Краковский, З. Д. Нго // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2016. – № 1 (49). – С. 55 – 59.

92. Нго З.Д. Численные алгоритмы для исследования показателей надежности многокомпонентного оборудования по результатам компьютерного моделирования: диссертация к-та техн. наук /З.Д. Нго. Иркутск. – 2016. – 141 с.

93. Об утверждении стратегии обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в холдинге «РЖД». / Распоряжение ОАО «РЖД» № 197р от 28.01.2013.

94. О внесении изменений в приказ Министерства транспорта РФ №163 от 25 декабря 2006 г.: приказ Министерства транспорта РФ от 5 ноября 2011 г. № 180 // . Бюллетень нормативных актов федеральных органов исполнительной власти. 29 декабря 2008 г. № 52.

95. Панкова Л.А. Организация экспертиз и анализ экспертной информации/ Л.А. Панкова, А.М. Петровский, М.В. Шнейдерман. – М.: Наука. – 1984. – 120 с.

96. Петров А.В., Савин А.В., Лебедев А.В. Анализ требований российских и европейских стандартов по рельсовым скреплениям. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 9. – С. 22-27.

97. Петров А.В., Савин А.В., Лебедев А.В. Рельсовые скрепления безбалластовых конструкций пути на экспериментальном кольце ОАО «ВНИИЖТ». // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 12. – С. 2-5.

98. Положение о порядке учёта, расследования и анализа случаев технологических нарушений с использованием системы КАСАТ на Восточно-Сибирской железной дороге (утверждено распоряжением первого заместителя начальника дороги от 6.07.2012, № ВСЖД-721).

99. Положение по учету, расследованию и проведению анализа случаев отказов в работе технических средств (утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 9.07.2010, №1493р). М.: ОАО «РЖД». – 2010. – 133 с.

100. Попова О.А. Информационная поддержка оценки показателей надежности для оборудования ответственного назначения. // Информатизация и связь. – 2015. – №3. – С. 41-46.

101. Сазонов В.Н. О комплексном подходе к мониторингу объектов путевого хозяйства. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 4. – С. 33-35.

102. Седелкин Ю.А., Атапин В.В. Анализ состояния верхнего строения пути и земляного полотна на основе результатов обследования диагностическими средствами. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 7. – С. 13-15.

103. Седелкин Ю.А., Атапин В.В. Новые горизонты технологии УР-РАН. // Путь и путевое хозяйство. – 2015. – № 8. – С. 15-17.

104. Сомерсет М. Рельсовые скрепления PANDROL FASTCLIP. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 7. – С. 20-22.

105. Стратегии обеспечения гарантированной безопасности и надежности перевозочного процесса в ОАО «РЖД» (утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 29 мая 2007 г. № 987р). – М.: ОАО «РЖД». – 2007. – 141 с.

106. Теория систем и системный анализ в управлении организации / Под ред. А.А. Емельянова. – М.: Финансы и статистика. – 2006. – 848 с.

107. Тематическая подборка «Внедрение методологии УРРАН на железнодорожном транспорте» . Общ.28/13 (527) – ТП – 60 – 2012. Иркутск: – 2012. – 40 с.

108. Технический регламент Таможенного союза «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011). Утвержден решением комиссии Таможенного союза №710 от 15.07.2011.

109. Тишанин А. Г. Концепция ситуационного центра мониторинга и управления чрезвычайными ситуациями ОАО «РЖД», М.: ОАО «РЖД». – 2010. – 25 с.

110. Типовой технологический процесс эксплуатации автоматизированной системы ведения и анализа графика исполненного движения ГИД «Урал-ВНИИЖТ» поездным диспетчером и дежурным по станции (утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 10.10.2005). – М.: ОАО «РЖД». – 2005. – 102 с.

111. Тюрин Ю.Н., Макаров А.А. Анализ данных на компьютере. – М.: Финансы и статистика. – 1995. – 384 с.

112. Утверждение стандартов и методик ОАО «РЖД» в развитие системы управления безопасностью движения на основе анализа рисков, методов и инструментов технического аудита (утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 21 сентября 2011 г. № 2068р), М.:ОАО «РЖД». – 2011. – 181 с.

113. Уткин Л.В., Уткин В.С. Структурная надежность систем при неполной статистической информации о параметрах модели // Надежность. – 2009. – № 3 (36). – С. 28-36.

114. Федеральный закон о железнодорожном транспорте в редакции от 02.07.2013 № 185-ФЗ.

115. Федоров Ю.Н. Повышение эффективности управления холдингом «РЖД» за счет формирования оптимальной структуры органов регионального управления основной деятельностью // Экономика железных дорог. – 2013. – №11. – С. 41-46.

116. Фролов В.Ф. Системный подход к исследованию перевозочного процесса Восточно-Сибирской железной дороги // Материалы 4-й всероссийской НПК с международным участием «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск. – 2013. – С. 75-77.

117. Фролов В.Ф. Алгоритмическое обеспечение оценки целевых показателей перевозочного процесса / В.Ф. Фролов, С.К. Каргапольцев, В.А. Начигин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – №4. – С. 152-156.

118. Фролов В.Ф. Процедура выбора предпочтительного сценария развития перевозочного процесса / В.Ф. Фролов, В.А. Начигин // Известия Трансиба. – 2014. – №1. – С. 109-115.

119. Фролов В.Ф. Новые подходы к управлению перевозочным процессом в условиях динамичного изменения внешней среды / В.Ф. Фролов // Железнодорожный транспорт. – 2014. – №4. – С. 14-18.

120. Цивинская М.А. Рельсовые скрепления SBS SL-1 (SCHWING). // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 8. – С. 20-21.

121. Черноруцкий И.Г. Методы принятия решений. Спб.: БХВ-Петербург. – 2005. – 416 с.

122. Чуканов В.О. Надежность программного обеспечения и аппаратных средств систем передачи данных атомных электростанций. – М.: Диалог-МИФИ. – 2008. – 168 с.

123. Шилов М.Н., Коротин В.А. Комплексная диагностика пути в республике Казахстан. // Путь и путевое хозяйство. – 2016. – № 8. – С. 12-14.

124. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. – М.: Академия. – 2010. – 304 с.

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

126. Яновский Л.П. Введение в эконометрику/ Л.П. Яновский, А.Г. Буховец. – М.: КНОРУС. – 2007. – 255 с.

127. Davaadorge Batbaatar, Kargapoltoev Sergey. Algorithmic Base for Prognosis the Rail Residual 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.

128. Krakovskiy Y., Maklygin N., Nachigin A. The Scenario Approach for Prediction of Indicators Transportation Process // The Fifth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR-2016). Nanchang, China, October 20-21, 2016. P. 620-623. Другая база

129. Krakovskiy Yuri, Davaanyam Tamir, Luzgin Aleksandr. Improving the Eastern Polygon Management-Regarding the Need for Logistic // The Fifth International Symposium on Innovation and Sustainability of Modern Railway (ISMR-2016). Nanchang, China, October 20-21, 2016. P. 617-619. Другая база