

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский университет транспорта (МИИТ)»

РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Сычев Петр Вячеславович

Совершенствование системы технического обслуживания железнодорожного
пути на основе моделирования закономерностей его изменения и автоматизации
процессов производства

05.22.06 – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных
дорог

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

Доктор физико-математических наук, профессор

Локтев Алексей Алексеевич

Москва 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
 ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С ОБОСНОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ С РАЗРАБОТКОЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ	16
1.1. Выбор работ и средств механизации в системе технического обслуживания и ремонтов пути, имеющих наибольший процент ручного труда и влияния на перевозочный процесс	16
1.1.1. Анализ технологии работ.	16
1.1.2. Анализ средств механизации.	19
1.2. Оценка потребности в хоппер-дозаторах для выполнения плановых работ по техническому обслуживанию и ремонтам железнодорожного пути и объемов выгружаемого балласта	23
1.3. Разработка структурной схемы АСУ ТП техническим обслуживанием железнодорожного пути и обоснование возможности ее создания.....	26
1.3.1. Автоматизированная система железнодорожным транспортом (АСУЖТ)	26
1.3.2. Автоматизированная система управления технологическими процессами	28
1.3.3. Разработка структурной схемы АСУ ТП техническим обслуживанием и ремонтами железнодорожного пути.....	29
1.4 Анализ возможности формирования технической и информационной базы АСУ ТП ТО на основе эксплуатируемых вагонов - путеизмерителей	35
1.5 Анализ возможности применения для формирования технической и информационной базы АСУ ТП ПВ микропроцессорных систем управления рабочими органами выправочно-подбивочно-рихтовочных путевых машин.....	39
1.5.1. Анализ математического обеспечения микропроцессорной системой выправки и рихтовки	39
1.5.2 Техническое обеспечение системы.	45
1.6. Зарубежный опыт автоматизации процессами выгрузки и укладки балласта в путь.....	50
1.7. Выводы по первой главе	54
 ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕНДОВ С УЧЕТОМ КОРРЕЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПУТИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПУТЕВЫХ РАБОТ.	56

2.1. Методы прогнозирования изменения технического состояния железнодорожного пути.....	56
2.2 Теоретические основы адаптивного алгоритма мониторинга состояния рельсовой колеи на основе информации, полученной от вагонов путеизмерителей.....	60
2.3. Основные принципы построения моделей для стационарных и квазистационарных режимов ..	63
2.4 Построение адаптивных моделей и разработка алгоритма прогнозирования состояния рельсовой колеи по показаниям вагона путеизмерителя.....	67
2.5. Фильтрация информации о состоянии железнодорожного пути, получаемая с вагона-путеизмерителя.....	73
2.6. Восстановление плотности распределения исходных данных получаемых в процессе диагностирования состояния железнодорожного пути для формализации адаптивных моделей прогнозирования его состояния	75
2.7. Алгоритм работы моделей прогнозирования возможного появления дефектов железнодорожного пути в условиях неполной информации	86
2.8. Оценивание значений функции распределения неисправностей пути до повторного появления после устранения.....	92
2.9. Проверка статистических гипотез.....	93
2.10. Автоматизированное распознавание поверхностных дефектов верхнего строения пути с использованием примитивов Хаара и модифицированного алгоритма Лукаса-Канаде.....	96
Выводы по второй главе.....	106
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ АНАЛИЗА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ.....	109
3.1. Выбор участков железнодорожного пути для эксперимента	109
3.2. Формирование матрицы наблюдений. Фильтрация исходных данных.....	112
3.3. Оценка выявленных закономерностей изменения состояния железнодорожного пути по моделям	114
3.3.1. Анализ закономерностей по полиномиальным и линейным моделям.....	114
3.3.2. Оценка точности прогноза по линейным и полиномиальным моделям и проверка закона распределения оценок участка пути	117
3.3.3. Оценка износа рельсов, влияющих на оценку состояния железнодорожного пути по показаниям вагона путеизмерителя.....	120

3.4. Выбор оптимальных параметров адаптации и проверка моделей прогнозирования по цензурированным выборкам	127
3.4.1. Определение оптимальных параметров адаптации.	127
3.5. Экспериментальная проверка моделей закономерностей развития неисправностей рельсовой колеи на основе сформированной матрицы показаний вагона путеизмерителя как цензурированной выборки.....	130
3.6 Прогнозирование трудозатрат множественной регрессией.	134
3.7. Заключение по третьей главе	135
 ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К МОДЕРНИЗАЦИИ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АСУ ТП ВЫГРУЗКОЙ И УКЛАДКОЙ БАЛЛАСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	137
4.1. Требования к технологии.....	137
4.2. Разработка системы дистанционного автоматического управления разгрузочно-дозирующими механизмами хоппер-дозатора ВПМ 770	138
4.2.1. Анализ системы управления разгрузочно-дозирующими механизмами хоппер-дозатора ВПМ 770 обеспечить автоматическое дистанционного управление крышками	138
4.2.2. Разработка привода дистанционного автоматического управления крышками разгрузочных люков хоппер-дозатора ВПМ 770.....	140
4.2.3. Разработка усовершенствованной конструкции крышки управления выгрузкой балласта	143
4.3. Классификация способов синхронизации управления выгрузкой балласта из хоппер-дозатора и выбор наиболее эффективного способа	146
4.3.1. Классификация способов синхронизации.....	146
4.3.2. Схема гидропривода с дроссельным способом.....	147
4.3.3. Способ синхронизации регулятором потока	147
4.3.4. Способ синхронизации делителем потока.....	150
4.3.5. Способ синхронизации сумматором потока.....	150
4.3.6. Машинный способа синхронизации.....	150
4.3.7. Способ синхронизации спаренными гидромоторами.....	150
4.3.8 последовательным соединением гидроцилиндров или гидромоторов	150
4.3.9. Схема синхронизации дозатором	151
4.4. Синхронизации управлением выгрузкой и укладкой балласта хоппер-дозаторами ВПМ 770 с рабочими органами машины типа ВПР	151
4.5. Разработка технических требований к конструкции системы управления разгрузочно-дозирующим механизмом.....	158

4.6. Экспериментальная проверка алгоритма автоматизированного дозирования балласта с дистанционным автоматическим управления разгрузочно-дозировующим механизмом хоппер-дозатора.....	160
4.7. Выводы по главе 4	164
ЛИТЕРАТУРА.....	165
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	190
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	211
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	219

**Совершенствование системы технического обслуживания
железнодорожного пути на основе моделирования закономерностей его
изменения и автоматизации процессов производства**

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы определяется стратегией развития холдинга «РЖД» на период до 2030 года, утверждённой советом директоров ОАО «РЖД» от 23 декабря 2013 г. № 19, а также иницилируемым ОАО «РЖД» проектом «Цифровая железная дорога» с целью повышения конкурентоспособности и эффективности деятельности холдинга ОАО «РЖД» за счет применения прорывных информационных технологий и Распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2017 г. №1632-р. Вопросы интеграции проекта «Цифровая железная дорога» в Цифровую экономику Российской Федерации.

Одной из задач проекта «Цифровая железная дорога» является повышение производительности труда за счет создания информационных и микропроцессорных автоматизированных систем управления технологическими процессами; сокращение влияния «человеческого фактора». В этой связи особое внимание уделяется процессам содержания железнодорожного пути как основы обеспечения перевозочного процесса железных дорог.

До настоящего времени техническое обслуживание железнодорожного пути в значительной степени было основано на ручном труде с применением средств малой механизации. Особенно это касается работ по текущему содержанию пути из которых более 60% от общего объема этих работ занимает работа с балластом. Применение ручного труда при техническом обслуживании железнодорожного пути и основной его составляющей текущего содержания пути снижает качество эксплуатации железнодорожного пути, увеличивает время путевых работ, что в первую очередь негативно влияет на перевозочный процесс. На перевозочный процесс негативное влияние оказывает появление отступлений от норм содержания рельсовой колеи 3 и 4-й степеней в силу того, что отмеченные

вагоном путеизмерителем отступления 2-х степеней не были устранены в плановом порядке до их развития. Выявить потенциально опасные отступления 2-й степени, которые могут к следующему проходу вагона путеизмерителя достичь 3 и 4-й степеней задача прогнозирования, которую вручную не решить. Создание хоппер-дозатора с прерывистой выгрузкой ВПМ 770 позволило изменить технологию технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути. С конца прошлого века в путевом хозяйстве активно внедряется многоуровневая автоматизированная система АСУ-путь, преимущественно на базе автоматизированных рабочих мест (АРМ) специалистов, занятых в путевом хозяйстве и объединенные в одну сеть на уровне железной дороги, которая относится к информационным системам, которые существенным образом обеспечили совершенствование планирования путевых работ за счет автоматизации сбора и выдачи в установленном виде информации о ходе производственного и технологического процесса. Однако в этой системе основная роль в принятии решений принадлежит человеку. К информационной системе следуют отнести и автоматизированную систему диагностики и оценки состояния железнодорожного пути, установленную на вагонах путеизмерителях, которая позволяет в автоматическом режиме записывать геометрические параметры рельсовой колеи, обрабатывать информацию по оценке превышения пороговых значений отклонений от норм содержания пути, обрабатывать полученную информацию с целью планирования путевых работ.

Таким образом, актуальность работы определяется необходимостью дальнейшего развития автоматизированных систем управления путевым хозяйством в свете решения задач цифровой железной дороги, необходимостью повышения производительности труда при производстве путевых работ в условиях ограничения выделяемых на содержание железнодорожного пути ресурсов, модернизации технических средств обслуживания пути и автоматизации технологических процессов, исключением ручного труда и минимальным влиянием человеческого фактора на процессы путевых работ.

Степень разработанности темы. Над вопросами совершенствования системы организации технического обслуживания железнодорожного пути с переходом на механизированный способ ведения путевого хозяйства успешно работали такие ученые как Тихомиров В.И., Исаев К.С., Федулов В.Ф., Хоменко Д.П., Крейнис З.Л., Стельмашов В.Н., Певзнер В.О., Виноградов В.В., Каменский В.Б., Сычев В.П., Шац Э.Я., Филипов В.М. Проблемой автоматизации управления технологическими процессами технического обслуживания железнодорожного пути в части создания микропроцессорной системы управления выправкой и рихтовкой железнодорожного пути как первой и пионерной работы в области автоматизации технологических процессов выправкой и подбивкой пути внесли Бредюк В.Б., Ершова К.Б., Бучкин В.А., Лебедев А.А. Шварцфельд В.С. и другие исследователи. Совершенствованием системы диагностики железнодорожного пути и оценки качества его содержания на основе создания современных конструкций путеизмерительных вагонов занимались Исаев К.С., Певзнер В.О., Щекотков Ю.М., Зензинов Б.Н. и другие. Над разработкой моделей прогнозирования развития неисправностей пути по показателям вагонов путеизмерителей и на их основе планирования путевых работ как одного из этапов совершенствования системы технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути работали Певзнер В.О., Крейнис З.Л., Тихомиров В.И. Мишин В.В., Виноградов В.В., Ашпиз Е.С., Сычев В.П., Коган А.Я., Блажко Л.А., Прохоров В.М., Савин А.В. и другие исследователи., а над созданием интеллектуальных систем управления железнодорожным транспортом Розенберг И.Н., Лёвин Б.А., Ададуров С.Е. Розенберг Е.Н., Уманский В.И., Гапанович В.А. др.

Цели и задачи исследования.

Цель работы. Совершенствование системы технического обслуживания железнодорожного пути на основе моделирования закономерностей его изменения, модернизации технических средств и автоматизации процессов производства путевых работ по выгрузки и укладки балласта в путь, исключая влияние на процесс человеческого фактора и применение ручного труда с обеспечением повышением производительности труда и оптимальным расходом балластных материалов.

Задачи. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Обосновать возможность автоматизации технологического процесса выгрузки и укладки балласта в путь при планово-предупредительной выправке пути на основе эксплуатируемых путевых машин и средств механизации, с разработкой технических требований к их модернизации и создания автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) техническим обслуживанием железнодорожного пути;
2. Разработать математические модели анализа закономерностей изменения состояния железнодорожного пути и прогнозирования появления неисправностей до уровня, негативно влияющего на перевозочный процесс;
3. Разработать математические модели и алгоритм оценки объемов выгружаемого их хоппер-дозаторов балласта потребных для сдвижек и подъемов железнодорожного пути, рассчитываемых при работе путевых машин, оборудованных микропроцессорной системой управления рабочими органами;
4. Разработать технические требования к дистанционному автоматическому управлению выгрузкой и укладкой балласта в железнодорожный путь с синхронизацией управления выгрузкой балласта и модернизацией системы управления разгрузочно-дозирующими устройствами хоппер-дозатора.

Объект исследования. Система технического обслуживания железнодорожного пути, технологических процессов выправки и рихтовки пути и работы с балластными материалами и автоматизации этих процессов,

математического моделирования анализа закономерностей изменения технического состояния железнодорожного пути, модернизации средств механизации в системе технического обслуживания железнодорожного пути.

Предмет исследования. Технологические процессы технического обслуживания железнодорожного пути, автоматизация управления этими процессами, технические средства механизации при работе с балластом математические модели прогнозирования изменения состояния пути.

Научная новизна состоит в том, что:

- разработаны научно-обоснованные требования к автоматизации технологических процессов в системе технического обслуживания и ремонтов пути при работе с балластом и модернизации средств механизации выгрузки и укладки балласта в путь и обоснована возможности создания автоматизированной системы управления технологическим процессом технического обслуживания железнодорожного пути (АСУ ТП ТО) с разработкой ее структурной схемы и **впервые** практической реализацией в виде АСУ ТП управления процессами выгрузки и укладки балласта в путь;

- разработаны **новые** адаптивные модели анализа закономерностей изменения состояния железнодорожного пути по показаниям вагона путеизмерителя с прогнозированием их развития до неисправности, негативно влияющих на перевозочный процесс и **впервые** на основе физико-вероятностного анализа и классификации плотности распределений показаний вагона путеизмерителя как случайного процесса разработан метод их восстановления и способ корректировки модели в процессе ее эксплуатации в АСУ ТП ТО;

- **впервые** предложено для повышения точности прогноза в моделях прогнозирования развития неисправностей пути ввести понятие кластера состояния пути по показаниям вагона путеизмерителя, динамически обновляемого при каждом проходе вагона путеизмерителя и обосновано их разбиение на множество нечётких зон, объединяемых множеством развивающихся нечётких кластеров гауссовых композиционных моделей (Gaussian Mixture Model, GMM);

- построены закономерности изменения состояния пути на основе разработанных моделей с использованием основных положений теории цензурированных выборок и разработаны алгоритмы анализа состояния железнодорожного пути на основе построенных моделей для выявления трендов с учетом корреляции параметров **впервые** с обоснованием возможности применения примитивов Хаара и модифицированного алгоритма Лукаса-Канаде для автоматического распознавания дефектов железнодорожного пути;

- разработаны модель и **впервые** алгоритм расчета потребного для устранения выявленных прогнозируемых дефектов пути объема выгружаемого балласта с подачей сигнала на управление рабочими органами путевой машины;

- разработаны предложения по совершенствованию конструкции технических средств, применяемых при техническом обслуживании железнодорожного пути при работе с балластом, исключающие применение ручного труда и влияние человеческого фактора на принятие решений управления технологическим процессом технического обслуживания и ремонтов пути, защищенная патентами на изобретения и полезную модель;

- проведен теоретический анализ способов синхронизации управления крышками разгрузочных люков хоппер-дозатора и рабочих органов путевых машин с разработкой **впервые** системы дистанционного управления крышками встроенная в единую систему управления технологическим процессом планово-предупредительной выгрузки пути, защищенная патентами на изобретения и полезную модель.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке научно-обоснованных требований к автоматизации системы управления технологическим процессом технического обслуживания железнодорожного пути и его частного случая выгрузки и укладки балласта в путь, математических моделей прогнозирования закономерностей изменения состояния пути, расчета объема потребного для заданных или плановых величин подъемов и сдвижек пути балласта с применением современных теорий и алгоритмов гаусовских композиционных моделей, примитивов Хара, алгоритмов Лукаса –Канаде,

цензурированных выборок, физико –математического анализа плотности и классификации распределения показаний вагона-путьеизмерителя как случайной величины с разработкой метода их восстановления. Разработаны технические требования к модернизации средств механизации выгрузки и укладки балласта в путь, применяемых при техническом обслуживании пути полностью исключают ручной труд и управляемые автоматически по построенным моделям и алгоритмам, исключают влияние человеческого фактора на принятие решений и защищены патентами на изобретения и полезные модели.

Практическая значимость работы заключается в разработке моделей и алгоритмов оценки содержания железнодорожного пути для выявления трендов с учетом корреляции параметров и прогнозирования появления дефектов пути, негативно влияющих на перевозочный процесс, и построения зависимостей изменения состояния пути, которые используются при планировании путевых работ. Результаты исследований использованы при разработке технологических процессов планов-предупредительной выправкой пути.

Внесены изменения в конструкторскую документацию на серийно выпускаемый хоппер-дозатор ВПМ 770 по совершенствованию конструкции разгрузочно-дозировочных устройств и их автоматического дистанционного управления, исключают применение ручного труда, увеличивающие на 5% полезную составляющую «окна» за счет снижения времени подготовительных работ и позволяющие экономить до 20% балласта за счет рационального расходования.

Разработаны технические требования на автоматизированную систему управления технологическим процессом выгрузки и укладки балласта в путь, как составной части автоматизированной системы управления технологическими процессами технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути.

Результаты исследования позволили: сократить время «окна» или увеличить полезную составляющую «окна» на производство путевых работ за счет дистанционного управления выгрузкой и укладкой балласта в путь на основе автоматизированного объема выгружаемого балласта, исключить ручной труд при путевых работах с балластом и минимизировать расходование балласта за счет автоматического расчета объема выгружаемого балласта строго потребного для работы путевой машины с автоматической выгрузкой и рихтовкой пути;

Методология и методы исследования.

Теоретический анализ, систематизация, математическое моделирование, оценка применимости современных математических, преимущественно статистических и вероятностных методов: адаптивного прогнозирования параметрических и непараметрических моделей для стационарных и квазистационарных режимов; классификации сложных объектов; оценивания статистических величин с неопределенной функцией распределения по цензурированным выборкам.

Положения, выносимые на защиту

-выбор и обоснование адаптивных моделей выявления трендов закономерности изменения состояния пути с учетом корреляции параметров по прогнозированию появления неисправностей железнодорожной колеи, негативно влияющих на перевозочный процесс;

- метод восстановления плотности распределения показаний вагона путеизмерителя, как случайного процесса с использованием частных производных Махалобиса и способ корректировки построенной модели в процессе ее эксплуатации и применимости адаптивной настройки

- теоретическое обоснование кластеризации показаний вагона путеизмерителя при анализе закономерностей изменения состояния пути и применимости вводимого понятия «кластер состояния пути по показаниям вагона путеизмерителя» с разбиением информации о состоянии пути на множество нечетких зон, динамически обновляемых при каждом проходе вагона путеизмерителя, объединяемых в один кластер множеством развивающихся нечётких кластеров гауссовых композиционных моделей с доказательством адекватности применимости метода классификации в один класс при оценке состояния железнодорожного пути по показаниям вагона путеизмерителя;

- закономерности изменения состояния пути, построенные на основе разработанных моделей с использованием основных положений теории цензурированных выборок и алгоритмы анализа состояния железнодорожного пути;

- модель и алгоритм расчета минимально необходимого объема выгружаемого балласта для устранения выявленных и прогнозируемых дефектов пути для автоматизированного управления разгрузочно-дозировочным механизмом хоппер-дозатора, исключающего влияние человеческого фактора на расходование балласта при техническом обслуживании и ремонтах железнодорожного пути;

- научно-обоснованные требования, способ и конструктивные решения по модернизации средств механизации, применяемых при техническом обслуживании железнодорожного пути для их автоматизированного дистанционного управления, исключающие влияние человеческого фактора, непроизводительное расходование щебня и увеличивающие полезное время работы в ограниченное время «окна»

- научно - техническое обоснование создания автоматизированной системы управления технологическими процессами технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути с разработкой технических требований к АСУ ТП выгрузки и укладки балласта в путь.

Степень достоверности и апробация результатов:

- теоретических исследований по выбору методов и способов построения моделей подтверждены на основе расчетов по фактическим данным, полученным с железных дорог ОАО «РЖД»;

- разработанных алгоритмов расчетов и построенных закономерностей изменения состояния пути подтверждены вычислительными экспериментами;

- разработанных способов, предложений, технических требований подтверждены внедрением в производство; а именно внедрено: новая конструкция привода разгрузочных люков и новая конструкция разгрузочных устройств хоппер-дозатора ВПМ 770, обеспечивающая их автоматизированное дистанционное управление; конструкторская документация на систему дистанционного управления приводом хоппер-дозатора ВПМ 770 в виде извещения к проекту 770.00.000; технологического процесса удаления выплесков с машиной Фатра и модернизированного хоппер-дозатора ВПМ 770; часть предложенных алгоритмов

реализована в предложениях АО «ВНИИЖТ» по совершенствованию путеобследовательской станции ЦНИИ 4.

Основные положения диссертации докладывались и получили одобрение на: ежегодных научно практических конференциях с международным участием «Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство» с 1 по 13 –й в 2008-2018 г. РГОТУПС, МИИТ; заседании научно-технического совета АО «Калугаремпутьмаш» 22 октября 2104 г. № В-180; заседании секции Ученого совета «Путь и путевое хозяйство и путевые машины» в открытом акционерном обществе «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта» протокол № 5 от 26.06.2014 г; на 22 международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» в Институте проблем управления (ИПУ) Российской академии наук 03.12.2014 г.; на XI международной научно-практической конференции «НАУКА И ОБРАЗОВАНИЕ ТРАНСПОРТУ» в СамГУПС 25–26 октября 2018 года; на научно-техническом семинаре расширенного заседания кафедры «Железнодорожная автоматика, телемеханика и связь» 20 декабря 2018 года Российский университет транспорта (МИИТ).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 30 статьях, из которых 9 опубликованы в журналах, входящих в перечень рекомендуемых ВАК ведущих периодических изданий, оформлено и получено 7 патентов на изобретение и полезную модель. Всего в РИНЦ 30 статей, из которых 9 в журналах, рекомендованных ВАК.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ С ОБОСНОВАНИЕМ ВОЗМОЖНОСТИ АВТОМАТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ С РАЗРАБОТКОЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ

В главе проводится обзор существующих работ по совершенствованию системы технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути за счет автоматизации ее технологических процессов и обоснование возможности создания автоматизированной системы управления технологическими процессами технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути (АСУ ТП ТО) на основе имеющихся средств механизации и разработки технических требований к модернизации, применяемых технических средств.

1.1. Выбор работ и средств механизации в системе технического обслуживания и ремонтов пути, имеющих наибольший процент ручного труда и влияния на перевозочный процесс

1.1.1. Анализ технологии работ. Задачей технического обслуживания железнодорожного пути является обеспечение работоспособности отдельных элементов верхнего строения пути, как правило, выполняемых в рамках текущего содержания железнодорожного пути в соответствии с правилами технической эксплуатации железных дорог [1, 2, 3].

В текущее содержание пути входит: надзор за состоянием железнодорожного пути, выявление дефектов, препятствующих движению по участку с установленными скоростями, работы по устранению выявленных дефектов; планово-предупредительные работы по поддержанию работоспособности пути. Локальные дефекты верхнего строения пути прямым или косвенным образом определяются отступлениями от норм содержания рельсовой колеи и вызываются дефектами конструкции, в частности, дефектами земляного полотна, балластной призмы, материалов верхнего строения пути; а также нарушениями технологии содержания пути. При этом расстройства

геометрии рельсовой колеи являются как причиной возникновения отдельных неисправностей пути, так и следствием их появления.

Работы по устранению отдельных неисправностей пути, следующие: замена негодных шпал, креплений; вырезка загрязненного балласта (на выплесках, в стыках и т.д.) и подсыпка свежего балласта; правка рельсов в стыках; выборочная выправка или выправка на месте устранения дефектов ВСП. Более подробно эти работы состоят из следующих операций: выправка пути, перешивка ширины колеи, смена креплений, подтягивание закладных и клеммных болтов, вырезка балласта, досыпка балласта, одиночная смена шпал, брусьев, планировка балластной призмы, стабилизация балластной призмы. Работы по устранению локальных неисправностей пути выполняются как правило вручную с помощью средств малой механизации (шпалоподбойки, домкраты, гидравлические рихтовщики и т.д.).

Планово-предупредительные и ремонтные работы на участках большой протяженности выполняются с помощью комплекса путевых машин. Такая технология впервые была предложена Каменским В.Б., Федуловым В.Ф., Исаевым К.С., Стельмашовым В.Н. и впоследствии развита в работах Певзнера В.О. и его учеников Прохорова В.М., Широновой Т.Н. и др. [4,5,6,7,8,9]. Технология постоянно совершенствовалась в связи с созданием новых моделей путевой техники и средств механизации для текущего содержания и ремонтов железнодорожного пути, разрабатываемых научными и проектными организациями МПС РФ и впоследствии ОАО «РЖД», а также зарубежными фирмами Плясер, Матиса и другими. В настоящее время одной из наиболее важных и востребованных работ является вырезка загрязненного балласта и подсыпка свежего балласта из хоппер-дозаторов. На текущем содержании пути эти работы выполняются вручную, как правило, с помощью средств малой механизации. С появлением путевых машин повысило уровень механизации до 80%, а на текущем содержании 20-30 %, в зависимости от вида выполняемых работ.

Комплекс машин для глубокой очистки балласта при капитальном ремонте пути состоит из следующих машин: щебнеочистительной машины; универсального тягового модуля; состава для засорителей; хоппер-дозаторной «вертушки»; машина выправочно-подбивочно-отделочная; машина выправочно-подбивочно-рихтовочная; динамический стабилизатор; планировщик балласта, распределитель балласта. Что касается автоматизации технологических процессов текущего содержания и ремонтов пути, то здесь уровень обустройства еще ниже.

Анализ состава и объемов работ по текущему содержанию пути, наиболее полно проведенный в работах Каменского В.Б., Певзнера В.Ф., Прохорова В.М., Селезневой Н.Е., Федулова В.Ф. и др. [6, 7,10,11,12,13,14,15] показывает, что более 60% от общего объема работ приходится на содержание рельсовой колеи (выправка пути) как планово- предупредительную выправку, так и неотложные работы, вызванные внезапно появившимся дефектом.

Основные виды работ при планово-предупредительной выправки следующие: разбивка и закрепление проектного положения пути; очистка рельсов и скреплений от грязи; удаление загрязненного балласта под подошвами рельсов и уборка засорителей с поверхности балластной призмы; смазка и закрепление клеммных, закладных и стыковых болтов; замена дефектных скреплений и шпал; выправка и шлифовка рельсовых и сварных стыков; снятие пучинных карточек при деревянных шпалах и регулировочных прокладок при железобетонных шпалах, регулировка зазоров, перешивка пути; сплошная выправка пути с подъемкой рельсо-шпальной решетки на величину не более 2 см машинным способом по методу фиксированных точек или компьютерным программам, обеспечивающих постановку пути в проектное положение; очистка водоотводов, уборка лишнего балласта и засорителей с обочины и у опор контактной сети, отделка балластной призмы, планировка междупутья и обочины, ремонт переезда; проверка соответствия положения пути проектному; шлифовка рельсов.

Таким образом, наибольший объем работ по текущему содержанию пути так или иначе связан с работами с балластом как основы верхнего строения железнодорожного пути.

1.1.2. Анализ средств механизации. К средствам механизации, применяемых при техническом обслуживании железнодорожного пути, относятся путевые машины, вагоны специального назначения, объединенные под одним термином, специальный подвижной состав (СПС) и технические средства малой механизации [16,17]. Результаты проведенного анализа соотношения каждого типа СПС к общему объему СПС [18] показаны на рисунке 1.1.

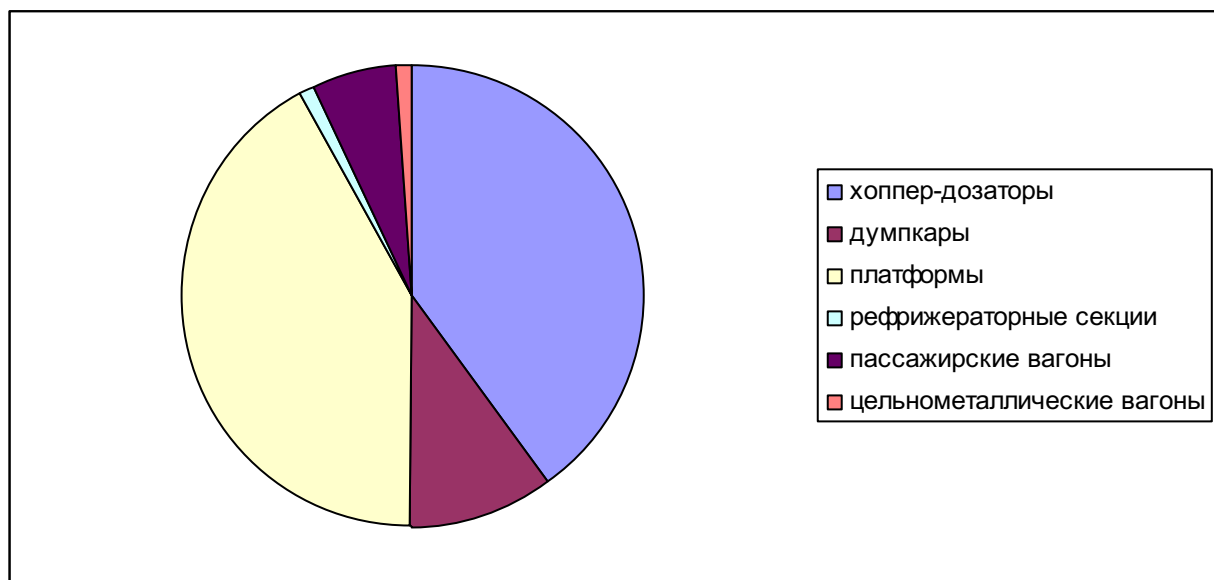


Рисунок 1.1 Диаграмма соотношения по типам СПС, применяемых в системе технического обслуживания железнодорожного пути

Таким образом, можно сделать промежуточный вывод, что наибольший процент, применяемый в путевом хозяйстве средств механизации это хоппер-дозаторы, что и подтверждает вывод в разделе 1.1.1 о наибольшем объеме работ с балластом. Из анализа зарубежного опыта технического обслуживания железнодорожного пути видно, что в основном все работы на железнодорожном пути механизированы, причем большое значение уделяется не только надежной работе путевых машин, но и качеству работы машин в части повышения надежности работы железнодорожного пути после проведенных ремонтов. Однако, в РФ уровень механизации при ремонтах пути составляет не более 65-80%, а на текущем содержании – 10-20%, в зависимости от вида выполняемых работ.

Это подтверждается многочисленными исследованиями по сравнению основных показателей работы путевого хозяйства США и России, доля ручного труда в системе планово-предупредительных ремонтов железнодорожного пути в России выше, чем в США. Это неудивительно, так как комплексное решение проблемы механизации планово-предупредительных путевых работ в СССР, началось только с 1978 года работами Исаева К.С., Федулова В.Ф. [5].

Работе с балластом при техническом обслуживании пути осуществляется вручную выгрузкой вилами с платформ или механизированным способом выгрузкой из бункеров специальных вагонов хоппер-дозаторов. Первые модели хоппер-дозаторов типа ЦНИИ разработала группа ученых и конструкторов Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта МПС (ЦНИИ МПС, впоследствии ВНИИЖТ) и Проектно-технологическо-конструкторского бюро (ПТКБ ЦП МПС) под руководством М.А. Плохоцкого и П.Г. Белогорцева [19,20]. В дальнейшем над совершенствованием хоппер-дозаторов моделей ЦНИИ (ЦНИИ ДВЗ М, 55-76) работали Г.И. Игнатенков, С.А. Самохин Н.Т. Котов, В.А. Арбузов, В.И. Ойя и другие специалисты [21,22]. Однако объем ручного труда при укладке балласта в путь сохранился, так как конструкция хоппер-дозаторов не позволяла прерывать начатую выгрузку и излишек балласта убирался лопатами в откос.

В 80-х годах прошлого века была поставлена задача создать новую модель хоппер-дозатора, механизм выгрузки которого позволял бы прерывать выгрузку в любой момент времени. Проблема была частично решена в конце 90-х годов прошлого века Сычевым В.П. и Миховичем М.В., предложившим конструкцию хоппер-дозатора с прерывистой выгрузкой, на тот период не имевшую аналогов в мире, что позволили экономить балласт выгружая балласт малыми порциями [23, 24,25,26]. Хоппер-дозаторы с прерывистой выгрузкой (ВПМ 770) серийно выпускаемые с 2001 года позволили существенным образом изменить технологию технического обслуживания и ремонтов пути. Это достигается за счет того, что крышки хоппер-дозатора выполнены в виде челюстей, закрепленных на валах с возможностью поворота относительно оси вала, а бункер имеет четыре продольных разгрузочных люка, каждый из которых закрыт крышкой, установленной на валу, вращающихся в подшипниках, закрепленных на

раме и торцевых стенках бункера. На рисунке 1.2, показана схема механизма выгрузки хоппер-дозатора ВПМ 770, а на рисунке 1.3 фотография этого механизма. Используя МС и универсальный хоппер-дозатор модели ВПМ 770 можно усовершенствовать систему выправки и подбивки пути не только за счет повышения точности расчета и тем самым качества ремонта), но и позволяет сэкономить большое количество щебня.

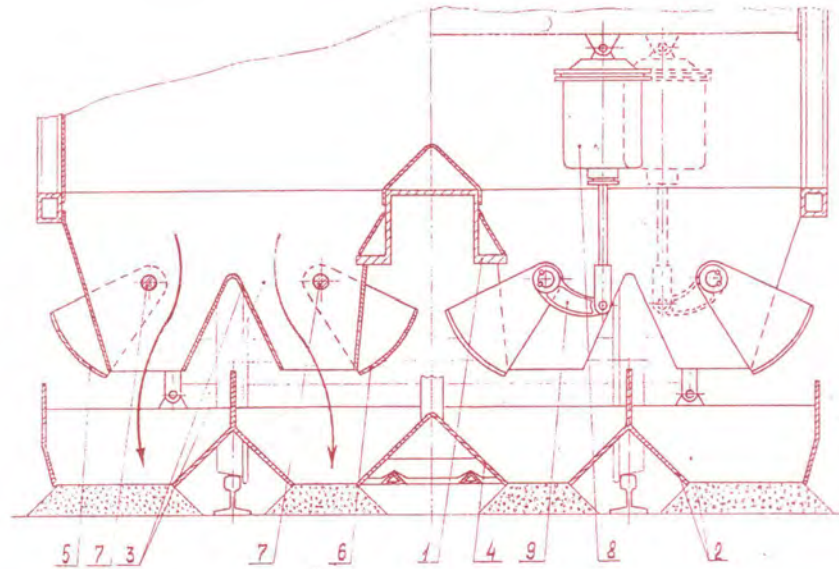


Рисунок 1.2. Схема механизма выгрузки и прерывания балласта.

1 – рама вагон; 2 – дозатор балласта; 3 – бункер; 4 – экран ограничения засыпки в середину пути; 5 и 6 – крышки; 7 – валы крышек; 8 - пневмоцилиндры разгрузки; 9 – рычаги



Рисунок 1.3. Крышка хоппер-дозатора, обеспечивающая прерывание выгрузки

Тем не менее до конца не решена проблема исключения ручного труда при укладке балласта в путь, так как открытие и закрытие крышек осуществляется вручную посредством рукоятки обеспечивающий доступ воздуха в цилиндры механизма привода. Поэтому тратится значительно время в «окно» на передвижение механиков вдоль «вертушки», тем не менее способ, обеспечивающий механизм прерывания выгрузки позволяет приступить к решению проблемы автоматизации технологических процессов технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути.

1.2. Оценка потребности в хоппер-дозаторах для выполнения плановых работ по техническому обслуживанию и ремонтам железнодорожного пути и объемов выгружаемого балласта

Объем количества хоппер-дозаторов потребного для выполнения плановых объемов путевых работ проводится на исходных данных основного производителя путевых работ, Центральной дирекции по ремонту пути – филиал ОАО «РЖД», принимая номенклатуру и плановые объемы работ на основе годовых плановых заданий с учетом корректировки по фактическим объемам, выполненным ЦДРП и материалов АО «ВНИИЖТ» [27, 28,29,30], как среднее значения за 10 лет (с 2008 по 2018 г.г.). Принимаем следующие обозначения: $V_{см(л)}$ – норма выработки в смену одной линии при продолжительности смены (8 ч, км/см); $n_{см(л)}$ – количество рабочих смен в сутки, шт.; $T_{сез(л)}$ – продолжительность рабочего сезона в днях; $K_{см(л)}$ – коэффициент, учитывающий снижение выработки в вечернюю и ночную смены; $Q_{л}$ – общий плановый объём работ по монтажу (демонтажу или ремонту) для линий данного типа, км; $Q_{уд(л)}$ – удельный объём работ по монтажу (демонтажу или ремонту), для оценки среднего удельного норматива технического оснащения на 100 км; $K_{рем(л)}$ – коэффициент, учитывающий простой линий в плановом ремонте при их круглогодичном использовании. $N_{см(раб)}$ – количество смен в работе, см.; $N_{см(пр)}$ – количество смен в простое по всем причинам. $Q_{уд(ок)}$, $Q_{уд(зп)}$ – удельные плановые объёмы работ (по видам), для окон любой продолжительности «ок» и на «закрытых» перегонах «зп» устанавливаются соответственно нормы выработки машинных комплексов: $V_{ок}$, $V_{зп}$; расчетное количество соответственно «окон» и суток «закрытия»; $N_{ок}$, $N_{зп}$; перегонов для выполнения объёмов работ в шт; $N_{ок(раб)}$, $N_{зп(раб)}$ – количество «окон» и соответственно суток в работе в шт.; $N_{ок(отм)}$, $N_{зп(сокр)}$ – количество соответственно «окон», отменяемых по всем причинам (шт.) и величина сокращения «закрытия» перегона (сутки); n_x , n_d – средние удельные нормативы технического оснащения ПМС соответственно хоппер-дозаторами и думпкарами, шт./1000 м³; $Q_{балл(x)}$, $Q_{балл(д)}$ – объём балласта для проведения плановых объёмов ремонтов и реконструкции (модернизации) пути равный фактическому объёму,

м^3 ; $Q_{\text{уд (х)}}$, $Q_{\text{уд(л)}}$ – удельный объём балласта для оценки средних удельных нормативов технического оснащения ПМС соответственно хоппер-дозаторами и думпкарами, 1000 м^3 ; $K_{\text{рем (х)}}$, $K_{\text{рем (л)}}$ – коэффициент, учитывающий изъятие из приписного парка соответственно хоппер-дозаторов и думпкаров для проведения их плановых и внеплановых ремонтов. $q_{\text{х}}$, $q_{\text{л}}$ – объём кузова хоппер-дозатора и думпкара, м^3 ; $t_{\text{об(х)}}$, $t_{\text{об(л)}}$ – средний оборот соответственно хоппер-дозаторной и думпкарной «вертушки», в днях $T_{\text{сез}}$ – продолжительность сезона перевозки балласта, в днях. $T_{\text{раб(х)}}$, $T_{\text{раб(л)}}$ – количество дней «вертушек» в работе; $T_{\text{пр (х)}}$, $T_{\text{пр (л)}}$ – количество дней «вертушек» в простое. $K_{\text{ив(ок)}}$, $K_{\text{ив(зп)}}$, коэффициенты использования машинных комплексов соответственно при работе в «окна» различной продолжительности и на «закрытых» перегонах:

Алгоритм расчета потребности путевой техники по видам работ следующий.

Этап 1

$$n_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{уд(л)}}}{B_{\text{см(л)}} \cdot n_{\text{см(л)}} \cdot T_{\text{сез(л)}} \cdot K_{\text{см(л)}} \cdot K_{\text{ив(л)}}}, \quad (1.1)$$

Этап 2

$$N_{\text{л}} = n_{\text{л}} \cdot \frac{Q_{\text{л}}}{Q_{\text{уд(л)}}} \cdot K_{\text{рем (л)}}, \quad (1.2)$$

Этап 3

$$K_{\text{ив(л)}} = \frac{N_{\text{см(раб)}}}{N_{\text{см(раб)}} + N_{\text{см(пр)}}}, \quad (1.3)$$

Этап 4

$$K_{\text{ив(ок)}} = \frac{N_{\text{ок(раб)}}}{N_{\text{ок(раб)}} + N_{\text{ок(отм)}}}, \quad K_{\text{ив(зп)}} = \frac{N_{\text{зп(раб)}}}{N_{\text{зп(раб)}} + N_{\text{зп(сокр)}}} \quad (1.4)$$

Этап 5

$$n_{\text{к (ок)}} = \frac{Q_{\text{уд(ок)}}}{B_{\text{ок}} \cdot N_{\text{ок}} \cdot K_{\text{ив(ок)}}}, \quad n_{\text{к (зп)}} = \frac{Q_{\text{уд(зп)}}}{B_{\text{зп}} \cdot N_{\text{зп}} \cdot K_{\text{ив(зп)}}}, \quad (1.5)$$

Этап 6

$$N_x = n_x \cdot \frac{Q_{\text{балл}(x)}}{Q_{\text{уд}(x)}} \cdot K_{\text{рем}(x)}, \quad N_d = n_d \cdot \frac{Q_{\text{балл}(d)}}{Q_{\text{уд}(d)}} \cdot K_{\text{рем}(d)}, \quad (1.6)$$

Этап 7

$$K_{\text{ив}(x)} = \frac{T_{\text{раб}(x)}}{T_{\text{раб}(x)} + T_{\text{пр}(x)}}, \quad K_{\text{ив}(d)} = \frac{T_{\text{раб}(d)}}{T_{\text{раб}(d)} + T_{\text{пр}(d)}}, \quad (1.7)$$

Этап 8

$$n_x = \frac{Q_{\text{уд}(x)} \cdot t_{\text{об}(x)}}{q_x \cdot T_{\text{сез}} \cdot K_{\text{ив}(x)}}, \quad n_d = \frac{Q_{\text{уд}(d)} \cdot t_{\text{об}(d)}}{q_d \cdot T_{\text{сез}} \cdot K_{\text{ив}(d)}}, \quad (1.8)$$

Для расчета принимаем: 30% от общего объема балласта до места производства ремонтно-путевых работ доставляется от базы, 70% доставляется из карьера; средний годовой объем завозимого на базы ПМС балласта от 1000000 до 1500000 м³, средний оборот «вертушки» от карьера к месту производства работ или до базы, или от базы к месту производства работ 2,5 дня. Проведенные по описанному выше алгоритму расчеты показали, что нормативные значения количества хоппер-дозаторов для завоза от карьера на базу составляет от 200 до 300 штук, а для летнего сезона перевозки от карьера до места производства ремонтно-путевых работ и от базы к месту производства работ 350-550 штук. Таким образом, каждая ДРП должна иметь не менее 500 хоппер-дозаторов, а в целом по ЦДРП не менее 8000 штук.

После расчета количества потребного объема хоппер-дозаторов составляем алгоритм расчета объема выгрузки щебня:

1. Измерение стрел прогиба в продольном профиле;
2. Пересчет в просадки пути h_i
3. Расчет изменения в м² поперечной площади призмы S_i при подъеме пути по формуле: $S_i = k_1 h_i + k_2 h_i^2$, где k_1 - с типовых размеров призмы, равный 4,25 [], а k_2 уточняющий коэффициент [32].

4. Расчет потребного объема щебня на L длины участка пути одной просадки

$$V_i = \frac{(S_i + S_{i+1})}{2}, M^3 \quad (1.9)$$

5. Общий объем щебня на один метр пути: $V_{общ} = \sum_0^l V_i, M^3 \quad (1.10)$

Расход балласта зависит от количества отступлений от норм содержания рельсовой нити, числа выплесков и объема вырезанного загрязненного щебня.

Таким образом, количество подлежащих модернизации хоппер-дозаторов для применения в автоматизированной системе управления технологическими процессами технического обслуживания железнодорожного пути составляет порядка 8000 единиц, а расчет потребного объема щебня на одну просадку пути определяется по предлагаемым формулам (1.9 и 1.10).

1.3. Разработка структурной схемы АСУ ТП техническим обслуживанием железнодорожного пути и обоснование возможности ее создания

1.3.1. Автоматизированная система железнодорожным транспортом (АСУЖТ) и ее функциональные подсистемы представляют совокупность технических и программных средств и работающих с ними пользователей, которые обеспечивают ввод, передачу, хранение, обработку и представление информации о функционировании железнодорожного транспорта. Над созданием АСУЖТ, начиная с семидесятых годов прошлого века работали такие известные ученые как основоположник АСУЖТ Петров А.П., а также Тулупов Л.П., Лецкий Э.К, Буянов В.А., Ратин Г.С. Тишкин Е.М., Сотников Е.А., Никифоров Б.Д. Марчук Б.Е. и др. [33,34,35,36,37,38,39].

К нынешнему времени в состав АСУЖТ входят десятки функциональных систем, каждая из которых предназначена для автоматизации определенных процессов и функций в работе железнодорожной отрасли: планирование, управление перевозочным процессом, грузовой и коммерческой работой,

пассажирскими перевозками; локомотивным хозяйством; эксплуатацией и ремонтом вагонов; устройствами энергетики и электроснабжения; эксплуатацией и ремонтом пути, сооружений и устройств и т.д. Одновременно с АСУЖТ активно внедрялась многоуровневая автоматизированная система АСУ путь, которая является подсистемой АСУЖТ, и включает в себя автоматизированные рабочие места (АРМ) специалистов, занятых в путевом хозяйстве и объединенные в одну сеть на уровне железной дороги и ОАО «РЖД» в целом под общим названием АСУ –путь.

Разработаны и внедрены: АРМ подготовки технического паспорта дистанции пути (АРМ ТО), содержащие полную характеристику верхнего строения пути, сведения о ремонтных работах с автоматическим формированием сводных отчетов и рельсо-шпало-балластной карты (РШБК) на уровне дистанции пути с последующим объединением в целом по дороге и сети; АРМы по формированию отчетов по искусственным сооружениям (АРМ ИССО); по земляному полотну (АРМ – земполотно). АРМ – ПУТЬМАШ включает комплекс задач по анализу и управлению эксплуатационной работой путевых машин. В составе АСУ-путь разработаны и другие подсистемы или как их принято называть в АСУ путь АРМы.

Однако АСУ путь в том виде в котором она в настоящее время функционирует относится к так называемым, информационным системам, обеспечивающим автоматизированный сбор и выдачу в установленном виде информацию о состоянии железнодорожного пути, применяемых в хозяйстве пути машин, механизмов, нормативно-справочной информации и ходе производственного и технологического процесса, где основная роль в принятии решений принадлежит человеку. Над созданием АСУ –путь начинали работать и внесли большой вклад в ее развитие такие ученые и специалисты как Захаров Г.Ф., Шамцян Л.С., Шац Э.Я., Щекотков Ю.М., Сычев В.П., Каменский В.Б., Филипов В.М., Мишин В.В., Певзнер В.О., Зензинов Б.Н., Ермаков В.М. и др. [40, 41,42,43,44,45,46]. Над созданием интеллектуальных систем управления

цифровой железной дороги работают Ададуров, С.Е, Розенберг Е.Н., Уманский В.И., Розенберг И.Н., Шварцфельд В.С., и др. [47,48,49,50,51].

1.3.2. Автоматизированная система управления технологическими процессами технического обслуживания железнодорожного пути как целостное решение обеспечивающее автоматизацию основных операций технологического процесса [52] технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути на сегодняшний день не существует.

Это вызвано рядом объективных обстоятельств, в первую очередь, как упоминалось выше, система технического обслуживания пути основана на применении средств малой механизации и ручного труда и на сегодняшний день исчерпала возможности обеспечения безопасной эксплуатации и оптимизации организационных форм управления железнодорожной отраслью.

Требования современные и тем более перспективные, к содержанию пути возможно реализовать только за счет перехода на принципиально новую систему текущего содержания пути, основанную на выполнении работ высокопроизводительными специализированными путевыми машинами и комплексами с максимальной возможностью автоматизации технологии работ, предъявляемые в условиях перехода на скоростное, высокоскоростное, тяжеловесное движение. Управляющих автоматизированных систем, которые не только собирают информацию, но и после соответствующей обработки осуществляют выдачу команд исполнителям или исполнительным механизмам, с работой в темпе технологических операций, практически нет.

Наиболее близкой к классической АСУ ТП [52,53] в части практического применения можно считать микропроцессорную систему управления выправкой и рихтовкой пути, которая в настоящее время стоит на выправочно-подбивочно-рихтовочных машинах, например, системы Навигатор, ВНИИЖТ-Матесс [48,54,55,56]. Однако эта система автоматизирует одну из основных, наиболее востребованных в путевом хозяйстве технологических операций, выправку, подбивку и рихтовку железнодорожного пути и может являться необходимой, но не достаточной частью (подсистемой) автоматизированной системы управления

технологическим процессом технического обслуживания железнодорожного пути.

Причина заключается в том, что одним из важных элементов технологического процесса выправки и подъёмки железнодорожного пути является выгрузка и укладка балласта в места обнаружения локальных неисправностей, устранение которых осуществляется технологическим процессом подъёмки и выправки пути [57,58,59].

Автоматизированная система управления технологическим процессом текущего содержания железнодорожного пути (АСУ ТП ТСЖП) как основы технического обслуживания пути должна обеспечивать выработку управляющих воздействий на железнодорожный путь с целью поддержания его в работоспособном и безопасном состоянии [60,61]. В основе АСУ ТП ТСЖП должны лежать автоматические технические средства сбора и обработки информации о состоянии железнодорожного пути, технические средства, обеспечивающие выработку управляющих воздействий на путь на основе разработанных моделей и алгоритмов анализа и прогнозирования состояния железнодорожного пути, разработка моделей, алгоритмов и программного обеспечения рабочими органами путевых машин, непосредственно взаимодействующие с железнодорожным путем [52,56, 58, 62].

1.3.3. Разработка структурной схемы АСУ ТП техническим обслуживанием и ремонтами железнодорожного пути как единой системы операторского управления технологическим процессом осуществляется на основе анализа технологий как системы, состоящей из технических средств и алгоритмов оценки состояния железнодорожного пути, объема потребных для обеспечения безопасной эксплуатации работ, выработки управляющих воздействий на путь. Такие работы ведутся в направлении автоматизации отдельных технологических процессов, в частности известны работы [62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70]. Как уже упоминалось выше основной объем работ по содержанию железнодорожного пути это выправка пути, которая заключается в вырезке загрязненного балласта,

подъемки или/ и сдвиге рельсовой колеи в заданных расчетами величинах выгрузке и подсыпке свежего балласта в места вырезанного балласта.

Критериями назначения выправки пути служат отклонения от норм по данным путеизмерительного вагона (по уровню, отводам возвышения наружных нитей в местах сопряжения прямых с кривыми, местным просадкам) по результатам визуального осмотра и проверки пути дорожным мастером и бригадиром. Структурная схема автоматизированной системы управления процессом планово-предупредительной выправки пути приведена на рисунке 1.4.

В общем виде техническое обеспечение автоматизированной системы управления технологическим процессом планово-предупредительной выправки пути АСУ ТП ПВ состоит из следующих блоков: система измерения и регистрации данных о состоянии рельсовой колеи; система, обеспечивающая обработку данных на основе разработанных математических моделей и алгоритмов, и система, непосредственно выполняющая работы по планово-предупредительной выправке, включающая в себя комплекс путевых машин. Схема устройства АСУ ТП ПВ показана на рисунке 1.5. Пооперационная схема технологического обеспечения АСУ ТП выправкой и рихтовкой пути приведена на рисунке 1.6.

В рамках АСУ ТП ПВ разрабатывается автоматизированная система управления технологическим процессом выгрузки и укладки балласта в путь, структурная схема которой представлена на рисунке 1.7.

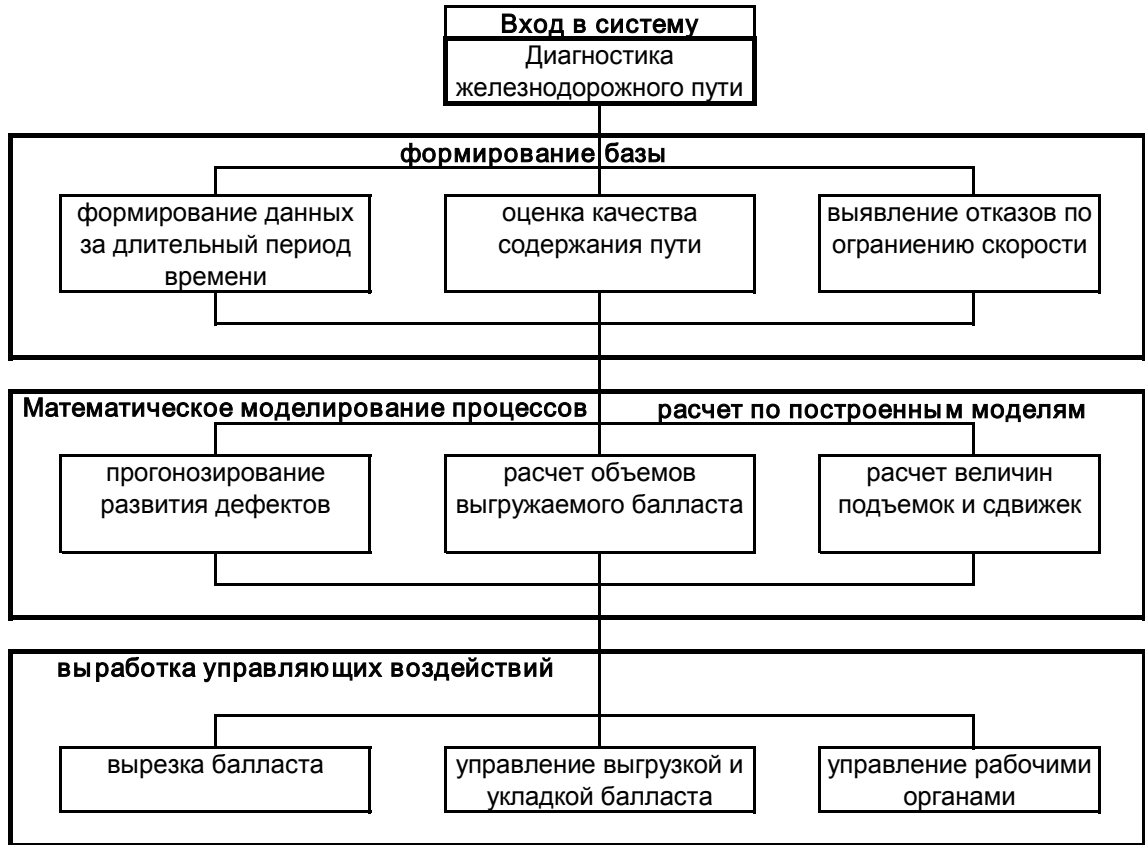


Рисунок 1.4. Технологическая схема автоматизированной системы управления технологическим процессом планово-предупредительной выправки пути

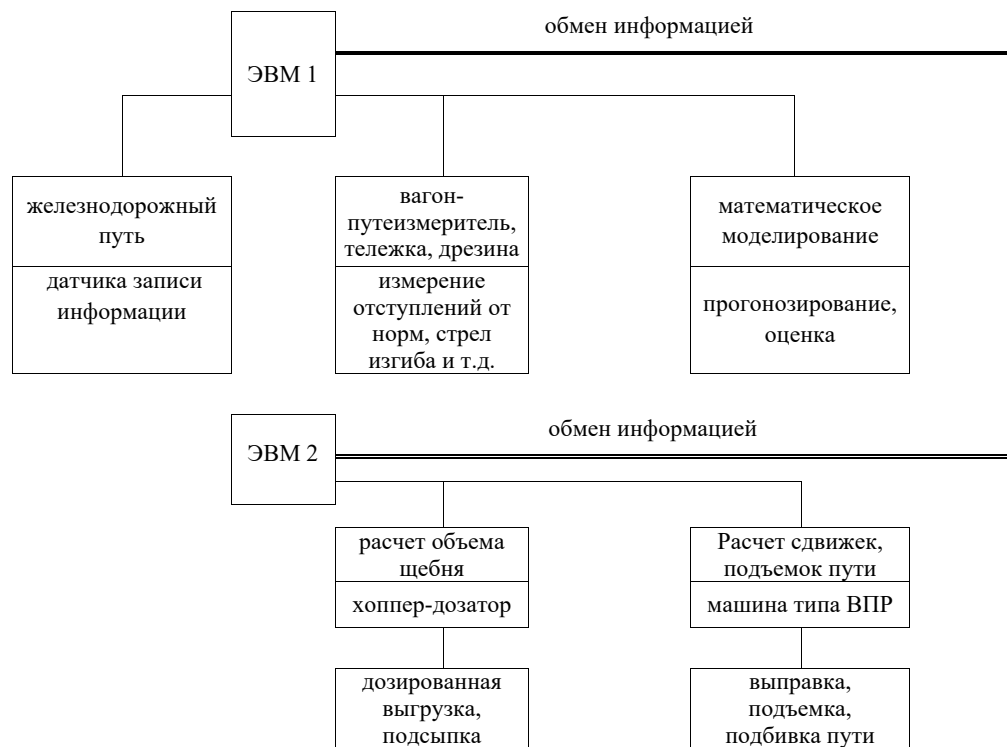


Рисунок 1.5. Структурная схема автоматизированной системы управления технологическим процессом технического обслуживания железнодорожного пути

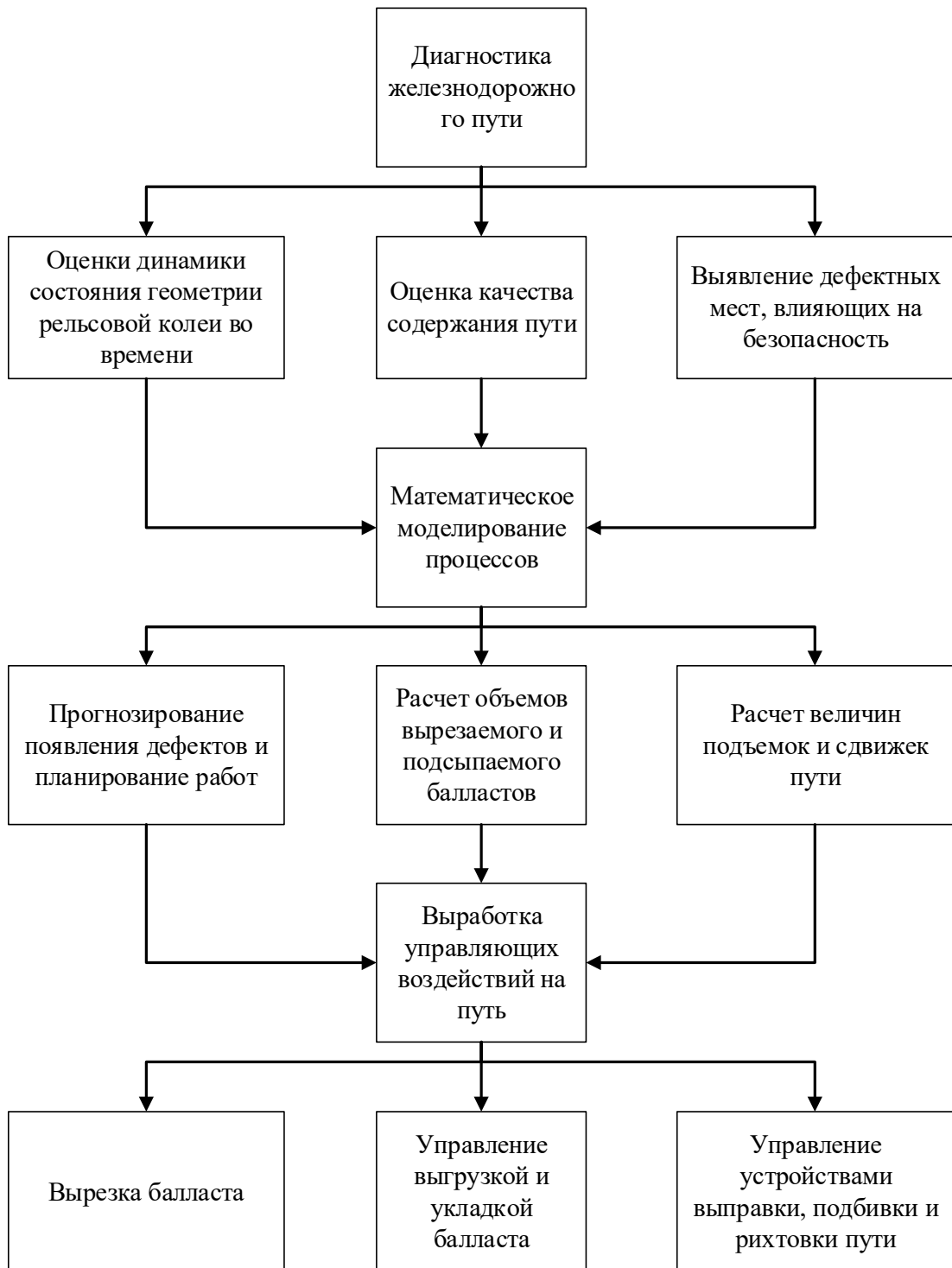


Рисунок 1.6. Пооперационная схема технологического обеспечения АСУ ТП ТО (на примере выправки и рихтовки пути)

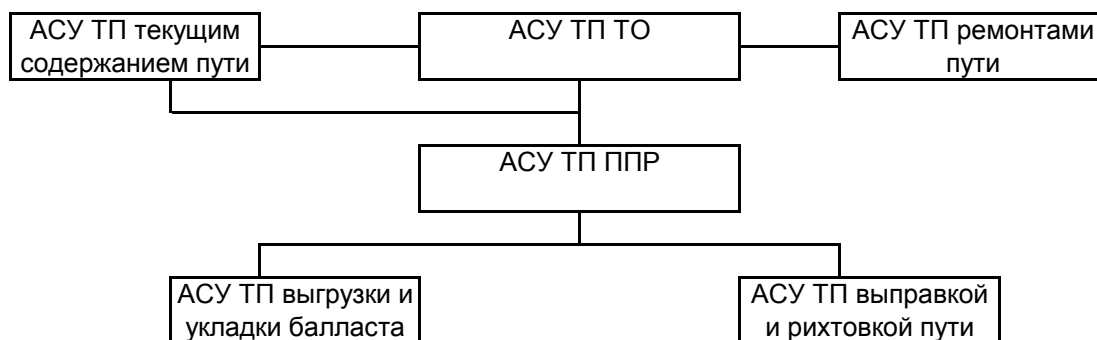


Рисунок 1.7. Место АСУ ТП выгрузки и укладки балласта в путь в АСУ ТП техническим обслуживанием железнодорожного пути (АСУ ТП ТО)

Структурная схема технического обеспечения АСУ ТП ТО путевой техникой показана на рисунке 1.8 и состоит из измерительной части (вагона путеизмерителя); путевой машины для выгрузки и укладки балласта в путь (хopper-дозатор) и путевой машины для выполнения операций подбивки, подъёмки, рихтовки пути (машины типа ВПР).

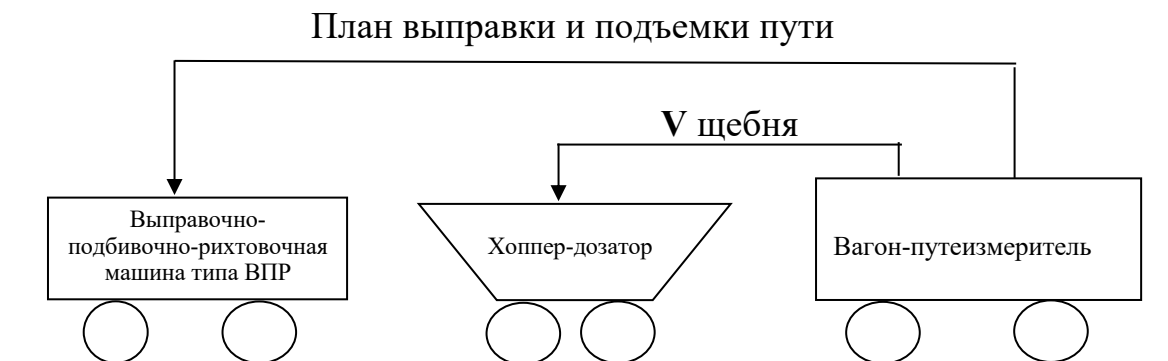


Рисунок 1.8. Схема взаимодействия технических средств в АСУ ТП ТО

Как видно из анализа структурных схем в наибольшей степени автоматизированы процессы оценки состояния железнодорожного пути по показаниям вагона путеизмерителя и управления рабочими органами выправочно-подбивочно рихтовочных машин типа ВПР 500, ВПРС, Дуоматик и т.п. [55,56,58,71,72]. Однако необходимо провести анализ информационно-

технических возможностей этих систем для использования в создаваемой АСУ ТП ТО.

1.4 Анализ возможности формирования технической и информационной базы АСУ ТП ТО на основе эксплуатируемых вагонов - путеизмерителей

Автоматизированная система диагностики и оценки состояния железнодорожного пути как составная часть АСУ путь, дает возможность в автоматическом режиме записывать геометрические параметры рельсовой колеи, обрабатывать информацию по оценке превышения пороговых значений отклонений от норм содержания пути, обрабатывать полученную информацию с выдачей рекомендаций по видам и объемам работ по текущему содержанию железнодорожного пути с целью последующего планирования путевых работ. Автоматизированную систему расшифровки показаний вагона путеизмерителя ЦНИИ 2 начали создавать одновременно с созданием АСУ путь как основополагающее техническое обеспечение по сбору информации о состоянии железнодорожного пути и ее предварительной обработки. Эти работы проводились под руководством Исаева К.С. Щекотковым Ю.М., Зензиновым Б.Н., Лебедевым А.А. и др. В настоящее время существуют несколько моделей вагонов путеизмерителей, в частности, КВЛП, ВПС ЦНИИ-4, Интеграл, ЭРА и т.д. [71,72,73,74,75,76], на которых автоматизирован процесс измерения параметров рельсовой колеи и оценки качества содержания.

Эти диагностические системы решают следующие задачи: автоматический контроль геометрических параметров устройства и содержания железнодорожного пути; оценки соответствия фактических параметров состояния пути установленным скоростям движения, выявления отступлений рельсовой колеи от норм содержания, требующих ограничения допускаемой скорости или закрытия движения; оценки изменений состояния геометрии рельсовой колеи во времени; паспортизации пути по параметрам устройства в плане, профиле и по геометрии колеи, создания и ведения дорожного банка данных о фактических

параметрах состояния и устройства пути; выявления участков, требующих производства планово-предупредительных и ремонтных работ по состоянию геометрии рельсовой колеи и их предпроектного обследования; оценки качества выполнения ремонтных работ.

Наиболее массово используемым на дорогах ОАО «РЖД» является вагон-путеизмеритель КВЛ-П2.1, КВЛ-П3.0 и других серий (здесь и далее КВЛ-П), выпускаемых НПЦ ИНФОТРАНС с 2003 г., который заменяет предыдущие модели (П1МП, П1МП.2, П1МП.2.Т). КВЛ-П обеспечивает измерения геометрии рельсовой колеи на скоростях до 100 км/ч. Основными контролируемыми параметрами являются: взаимное положение обеих рельсовых нитей по высоте (уровень), ширина рельсовой колеи (шаблон), стрела изгиба каждой рельсовой нити в горизонтальной плоскости относительно хорды 21,5 м при измерении в точке на расстоянии 4,1 м от конца хорды (рихтовки), стрела изгиба каждой рельсовой нити в вертикальной плоскости относительно хорды 17 м при измерении в точке на расстоянии 2,7 м от конца хорды (просадка), пройденный путь, и видеонаблюдение обустройства пути[75,76].

Вагон-путеобследовательская станции ЦНИИ-4 (ВПС ЦНИИ-4) [75,78,79] с бесконтактным съемом информации (рабочая скорость до 140 км/ч) контролирует более 20 параметров рельсовой колеи, в том числе и перечисленных выше для путеизмерителя КВЛ П2 геометрических параметров рельсовой колеи главных путей и для съемки профиля станционных путей.

Вагоны путеизмерители оборудованы без контактными измерительными системами и автоматически регистрируют геометрические параметры рельсовой колеи в профиле и плане в основном до 500-600 км в день с последующей передачей информации в АСУ путевым хозяйством (АСУ-путь).

Для решения поставленной в настоящей работе задачи необходимо иметь информацию по следующим параметрам, определяемым в мм в процессе диагностики пути: ширина рельсовой колеи (уширение $У$; сужение $С$; отвод ширины колеи); просадки рельсовых нитей в вертикальной плоскости ($Пр$); взаимное положение рельсовых нитей по уровню (плавные отклонения $У$;

перекосы Прк, отводы возвышения); стрелы изгиба в плане от несимметричной хорды (рихтовка Р); положение пути в плане. Эти параметры выводятся в виде «путеизмерительной ленты» [79] фрагмент которой показан на рисунке 1.9.

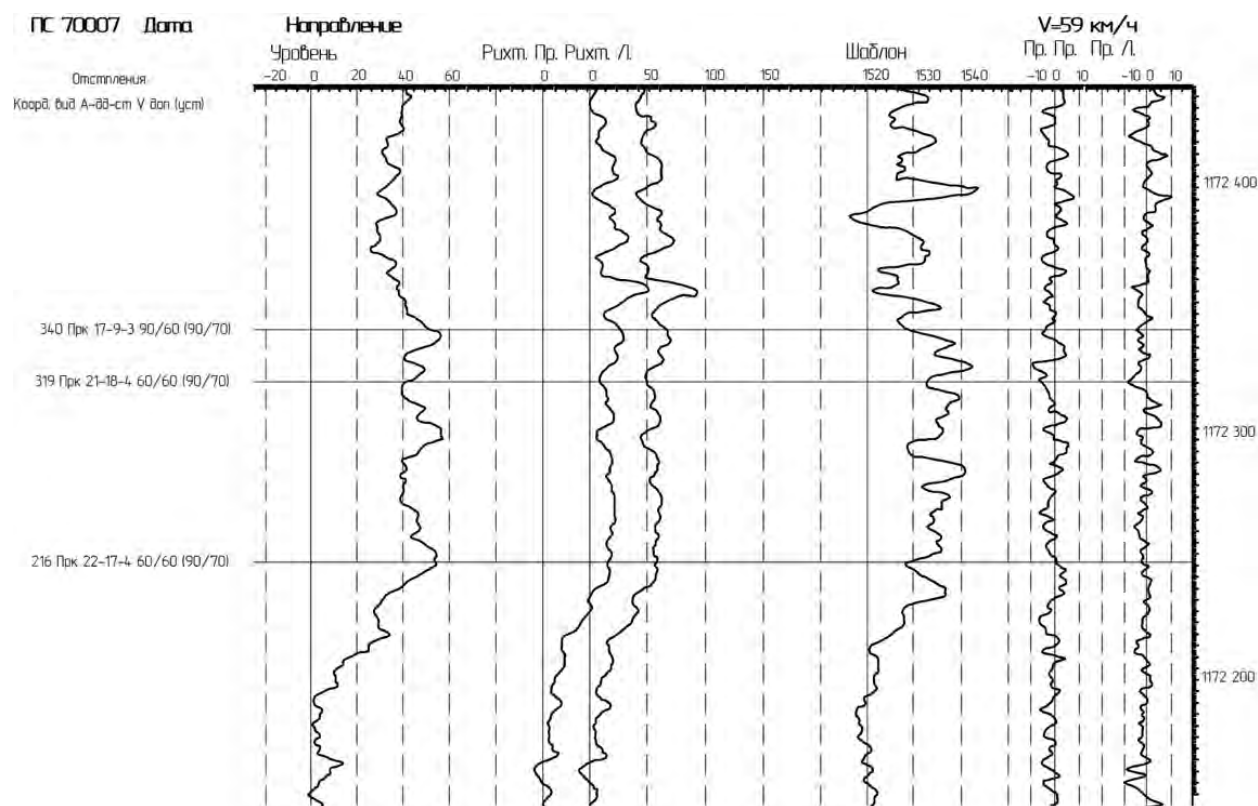


Рисунок 1.9. Фрагмент записи путеизмерительной ленты вагона-путеизмерителя

Результаты записи расшифровываются и формируется ведомость расшифровки с указанием вида отступления, его местоположения, величины, степени и их сочетаний, допустимой скорости движения, ведомость не расшифровывается, а передается в электронном виде. Параметры положения пути в плане записываются следующие: координаты начала и конца кривой (точки НПК); координаты начала и конца круговой кривой (точки КПК), длина круговой кривой; минимальное, максимальное и среднее значения радиуса в пределах круговой кривой; длины 1-ой и 2-ой переходных кривых; максимальные и средние величины крутизны отвода кривизны для обеих переходных кривых ‰; угол поворота кривой; отклонения пути в прямых участках от геодезической прямой; горизонтальные неровности в прямых участках пути; величина

возвышения одной нити над другой больше установленного допуска в прямых участках пути; смещение начала отвода возвышения относительно точки НПК; смещение конца отвода возвышения относительно точки КПК; длину кривой с постоянным возвышением; минимальное, максимальное и среднее значения возвышения в пределах круговой кривой одного радиуса; длины 1-ой и 2-ой переходных кривых с отводом возвышения; максимальные и средние величины крутизны отвода возвышения для обеих переходных кривых[75, 79,80].

За показатели расстройств кривой, которые характеризуют отклонения от нормативов содержания параметров устройства кривой, принимаются следующие безразмерные величины: показатель расстройств круговой кривой в плане ($P_{пл}$); показатель расстройств кривой по уровню ($P_{ур}$); показатель расстройств кривой при не совпадении точек начала и концов переходных кривых по возвышению и кривизне (P_A); показатель расстройств кривой по разбросу непогашенного ускорения ($P_{Анп}$). Вводятся следующие обозначения: $R_{мин}$ - минимальный; $R_{ср}$ средний радиусы одно радиусной кривой; H - возвышение в кривой; $J_{макс}$ — максимальная и соответственно $J_{ср}$ крутизны отвода; $A_{нп}$ ускорения при установленной скорости; $\Delta L_{пк}$ разность между началом и концом переходной кривой.

Для автоматизации процесса расчета кривой можно применить следующий алгоритм на основе типовых формул:

1. Ввод априорной информации о кривой: величины радиусов R
2. Вычисление: $P_{пл} = 1 - (R_{мин} / R_{ср})$ для кривой с одним радиусом;
3. Вычисление $P_{пл ср} = (P_{пл 1} + P_{пл 2} + \dots + P_{пл i} + \dots + P_{пл n}) / n$, где n — число радиусов много радиусной кривой;
4. $P_{ур} = (H_{макс} - H_{мин}) / 100 + (J_{макс} - J_{ср}) / 10$
5. $P_A = (\Delta L_{пк1} + \Delta L_{пк2} + \Delta L_{пк3} + \Delta L_{пк4}) / 80$, величины несовпадений точек переходных кривых $\Delta L_{пк}$ устанавливаются по модулю;
6. $P_{Анп} = (A_{нп макс} - A_{нп ср}) / A_{нп доп}$, где рекомендуется $A_{нп доп} = 0.7 \text{ м/с}^2$

7. Вычисление для каждой кривой интегрального показателя расстройств ($P_{\text{инт}}$), как сумма частных показателей с учетом весовых коэффициентов [81,82]

$$P_{\text{инт}} = 0,4 P_{\text{Апп}} + 0,3 P_{\text{пл}} + 0,25 P_{\text{ур}} + 0,05 P_{\Delta}$$

Выходными формами с вагона путеизмерителя параметров устройства кривой являются ведомость характеристик устройства кривых участков пути и "карточки кривых".

Автоматизированная система диагностики железнодорожного пути вагона путеизмерителя позволяет также выполнять следующие расчеты на основе полученной измерительной информации: статистических характеристик параметров рельсовой колеи, в частности, математическое ожидание (МО) и среднеквадратическое отклонение (СКО) записи состояния рельсовой колеи на отрезке пути; оценку качества содержания пути на участке любой задаваемой протяженности в соответствии с нормативными значениями состояния геометрии колеи; ранжирование километровых (или пикетных) отрезков, расположенных на оцениваемом участке, и выявление наихудших по состоянию геометрии колеи; оценку соответствия геометрических характеристик рельсовой колеи установленным скоростям движения.

Таким образом, можно сделать вывод, что эксплуатируемые на дорогах вагоны путеизмерители, оборудованные системой автоматизированного сбора и обработки информации могут быть пригодны в качестве информационно-технической системы для формирования управляющих воздействий в АСУ ТП ТО.

1.5 Анализ возможности применения для формирования технической и информационной базы АСУ ТП ПВ микропроцессорных систем управления рабочими органами выправочно-подбивочно-рихтовочных путевых машин

1.5.1. Анализ математического обеспечения микропроцессорной системой выправки и рихтовки, устанавливаемой на путевых машинах (МС выправки пути). Для механизации выправочно-подбивочных и отделочных работ применяются машин., которые обычно-классифицируются по разным принципам,

в частности, по видам рабочих органов и функциям выполняемым, а именно: для уплотнения, стабилизации балласта, выправки и отделки пути, универсальные с возможностью применения на стрелочных переводах или только на пути; машины непрерывно-циклического действия или только циклического, или только непрерывного и т.д. На железных дорогах применяются машины ВПР -02 М, ВПРС -02, ВПРС-03: ВПРС-05, ВПР-04, Unimat, ПМА-1, ПМА-С, «Duomatic 09-32 CSM», «Dynamic Stophexpress 09-3X» и др. Эксплуатируются на железных дорогах и другие машины, например, специализированные машины для рихтовки пути системы В.Х. Балащенко, однако они не оборудованы микропроцессорными системами управления рабочими органами и поэтому не рассматриваются.

Натурное положение пути в плане определяется стрелами изгиба рельсовой нити от хорды постоянной длины [81,82,83]. Математические модели и алгоритмы расчета выправки и рихтовки кривых полно отражены и применяются математическом обеспечении микропроцессорных систем путевых машин и подробно изложены в работах Дюнина А.К., Туровский И.Я., Бучкин В.А., В.С. Шварцфельд, Бредюк В.Б., Ершова К.Б., Лебедев А.А., Щекотков Ю.М., Петуховский С.В. [68,71,81,82,83,84,85,86]

Рихтовка пути назначается по результатам анализа графика стрел на ленте путеизмерительного вагона (см. например, рисунок 1.9) или проверки состояния пути в плане путем визуального определения мест с отклонениями от нормального положения. Существует много различных способов расчета выправки кривых, но в основном эти способы сводятся к двум методам: методу разности эвольвент; методу последовательных приближений [81,87,88].

Метод последовательных приближений основан на тезисе, что при сдвиге пути, в точке n стрела в этой точке изменяется на величину сдвижки, а в соседних точках $n-1$ и $n+1$ стрелы на половину величины сдвижки в точке n . Основная зависимость величины проектных стрел от натуральных стрел и сдвигов:

$$F_n = f_n + C_n - \frac{C_{n-1} + C_{n+1}}{2}, \quad (1.11)$$

где F_n проектная стрела в точке n ; f_n натурная стрела в точке n ; C_n величина

сдвига пути в точке n ; C_{n-1}, C_{n+1} – величины сдвижки пути в смежных точках.

При сдвиге пути в точке n на величину C_n стрелы в точке n и смежных с ней,

$$\begin{aligned} F_{n-1} &= f_{n-1} - \frac{C_n}{2}, \\ \text{будут равны: } F_n &= f_n + C_n, \\ F_{n+1} &= f_{n+1} - \frac{C_n}{2}. \end{aligned} \quad (1.12)$$

Алгоритм расчета следующий.

1. Из паспорта кривой выбираем длины переходных кривых

2. Проверяем соблюдение условия равенства суммы натуральных и проектных стрел изгиба, чтобы угол поворота кривой остается неизменным [88]:

$$\sum f_n = \sum F_n \quad \text{или} \quad \sum (f_n - F_n) = 0, \quad (1.13)$$

где f_n – натурная стрела в точке n ; F_n – проектная стрела в точке n .

3. Определяем среднюю стрелу изгиба круговой кривой [88]:

$$F_{KK} = \frac{\sum f_{KK}}{n_{KK}}, \quad (1.14)$$

где $\sum f_{KK}$ – сумма натуральных стрел круговой кривой, мм; n_{KK} – количество точек круговой кривой, шт.

4. Вычисляем рост стрел в пределах переходных кривых [88]:

$$\Delta f_{ПК} = \frac{F_{KK} a}{l_{ПК} 2}, \quad (1.15)$$

где F_{KK} – средняя стрела в пределах круговой кривой, м; $l_{ПК}$ – длина переходной кривой, м; a – длина хорды;

5. Вычисляем величины стрел в точках начала и конца переходных кривых:

$$f_{НПК} = \frac{F_{KK} a}{12 l_{ПК}}, \quad f_{КПК} = F_{KK} \left(1 - \frac{a}{12 l_{ПК}} \right), \quad (1.16)$$

где $f_{НПК}, f_{КПК}$ стрелы изгиба начала и конца переходных кривых.

$$6. \text{ Вычисляем проектные стрелы: } F'_n = f_n + C_n - \frac{C_{n-1} + C_{n+1}}{2}; \quad (1.17)$$

Автоматизированная система работает таким образом, что в каждом сечении пути проводится расчет величины смещения (сдвижки, подъемки) в точке переднего конца хорды в сравнении со значением проектной стрелы изгиба хорды машины из условий оптимального пространственного положения пути. Особую сложность при составлении алгоритма вызывает расчет кривых. При проектировании железнодорожного пути радиусы кривых определяются, в том числе из условия соответствия значений непогашенного ускорения для грузовых и пассажирских поездов утвержденным нормам при назначенных после ремонтов пути скоростях движения поездов. Поэтому отступление от проектного положения кривой неизбежно влечет за собой изменение значений непогашенного ускорения и как следствие изменение допускаемых на участке скоростей движения. Действительно, влияние радиуса кривой, точек переходных кривых, значение возвышения по уровню и его соответствие кривизне пути в плане, является одним из наиболее важных показателей качества проведенного ремонта, обеспечивающих сохранение стабильности пути под воздействием поездной нагрузки и безопасности движения поездов. В том случае, если параметры пути после его ремонта не соответствуют проектным данным, появляются длинные неровности в плане (заводины в прямых и кривых) и длинные лощины в продольном профиле.

Автоматизированная система выправки пути, установленная на путевую машину, на которой смонтированы устройства для измерения стрел изгиба пути в плане и продольном профиле и устройство для измерения возвышения одного рельса относительно другого, а также устройство для управления выправкой пути, использует известный алгоритм расчета. Чтобы поставить путь в проектное положение, необходим алгоритм расчета, обеспечивающий определение смещений пути в пространстве относительно неподвижных координат (такими координатами могут быть, например, начало и конец работы машины) [89,90].

Автоматизированную систему расчета кривых может быть установлена как на стационарной ЭВМ, но в этом случае придется вводить данные измерений железнодорожного пути, или на вагоне путеизмерителе, как описано выше или на

путевой машине на основе микропроцессорной системы управления рабочими органами путевой машины. Автоматизированная система на путевой машине есть аппаратно-программный комплекс на базе ноутбука для информационного обеспечения машинной выправки пути в плане, продольном и поперечном профиле.

Систему можно применить для: машинной съемке натурального положения пути в плане, продольном и поперечном профиле; расчетам координат существующего пути в плане и профиле со стрелами изгиба асимметричных хорд дорожной машины; расчетам оптимального пространственного положения пути с учетом условий эксплуатации, технических, габаритных и других требований и ограничений; управлению машинной выправкой с точной постановкой пути в заданное положение в плане, профиле и по уровню при текущем содержании и ремонтах пути с использованием путевых машин; документированию результатов расчетов и паспортизации параметров плана линии, продольного профиля и возвышению наружного рельса; анализу допускаемых скоростей движения поездов по элементам плана линии и их соединений; созданию и ведению базы данных натуральных измерений и результатов расчетов; обмену данными с другими подсистемами АСУ путевого хозяйства на разных уровнях управления.

Параметры эпюры проектной кривизны и расчетные пути перемещения (сдвиги, подъемки) являются результатами расчетов оптимального пространственного положения пути по данным натуральных измерений [91,92].

Натурная кривизна K_c , и проектная K_n по отношению к нормали n :

$$n_L = \int_0^L \int_0^L (K_c - K_n) dl dl + dn_0 L + n_0 \quad (1.18)$$

или после перехода к конечным разностям

$$K_c \rightarrow f_i, K_n \rightarrow F_i, dl \rightarrow a, \quad (1.19)$$

Нормали в точках деления пути определяются по формуле:

$$n_k = 2 \sum_{j=0}^{k-1} \sum_{i=0}^j (f_i - F_i) + k \Delta n_0 + n_0, \quad (1.20)$$

где f_i – натурные стрелы; F_i – проектные стрелы изгиба хорды при двойном а (2 а) шаге измерений.

Как правило, при выправке пути в плане и профиле $\Delta n_0 = 0$ и $n_0 = 0$ критерии оптимальности расчета (ограничения) задаются в виде требований: минимум выправочных работ: $\sum_0^N |n_i| = \min$; постоянная величина длин рельсовых нитей:

$\sum_0^N n_i = 0$; не превышение заданных значений: $n_{\min} < n_i < n_{\max}$; фиксированный сдвиг: $n_i = A$.

На нормали в конце участка накладываются ограничения: обеспечение неизменности угла поворота: $\Delta n_N = 0$; неподвижность прямого подхода: $n_N = 0$ для последней точки N.

В настоящее время и на путевых машинах с микропроцессорными системами управления применяется технология, заключающаяся в предварительном измерении участка пути. Измерительная база вагона путеизмерителя и путевой машины различна и поэтому использовать данные с вагона путеизмерителя невозможно без пересчета с одной базы на другую. Такая программа реализована на ВПС ЦНИИ-4 [78, 91]. Таким образом, путевая машина, на которой смонтированы устройства для измерения стрел изгиба пути в плане и продольном профиле и устройство для измерения возвышения одного рельса относительно другого, а также устройство для управления выправкой пути, может применять алгоритм расчета, в котором была бы прямая зависимость результатов измерений и расчетов от проектного положения пути. Измерив стрелы изгиба (прогиба) пути, при расчете выправки пути определяем его положение в пространстве относительно неподвижных координат, а выправка пути проводится по результату сравнения этого положения пути в пространстве и дополнительного измерения стрел изгиба (прогиба) пути и возвышения одного рельса относительно другого.

В основном, существующая технология выправки пути обеспечивает выправку пути по методу сглаживания, но при работе по методу сглаживания не обеспечивается выправка длинных неровностей пути в плане и продольном профиле. Наиболее точным методом является расчет по методу фиксированных точек на основе геодезической съемки железнодорожного пути. В системе предусмотрена возможность обозначать участок пути как не сдвигаемый (например, мост или переезд) для того, чтобы система не рихтовала (не сдвигала) путь на данном участке или дополнительно к расчётной сдвигке пути искусственно задавать сдвижку с целью объезда препятствия, например, перрона, принудительно растягивая кривую или сдвигая путь на требуемую величину.

Имеется также возможность рихтовать и подбивать одновременно при этом автоматически совмещаются начало и концы отводов возвышений с началами и концами переходных кривых, а также измерять путь, двигаясь назад, что позволяет экономить время «окна».

Результаты расчетов выводятся на экран и печать в виде графиков и таблиц проектных параметров, разбивочных данных и программных задач для управления машинной выправкой и могут передаваться в АСУ ТП ТО в качестве исходной информации для расчета потребного объема балласта и выработки управляющих воздействий на разгрузочно-дозировочное устройство хоппер-дозатора.

1.5.2 Техническое обеспечение системы.

Требования к техническому обеспечению системы минимальные: контроллер, измерительное устройство машины ВПР с датчиками пройденного пути, измерения стрел изгиба в плане и продольном профиле относительно базы измерительного устройства, положения рельсовых нитей по уровню, подъемно-рихтовочное устройство машины ВПР и компьютер, при этом вход контроллера соединен с датчиками измерительного устройства машины, а выход - с подъемно-рихтовочным устройством машины ВПР, а компьютер с контроллером.

Состав микропроцессорной системы: бортовой компьютер, включающий в себя: корпус металлический с встроенным монитором; промышленную системную плату с аналоговыми и цифровыми интерфейсами и процессором 500 МГц; оперативную память 128 Мб; промышленный флеш диск 1,0 Гб. Корпус бортового компьютера герметичный, пыле-влагозащищенный, виброударопрочный с разъемами питания и внешних соединений, а способ крепления на площадку. Потребление энергии от бортовой сети не более 50 Вт. Степень защиты бортового компьютера IP-56. Габаритные размеры оптоэлектронной системы контроля положения реперных меток не должна превышать 100 x 400 x 150 мм (ширина x высота x глубина). Компьютер крепится на раму контрольно-измерительной тележки, масса системы не более 10 кг, потребление энергии от бортовой сети не более 30 Вт, а степень защиты системы IP-56. Бортовой компьютер, устанавливаемый на машины типа ВПР, Дуоматик 09-32, ВПО должен обеспечивать управление сдвигом и подъемкой пути через цифроаналоговый преобразователь (ЦАП)

Автоматизированная система выправки пути обеспечивает: измерение вагоном путеизмерителем параметров состояния рельсов железнодорожного пути в плане, продольном профиле и по уровню; обработка полученной информации; проведение расчета параметров состояния пути в плане, продольном профиле и по уровню и соответствующих им расчетных перемещений пути; построение программных заданий, содержащих эталонные значения показаний датчиков, используемых компьютеризированных выправочно-подбивочно-рихтовочных машин, определяющих заданное положение пути в плане, продольном профиле и по уровню; управляет рабочими органами машины для выполнения работ по выправке пути.

Недостаток автоматизированной системы выправки пути на базе микропроцессорной системы управления рабочими органами выправочно-подбивочных машин: требуется предварительная измерительная поездка в «окно», выделенное машине ВПР для выправки пути, что снижает ее производительность, особенно при коротких «окнах». Непроизводительные

затраты машинного времени при 1-часовом «окне» составляют от 50 до 80% для машин типа ВПР-02 и около 25% для машин непрерывно-циклического действия типа Дуоматик 09-32; необходимость принять решение по результатам расчетов выправки пути на перегоне при работе машины в «окна» снижает качество принимаемых решений; синхронизация положения ВПР по продольной координате пути при съемке и выправке осуществляют вручную и не всегда выполняется персоналом из-за дефицита времени, что может привести к ошибкам позиционирования машины на пути и, следовательно, к отклонениям от заданного положения.

Совершенствование алгоритма расчета постановки пути в проектное положение следующее. Предлагается, измерив стрелы изгиба (прогиба) пути, при расчете выправки пути определить его положение в пространстве относительно неподвижных координат, а выправку пути осуществить по результату сравнения этого положения пути в пространстве и дополнительного измерения стрел изгиба (прогиба) пути и возвышения одного рельса относительно другого. При движении машины измеряем стрелы изгиба пути в плане и продольном профиле и возвышение одного рельса относительно другого. Информация накапливается на всем протяжении измеряемого участка пути, подлежащего выправке, а затем расчетным путем определяется положение пути в пространстве относительно неподвижных координат (начала и конца работы машины. Для исключения влияния неточности измерения на результатах расчета положения пути в плане и продольном профиле относительно неподвижных координат первоначально сформированные измеренные стрелы подвергают сглаживанию. Алгоритм сглаживания в принципе может быть любой. Сглаженные значения стрел изгиба пути в качестве исходных данных используются в системе линейных уравнений [91,93].

$$\begin{aligned} q_1 &= [1 - \alpha/s] y_0 + y_1 - \alpha y_3 / s \\ q_2 &= [1 - \alpha/s] y_1 + y_2 - \alpha y_4 / s \\ &\dots\dots\dots \\ q_i &= [1 - \alpha/s] y_{i-1} + y_i - \alpha y_{i+2} / s \end{aligned} \tag{1.21}$$

.....

$$q_n = [1 - a/s] y_{n-1} + y_n - a y_{n+2}/s,$$

Где q_i – сглаженные значения стрелы в i -ой точке; y_i – ордината неровности пути в i -ой точке по длине пути месте расположения механизма выправки пути; y_{i-1} – ордината неровности пути в месте, отстоящем на расстоянии «а» от средней измерительной тележки, расположенной вблизи механизма выправки пути, фактически в месте расположения задней концевой тележки измерительной системы; y_{i+2} – ордината неровности пути в месте, отстоящей на расстоянии «а- s » от средней измерительной тележки, фактически в месте расположения передней концевой тележки измерительной системы. Так как в общем случае геометрические размеры измерительной базы не вписываются в дискретную сетку измеряемых значений стрел изгибов пути, то промежуточные значения ординат определяются через решение дифференциального уравнения упругой линии с учетом жесткости пути:

$$\pm \frac{\frac{d^2 y}{dx^2}}{\sqrt{\left[1 + \left[\frac{dy}{dx}\right]^2\right]^3}} = \frac{M(x)}{EJ} \quad (1.22)$$

где x - текущее значение координаты по длине пути; y - соответственно ордината неровности в точке « x »; $M(x)$ –изгибающий момент в точке « x » по длине пути; EJ - жесткость путевой решетки.

Таким образом вычисляем пространственное положение пути в плане и профиле относительно не сдвигаемых точек по длине пути (в данном случае начало и конца работы машины). Рассчитываются и определяются имеющиеся на пути параметры кривизны в плане, возвышения по уровню: начало (конец) и длины переходных кривых в плане и по уровню, радиусы и возвышения в круговых кривых; неровности в продольном профиле: короткие и длинные лощины, если расчетные параметры криволинейных участков отличаются от проектных, то вводятся проектные параметры кривизны с их привязкой к длине пути .далее проводится расчет величин сдвижек и подъемов пути относительно

расчетной траектории, соответствующей фактической кривизне и отметкам в продольном профиле или проектной кривизне и также отметкам в продольном профиле.

Предложенный алгоритм, исключает зависимость от фактического положения пути, а именно, на основе предварительно измеренных стрел изгиба пути в плане и продольном профиле, положения пути по уровню и жесткости пути определить положение пути в пространстве относительно неподвижных координат, относительно которых и с учетом проектных параметров пути производить расчет подъемов и сдвижек пути с учетом проектных параметров пути. Отступление от проектного положения кривой влияет на изменение значений непогашенного ускорения и, как следствие, изменение допускаемых на участке скоростей движения, поэтому применение алгоритма сглаживания кривой или алгоритма расчета и постановки кривой в проектное положение недопустимо, в том числе и на основании требований изложенных, например [95], не допускающей того, что «сломанная» простая кривая после ремонтных работ превращается в много радиусную с пятью-семью радиусами, как это иногда раньше бывало на практике.

Необходимо доработать автоматизированную систему выправки пути по методу определения фактического положения пути в пространстве относительно заданной системы отсчета, позволяющую выявить и рассчитать все неровности пути в плане и продольном профиле на прямых и кривых участках пути. Обнаруженные автоматизированной системой отклонения явятся основой, как для выполнения технологических операций машины, так и для расчета потребного объема щебня. Система можно становить на всех типах на выправочно-подбивочно-рихтовочных машинах цикличного, непрерывно-цикличного (типа ВПР, ВПРС, Дуоматик, Унимат и др.) и/или непрерывного (типа ВПО-3000, ВПОЗ-3000, балластерах, ДСП, МДС и др.) действия, а также на автомотрисах, дрезинах и др.

Таким образом можно сделать вывод о том, что микропроцессорная система, устанавливаемая на выправочно-подбивочно-рихтовочные машины,

может быть применена в автоматизированной системе управления технологическим процессом планово-предупредительной выправкой пути при наличии соответствующих алгоритмов и технических средств обеспечивающих автоматическую выгрузку и укладку балластных материалов.

1.6. Зарубежный опыт автоматизации процессами выгрузки и укладки балласта в путь

В основе автоматизированной и механизированной технологии текущего содержания пути лежит разработка системы дистанционное управление крышками разгрузочных люков специального подвижного состава с целью повышения выработки в окно при выгрузке и укладки в путь балластных материалов. Анализ перспективных конструкций специального подвижного состава (СПС), эксплуатирующего на железных дорогах США и Европы, показывает, что одним из направлений совершенствования конструкции СПС является обеспечение возможности дистанционного управления разгрузочными устройствами [96,97,98,99,100].

Корпорация Plasser American, американский филиал компании Plasser & Theurer (Австрия), разработала систему измерения профиля балластной призмы на базе путеизмерительного вагона. Обработанные результаты измерений позволяют подать сигнал на рабочие органы распределителя балласта типа PBR-2005 для выгрузки балласта. Компания Plasser American предлагает также балластораспределительную машину BDS 100/200 с подачей балласта из бункера с помощью конвейера (см. рисунок 1.10 а). Plasser American выпускает также балластоочистительную машину RM 802, которая подбирает и просеивает, допускается возможность смешивания свежего балласта с очищенным, что позволяет продлить срок службы последнего.

Корпорация Herzog Contracting поставляет оборудование, обеспечивающее укладку балластного материала точно в указанном месте. Herzog осуществляет доставку и выгрузку балласта с помощью поездов типа PLUS Train, оснащенных специальным компьютеризированным оборудованием, работающим по сигналам

системы спутникового позиционирования GPS и обеспечивающим автоматическое открытие и закрытие люков полувагонов или хопперов точно в требуемых местах при движении со скоростью до 36 км/ч. Помимо собственных поездов PLUS Train, Herzog предлагает железным дорогам для оснащения их подвижного состава системы электромеханического или гидравлического привода разгрузочных люков, работающие с питанием от солнечных батарей или от генераторов и имеющие автоматизированное дистанционное управление. Для повышения качества работ по выгрузке и распределению балластного материала вагоны поездов компании Herzog оснащаются запатентованными автоматизированными приспособлениями.

Щетки этих приспособлений счищают балластный материал, попавший на поверхность катания рельсов, а отвалы, выдвигающиеся на 30 см в обе стороны от рельсов, выравнивают выгруженный балластный материал во избежание образования валиков. Кроме того, Herzog выпускает широкую номенклатуру оборудования для работ по текущему содержанию пути, начиная с самоходной многофункциональной машины типа MPM, способной рыть дренажные кюветы для отвода воды от путевой структуры, планировать обочины и откосы насыпей и выемок или выполнять погрузочно-разгрузочные работы с разными элементами верхнего строения пути, и кончая быстро устанавливаемыми навесными приспособлениями к подъемно-транспортному оборудованию, такими, например, как магниты или механические захваты для шпал. Корпорация Herzog Contracting разработала комплекс P.L.U.S. Train (рисунок 1.10 б), который использует глобальную систему позиционирования (GPS) для обеспечения более высоких скоростей и точности укладки и распределения балласта. Каждый вагон балластировочного поезда оснащен компьютерной системой управления люками с гидравлическим приводом и соединен с центральной системой управления поезда. Питание приводов люков всех вагонов осуществляется централизованно, но на каждом вагоне имеется резервная аккумуляторная батарея.

В случае полного отказа системы питания крышки люков закрываются. Один оператор, находящийся на локомотиве или в поле, управляет

технологическим процессом непосредственно или по высокочастотной связи. Специалист Herzog Contracting или железнодорожной компании до начала работы проводит визуальный осмотр конкретного участка, фиксируя в переносном компьютере точные данные, определяющие, где и сколько балласта должно быть выгружено. Затем он подключает компьютер к системе управления поезда и активирует аппаратуру системы GPS, после чего начинается разгрузка. Можно управлять люками всех вагонов, направлением разгрузки (налево или направо), регулировать подачу балласта.

Miner Enterprises выпускает гамму приводов AggreGate для механизации открытия люков для выгрузки балласта. Усовершенствованные запорные устройства люков с одно- или двухцилиндровым пневматическим приводом оснащаются ручным или дистанционным (по радио) управлением. Комплект запорных устройств дополняется солнечными панелями с радиоуправлением для подзарядки аккумуляторных батарей, что позволяет размещать вагон-хоппер в любом месте поезда.

Корпорация Knox Kershaw выделяет новый распределитель балласта типа KBR-925, модернизирован дозатор балласта серии KBR900 с учетом требований операторов, что позволило выполнять все работы по техническому обслуживанию машины с уровня земли. Машина для подрезки балласта KBC 750 разработана компанией Progress Rail Services для подборки и очистки балласта по всему сечению балластной призмы без необходимости в разборке рельсошпальной решетки с производительностью до 750 м³ балластного материала в час с повторной укладкой в путь и оборудована компьютерной системой управления. Система управления позволяет операторам контролировать и согласовывать скорость движения машины и транспортера. Если скорость транспортера снижается, автоматически снижается скорость машины.

Компании Georgetown Railway Equipment имеет скорость разгрузки до 2000 т балласта в час. Все работы по отсыпке балласта контролирует один оператор. Поезд длиной 305 м, состоящий из вагонов 56,5 м³, имеет поворотную стрелу длиной 15,25 м, что позволяет выгружать балласт в нужное место площадки без

дополнительной перегрузки (рисунок 1.10в). Поезд длиной 114 м состоит из сочлененных полувагонов с откидывающимися торцовыми стенками, образующими сплошной настил, по которому может перемещаться экскаватор. Принцип работы экскаватора с уровня пола вагона позволяет уменьшить продолжительность окон, выделяемых для текущего содержания. При нарезке траншей оператор может отделять выбранный грунт от балласта, что позволяет исключить загрязнение последнего.

Harsco Track Technologies разработана балластораспределительная машина Stoneblower (рисунок 1.10 г). Stoneblower при помощи струи сжатого воздуха нагнетает балласт под шпалы (суфляж), что гарантирует точность положения пути в пределах 1 мм и не нарушает целостность ранее уложенных участков балластной призмы, подбалластного слоя и позволяет увеличить интервалы между очередными ремонтами верхнего строения пути. Подачу балласта регулирует компьютерная система управления. Бортовой кран загружает машину балластом менее чем за 1 ч. Harsco и ТТС рассматривали возможность испытания Stoneblower на полигоне в Пуэбло.

Корпорация Miner Enterprises предлагает для балластоукладочных поездов и вагонов устройства семейства AggreGate для управления люками с тремя вариантами привода: ручным (Manual), пневматическим (Air Powered) и электрическим (Electric).



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.10. Общие виды некоторых зарубежных балластно-распределительных машин

а) Балластораспределительная машина BDS 100/200 Plasser American; б) Комплекс P.L.U.S. Train Herzog Contracting; в) Балластоукладочный поезд Dump Train Georgetown Railway Equipment; г) Машина Stoneblower Harsco Track Technologies.

1.7. Выводы по первой главе

На основе проведенного анализа объема работ и применяемых при техническом обслуживании железнодорожного пути машин и механизмов:

- установлено, основной объем работ по техническому обслуживанию железнодорожного пути приходится на работы с балластом, технология которых применима в АСУ ТП в виде цепочки технических средств, объединенных одним интерфейсом: машина типа ВПР, хоппер-дозатор, вагон-путеизмеритель;

- разработана пооперационная схема технологического обеспечения АСУ ТП техническим обслуживанием железнодорожного пути АСУ ТП ТО и ее структурная схема в рамках АСУ путевым хозяйством;

- рассчитан объем хоппер-дозаторов потребный для выполнения плановых ремонтов пути и разработана технологическая схема автоматизации управления технологическим процессом планово-предупредительной выправкой пути;

- обоснованы возможности использования для формирования информационной базы АСУ ТП ТО технического и программного обеспечения вагонов

путеизмерителей ЦНИИ-4, оборудованных устройствами автоматической записи и обработки информации о состоянии железнодорожного пути, а для управления рабочими органами путевых машин типовой микропроцессорной системы, устанавливаемой на выправочно-подбивочно-рихтовочные путевые машины;

-разработаны технические требования к модернизации хоппер-дозаторов ВПМ 770 с прерывистой выгрузкой для обеспечения автоматизации процессов выгрузки и укладки балласта в путь

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ТРЕНДОВ С УЧЕТОМ КОРРЕЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПУТИ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ПУТЕВЫХ РАБОТ.

2.1. Методы прогнозирования изменения технического состояния железнодорожного пути.

В предыдущей главе была обоснована возможность применения вагонов путеизмерителей для формирования информационной базы, обеспечивающей работоспособность автоматизированной АСУ ТП ТО. Однако, если не анализировать пред историю и не прогнозировать возможность появления неисправностей пути, негативно, влияющих на перевозочный процесс, АСУ ТП ТО работать будет исключительно под неотложные работы. Для повышения эффективности работы системы необходимо рассчитать прогнозные значения, планировать, и устранять потенциально опасные неисправности на основе полученных закономерностей и моделей прогнозирования.

Вопросы прогнозирования изменения технического состояния участков пути присутствуют в той или иной степени во многих работах по изучению закономерностей появления отказов пути и его элементов, наиболее известны работы Вериги М.Ф., Ершков О.П., Лысюк В.С., Коган А.Я., позже Певзнер В.О., Левинзон М.А., Сычев В.П., Бельтюков В.П., Блажко Л.А., Глюзберг Б.Э., Виноградов В.В., Ашпиз Е.С., Мишин В.В. Локтев А.А. Крейнис З.Л.и другие. Однако наблюдения за работой железнодорожного пути проводились и раньше, в частности Золотарским А.Ф., П.П. Цукановым, Е.М. Бромбергом, М.Т. Членовым, С.В. Амелиным; Г.Е.Андреевым; М.А. Фришманом; В.Г., Альбрехтом; М.А.Чернышовым В.И. Тихомировым и другими исследователями.

Нормативные документы регламентирующие комплексную оценку состояния пути, предложенную В.О. Певзнером, Каменским В.Б., В.П. Конаковым

после проведения весеннего и осеннего генеральных осмотров пути, предназначены для оптимизации распределения фондов затрат на текущее содержание и ремонты пути и не представляют возможность на их прогнозирования вырабатывать управляющие воздействия на путь, а служат для оценки содержания пути, хотя и позволяют при прогнозировании учитывать объемы путевых работ и затраты на них [6,7,9, 15, 101,102]. Как показали исследования в работах [10,11,103,104,105] средняя интенсивность накопления деформаций в вертикальной плоскости для неровностей II - III степеней в основной период работы пути достигает величин 0,8-1,8 мм/млн. т брутто, а в период перед очередным ремонтом - до 2,1 мм/млн. т брутто и более. Вопросами оценки содержания рельсовой колеи по динамическим показателям решали Ершков О.П., Певзнер В.О., Вериго М.Ф., Коган А.Я, Ромен Ю.С. и другие исследователи [30, 72, 106,107,108,109,110,111]. Певзнер В.О, с учениками [10,112,113] предложил в качестве критерия назначения ремонта пути наличие в пути уже существующих неисправностей, требующих снижения скорости, но при этом, в пути не должно быть неисправностей, требующих ограничения скорости до 15 км в час. Также предлагается проводить сплошную выправку, которая назначается при обнаружении путеизмерителем 3–5 неисправностей на километре, при которых требуется снижение скорости до 60 км в час, что соответствует величинам просадок 25 – 35 мм или отклонений по уровню 20 – 30 мм. Данные исследования показывают, что приведенные значения соответствуют среднеквадратическим отклонениям по просадкам и уровню, равным 5 мм.

Однако для цели настоящего исследования вопрос оценки содержания рельсовой колеи вторичен, ибо задача АСУ ТП выработать управляющие воздействия на рабочие органы путевых машин с целью устранения неисправности рельсовой колеи. Поэтому задача настоящего исследования, получить прогнозные значения показателей оценки состояния пути, которые как описано в предыдущей главе. В этой связи интерес представляют работы [15, 102, 111, 114, 115, 116,117], в которых решаются вопросы построения моделей

прогнозирования изменения неровностей пути на основе детерминированных моделей, моделей экспоненциального сглаживания, и планирования путевых работ и Прогнозированием интенсивности нарастания остаточных деформаций железнодорожного пути и земляного полотна активно занимаются в Российском университете транспорта в институте пути и строительства Шепитько Т.В. Виноградов В.В., Ашпиз Е.С. и др.[118,119, Возможность количественной оценки текущего содержания пути рассмотрена в [15, 31], а более детально методика практического прогнозирования интенсивности накопления остаточных деформаций рассматривается в работах[92, 103, 104, 114, 115, 120, 121]. Опыт иностранных авторов по оценке и прогнозированию состояния пути опирается систему комплексной оценки состояния пути по критериям безопасной эксплуатации с установленными скоростями [112]. При получении показателей, отражающих не обеспечение безопасности, принимается решение о снижении эксплуатационных скоростей или на определение необходимых ремонтов, которые снижают значения интенсивность накопления остаточных деформаций пути. По данным зарубежных исследователей [122,123] никакие работы по текущему содержанию и ремонту пути не возвращают путь в исходное состояние, соответствующее начальному состоянию пути после его укладки и стабилизации, в частности, показателю качества Q_0 и по достижению некоего порогового уровня снижения качества его состояния Q_i , назначаются работы, после выполнения которых состояние пути улучшается.

На различных этапах создания методик прогнозирования технического состояния участков пути были определены основные показатели его состояния, количественная оценка которых определяет потребность ремонтов железнодорожного пути [102, 124, 125]. При оценке и прогнозировании параметров технического состояния отдельного участка пути основная задача состоит в получении максимально достоверных и актуальных данных при недостатке статистики и вариативности эксплуатационных условий, о чем более подробно будет ниже. В основе методики исследования [114, 118, 126] лежит

статистическая обработка массивов данных о состоянии элементов конструкции железнодорожного пути и их аппроксимация с заданным шагом.

Комплексная оценка состояния железнодорожного пути необходима для улучшения качества содержания и решения проблем технико-экономического характера оценки состояния пути и разработки комплекса мероприятий по его техническому обслуживанию.

Вопросами автоматизации планирования путевых работ занимались многие исследователи, однако следует отметить работы Мишина В.В., предложившего системный подход [92, 127] к расчету оптимальных интервалов пороговых среднеквадратических отклонений (далее СКО), при которых необходимо назначить планово-предупредительную выправку пути, описав комплексную методику автоматизированного планирования оздоровления колеи по фактическому состоянию, возможная к использованию для сплошной замены рельсов, усиленного, среднего и капитального ремонтов пути, при использовании которой учитывается специфика содержания пути на различных дорогах сети и магистральных направлениях. Наиболее точно показывает состояние пути такой показатель как, среднее квадратическое отклонение размеров неровностей, поэтому высказывалось предложение нормировать среднее квадратическое отклонение положения рельсовых нитей.

В.Б. Каменский, Певзнер В.О., Абдурашитов А.Ю. [15, 31, 129] предлагали внести изменения в систему ведения путевого хозяйства на основе уточнения классификации путей, по средством увеличения мощности верхнего строения земляного полотна и его несущей способности при помощи улучшения ремонтных схем и методов текущего содержания, направленных на сдерживание темпов роста путевых работ в условиях ограниченных пропускных способностей ряда железнодорожных линий.

Однако все эти вопросы, так или иначе связанные с анализом закономерностей изменения состояния пути, направлены на совершенствование планирования технического обслуживания и ремонтов железнодорожного пути, могут косвенным образом использоваться при решении задачи

совершенствования системы технического обслуживания железнодорожного пути за счет автоматизации процессов производства путевых работ. Для целей настоящего исследования требуется разработка моделей прогнозирования единичных неисправностей пути на анализируемом участке, поскольку только по единичным неисправностям можно определить потребный объем выгружаемого балласта.

В работах [130,131,132,133] предлагаются модели процесса изменения состояния пути на участке по статистическим характеристикам очертаний рельсовой нити и модели прогнозирования во времени, выраженные через детерминированную функцию, показывающую влияние различных факторов, которая генерируется случайным не автокоррелированным процессом с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией, обусловленной воздействием случайных возмущений.

Однако наша задача, учитывая необходимость автоматизации процесса управления рабочими органами путевых машин, построение адаптивных моделей прогнозирования появления неисправностей пути, негативно влияющих на перевозочный процесс и требующих устранения автоматизированным способом.

2.2 Теоретические основы адаптивного алгоритма мониторинга состояния рельсовой колеи на основе информации, полученной от вагонов путеизмерителей

Под адаптивным методом контроля будет понимать контроль с использованием процедур самоорганизации и самообучения математических моделей состояния контролируемых систем, в данном случае железнодорожного пути [135,136,137]. Известно, что в общем случае принцип адаптивного контроля применим как при наблюдении стационарных (установившихся) режимов работы систем, так и переходных процессов (динамических режимов) при работе этих систем.

Порядок работы алгоритма адаптивного контроля разобьем на два основных этапа. Предположим, что перед выполнением первого этапа объект контроля

(железнодорожный путь) находится в исправном состоянии. Теоретически проверка предположения будет заключаться в проверке путём предварительного контроля системы с использованием известных на данном этапе эксплуатации системы ограничений, разделяющих состояние системы на исправное и неисправное. Практически это будет выглядеть следующим образом, вагон путеизмеритель регистрирует состояние рельсовой колеи на анализируемом участке, оцениваемым по нормативным документам расшифровки показаний вагона как удовлетворительное, хорошее или отличное, при этом вагон дефектоскоп не выявил дефектность рельсов на участке по кодам дефектам, которые позволяют отнести рельсы к остродефектным [138].

На первом этапе происходит накопление статистических выборок оценки состояния участка железнодорожного пути с анализом объёма накопленных выборок и качество собранной информации. Если объём и качество информации отвечают критериям состоятельности, то решается задача выбора адекватной модели, описывающей состояние системы, со структурой оптимальной сложности. После выбора адекватной модели выполняется процедура параметрической идентификации коэффициентов этой модели. Для установившихся режимов, процедуры параметрической идентификации модели основываются на робастных (помехоустойчивых) методах линейного и нелинейного регрессионного анализа, а для динамических моделей модификация дискретно-непрерывной процедуры идентификации, например, методов максимального правдоподобия [134, 139, 140].

Второй этап адаптивного контроля начинается после формирования моделей в процессе накопления и обработки выборки соответствующих параметров на установившихся или (и) переходных режимах контролируемой системы, причем оценивается достаточности объёма выборок для выполнения процедур параметрической идентификации [141,142]. Основная задача установление факта идентичности структуры модели текущего состояния, структуре модели эталонного состояния. При совпадении структур моделей текущего и эталонного состояния выполняется процедура параметрической

идентификации с целью определения коэффициентов модели, описывающей текущее состояние контролируемой системы [142,143]. Математическая модель состояния объекта контроля (состояния железнодорожного пути) имеет r коэффициентов. Обозначим их в виде вектора $\vec{a}$ размерностью $(r \times 1)$. Тогда вектор $\vec{a}_i$ будет отображать состояние контролируемой системы после i -го прохода вагона путеизмерителя. Таким образом, траектория движения вектора $\vec{a}_i$ в r -мерном пространстве отобразит изменение состояния контролируемой системы. Если r -мерное пространство коэффициентов модели состояния дополнить ещё одной координатой, а, именно, параметром объемов выполненных работ (наработки) при текущем содержании контролируемой системы (железнодорожного пути), то в новом $(r + 1)$ -мерном пространстве можно будет решать задачу не только прогнозирования развития дефектов пути, но и оценки стабильности системы (состояния железнодорожного пути) [144,145,146].

После выбора адекватной модели прогноза будем проводить идентификацию её коэффициентов, например, с помощью процедур робастного нелинейного регрессионного анализа. На основании оценки величины доверительного интервала прогноза выполняется расчёт шага прогнозирования, обеспечивающего вероятность достоверной оценки прогнозируемого состояния контролируемой системы не менее 0,95 [140].

Как упоминалось выше, модели делятся на два типа: модели стационарных и квазистационарных режимов и модели динамических режимов. Принципы формирования данных моделей существенно различаются. Модели для описания работы систем на стационарных и квазистационарных режимах, могут представлять алгебраические (полиномиальные), трансцендентные, частотные, экспоненциальные и логарифмические уравнения [147].

Модели для описания работы систем на динамических режимах, могут описываться линейными и нелинейными дифференциальными уравнениями в форме Коши, дифференциальными стохастическими уравнениями, дифференциальными уравнениями в частных производных. Однако модели динамических режимов в данной работе не рассматриваются, так как режим

изменения состояния железнодорожного пути может считаться стационарных, а в части оценки дефектности рельсов квазистационарным [144,148].

2.3. Основные принципы построения моделей для стационарных и квазистационарных режимов

Значения параметров состояния железнодорожного пути, зарегистрированные при проходах по анализируемому участку железнодорожного пути вагоном путеизмерителя или вагоном дефектоскопом, не могут быть напрямую использованы для диагностирования, потому что все значения параметров. Это обусловлено тем, что для построения правильной эталонной матрицы, значения параметров, входящие в эту матрицу, должны подчиняться нормальному закону распределения. Известно [149], в том числе и из теории дискретных измерений, что каждое отдельное измерение подчиняется равномерному закону распределения. Но неизвестно, какому закону будет подчиняться совокупность измерений одного параметра (например, состояние рельсовой колеи по всем параметрам, оцениваемым вагоном путеизмерителем) в течение работы системы на выбранном режиме (в процессе ежемесячных проходов вагона путеизмерителя и выполнения работ по текущему содержанию пути). Поэтому, все параметры состояния железнодорожного пути должны быть определенным образом обработаны следующим образом. Последовательность значений зарегистрированного параметра разбивается на группы, для каждой из которых вычисляется среднее значение. В этом случае можно гарантировать, что совокупность значений, подсчитанных для групп, будет подчиняться нормальному закону распределения. Опираясь на принцип работы контролируемой системы выделим группу параметров, на основании которых математически описывается работа системы по критерию «вход – выход» с использованием принципа декомпозиции и получением зависимостей вида:

$$y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \text{ или } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_n, u_1, u_2, \dots, u_m), \quad (2.1)$$

где $x_1, x_2, \dots, x_n$ - вектор входных параметров, $u_1, u_2, \dots, u_m$ - вектор параметров управления.

Функциональная связь между зависимыми параметрами и параметрами управления, независимыми параметрами и параметрами управления известна, ее модель не надо определять, но эту связь в модели системы надо учитывать. Для получения эвристической модели надо или проводить предварительные исследования с целью определения её структуры (вида зависимости), или закладывать в математический аппарат диагностирования процедуру структурной идентификации (СИ), имеющую цель – определить оптимальную по сложности зависимость между выходным параметром и входными и управляющими параметрами. Критерием сложности структуры модели является количество коэффициентов для ее описания. Здесь следует также учитывать, что в процессе эксплуатации контролируемой системы, изменения состояния последней могут сопровождаться и изменениями структуры модели этой системы. Поэтому аппарат структурной идентификации имеет также цель определения диагностических признаков перехода контролируемой системы из одного состояния в другое [146,149].

Механизм структурной идентификации подразумевает параметрическую идентификацию моделей, т.к. необходимо оценить качество конкретного типа зависимости, на основании которой построена модель, по определенным критериям [150]. Таким образом, в процессе структурной идентификации будут параметрически определены несколько разных по структуре моделей до тех пор, пока не будет определена только одна модель, удовлетворяющая критериям оптимальной сложности. Подсистема $\Pi(P,S)$ – это совокупность набора зависимых, независимых и управляющих параметров, в которой P – перечень зависимых параметров, S – перечень и диапазоны изменения определяющих параметров. Диагностируемая система, в конечном итоге описывается совокупностью подсистем, каждая из которых в свою очередь описывается совокупностью $\Pi(P,S)$. Так как диапазоны независимых параметров (по крайней мере, по одному основному параметру) не пересекаются, взаимовлияния между подсистемами нет. Однако, диагностические признаки ухудшения состояния системы, как правило, проявляются в нескольких соседних подсистемах. Это

очевидно для состояния рельсовой колеи, если разбить систему состояния железнодорожного пути на подсистемы, соответствующие состоянию отдельных элементов. Действительно, дефект шпалы может повлечь нарушение состояния рельсовой колеи и по уровню, и по ширине колеи. Поэтому, зачастую при появлении признаков ухудшения системы, например, на одной подсистеме принимается решение по всем подсистемам для данной подсистемы.

Таким образом, определим некоторое множество независимых моделей, элементами которого являются $\Pi(P,S)$, в котором любые две $\Pi(P,S)$ не связаны ни коим образом по заранее назначенной определяющей входной переменной и, следовательно, не пересекаются в n -мерном пространстве состояний, где n – суммарное количество входных и выходных параметров. При этом, определяющей считается независимая переменная, оказывающая наибольшее влияние на зависимые переменные (имеющая с ними наибольший коэффициент корреляции). Данное множество задаётся на этапе экспертной работы по определению подсистем и типов моделей. Это множество является стабильным и не меняется с течением времени по мере накопления статистической информации.

Если рассмотреть признаки неисправностей, которые были выявлены в процессе диагностирования системы (состояния железнодорожного пути), то наблюдается иная картина. В рамках одной подсистемы Π существуют пересечения нескольких $\Pi(P,S)$ по признакам неисправностей. В каждой строке матрицы состояния железнодорожного пути хранится для соответствующего момента времени значения независимых параметров, в общем случае образующих вектор, и значение зависимой переменной. Таким образом, в каждом столбце находятся значения соответствующей независимой переменной и, в последнем столбце, значения зависимой переменной для каждого момента времени измерения в одном или нескольких полётах.

При контроле систем на стационарных и квазистационарных режимах должна быть накоплена матрица эталонных значений параметров E_i . Матрица накапливается в процессе диагностирования $\Pi(P,S)$ разных проходов вагона путеизмерителя и для каждого прохода формируется матрица актуального

состояния A , которая состоит из значений зависимых и независимых переменных. В процессе обучения эталонной матрицы в нее попадают все значения, взятые из матрицы актуального состояния A . Теория регрессионного анализа, на которой основывается контроль систем на стационарных и квазистационарных режимах, подразумевает получение достоверных допусков для выходных параметров в случае достижения в обучающей матрице нормального закона распределения, в 66%-ю квантиль которого входили бы все накопленные в матрице значения входных параметров. В общем случае должна выполняться процедура структурной идентификации модели контролируемой $\Pi(P,S)$, для того, чтобы улучшить модель работы $\Pi(P,S)$ по заранее заданным критериям. В простейшем случае модель эталонного состояния представляет собой линейную модель типа $y = a_0 + \sum_{k=1}^m a_k x_k$, получающуюся путем выполнения процедур структурной и параметрической идентификации с использованием матрицы эталонного состояния E_i . Здесь m – количество независимых (входных) переменных модели эталонного состояния контролируемой $\Pi(P,S)$, a_i – коэффициенты модели эталонного состояния [150].

Процедура параметрической идентификации коэффициентов модели систем для стационарных и квазистационарных режимов, заключается в определении ковариационной матрицы C , которая состоит из коэффициентов c_{ij} , определяющих степень связи соответствующих независимых входных переменных. Для вычисления границ допусков используются: коэффициенты эталонной модели; ковариационная матрица C ; сумма квадратов отклонений s_{ko} эталонной модели от реальных значений выходной переменной y ; количество m независимых входных переменных; количество n строк (наблюдений) в матрице эталонного состояния. Ширина допусков определяется по t -критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 0,95 и 0,99. Значения t -критерия Стьюдента зависят от количества наблюдений n в матрице эталонного состояния и аппроксимированы полиномом n –х степеней [143,149, 151]. На практике

используются нелинейные модели прогноза для наглядности сведенные в таблицу 2.1.:

Таблица 2.1. Нелинейные модели прогноза

Экспоненциальная зависимость:	кривая Гомперца
$y_i = c + a \cdot b^{t_i}; \quad (2.2)$	$y_i = d + c \cdot a^{b^{t_i}} \quad (2.3)$
логарифмическая кривая:	универсальная функция:
$y_i = d + c \cdot \ln^b(a + t_i) \quad (2.4)$	$y_i = d + a \cdot t_i^b \cdot e^{ct_i} \quad (2.5)$

Для применения детерминированных моделей, построенных на основе регрессионного анализа надо быть уверенным, что выполняется одна из предпосылок регрессионного анализа о некоррелированности входных переменных, а это значит, что оценки коэффициентов регрессионного уравнения, вычисленные по методу наименьших квадратов, будут смещены, поскольку матрица Фишера S в формуле для вычисления коэффициентов уравнения будет плохо обусловленной [76,168,169], т. е. определитель матрицы стремится к нулю. Если отказаться от требования несмещенности оценок коэффициентов модели и найти оценки, которые хотя и смещены, но имеют меньший квадрат ошибки, чем оценки, вычисленные по методу наименьших квадратов, то придется применить так называемые методы регуляризации, например, гребневой регрессии и главных компонент. Однако неинвариантность входных переменных при изменении их масштаба измерения и отсутствие формальной процедуры выбора коэффициентов модели по методу гребневой регрессии не обеспечат точность прогноза. Поэтому следует обратиться к адаптивным моделям.

2.4 Построение адаптивных моделей и разработка алгоритма прогнозирования состояния рельсовой колеи по показаниям вагона путеизмерителя

Вагон путеизмеритель записывает состояние рельсовой колеи как непрерывный случайный процесс в пространстве, оценивая состояние участка пути в виде комплексного показателя, в частности бальной оценки превышений

амплитуд неровностей рельсовой колеи определенным нормативным документам допускам содержания железнодорожного пути [80 152], компьютерная распечатка с вагона путеизмерителя приведена в первой главе рисунке 1.9. На рисунке 2.1 «а» схематично приведена запись вагона путеизмерителя как случайного процесса от протяженности L с амплитудой A , а на рисунке 2.1 «б» нелинейное преобразование $A \rightarrow 1(A-C)$ ограничитель (детектор) по C , определяющей степени неисправности по нормативным документам ОАО «РЖД». Нелинейное преобразование $A \rightarrow 1(A-C)$ определяется на основе нормативных документов, определяющих степень допустимого отступления от норм содержания рельсовой колеи. Состояние за N проходов вагона путеизмерителя можно представить [153,154] как выборочную реализацию из бесконечного множества выборок, генерируемых стохастическим случайным процессом [150].

Таким образом, вагон - путеизмеритель по результатам прохода по участку L выдать некую интегральную оценку участка пути B (балльная оценка участка или количество отступлений на участке, или скользящее среднее, не суть важно). За N проходов вагона путеизмерителя по выбранному участку пути совокупность этих оценок B_i можно представить, как выборочную реализацию временного ряда $B(N)$ от N проходов вагона путеизмерителя [115].

$$B(N) = M + \zeta, \quad (2.6)$$

где M - модель процесса изменения состояния пути на участке во времени (от пропущенного тоннажа), ζ - характеризует влияние различных факторов (погрешность средств диагностики, установленных на вагоне, ошибки оператора и т.п.) и генерируется случайным не автокоррелированным процессом с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией случайных возмущений.

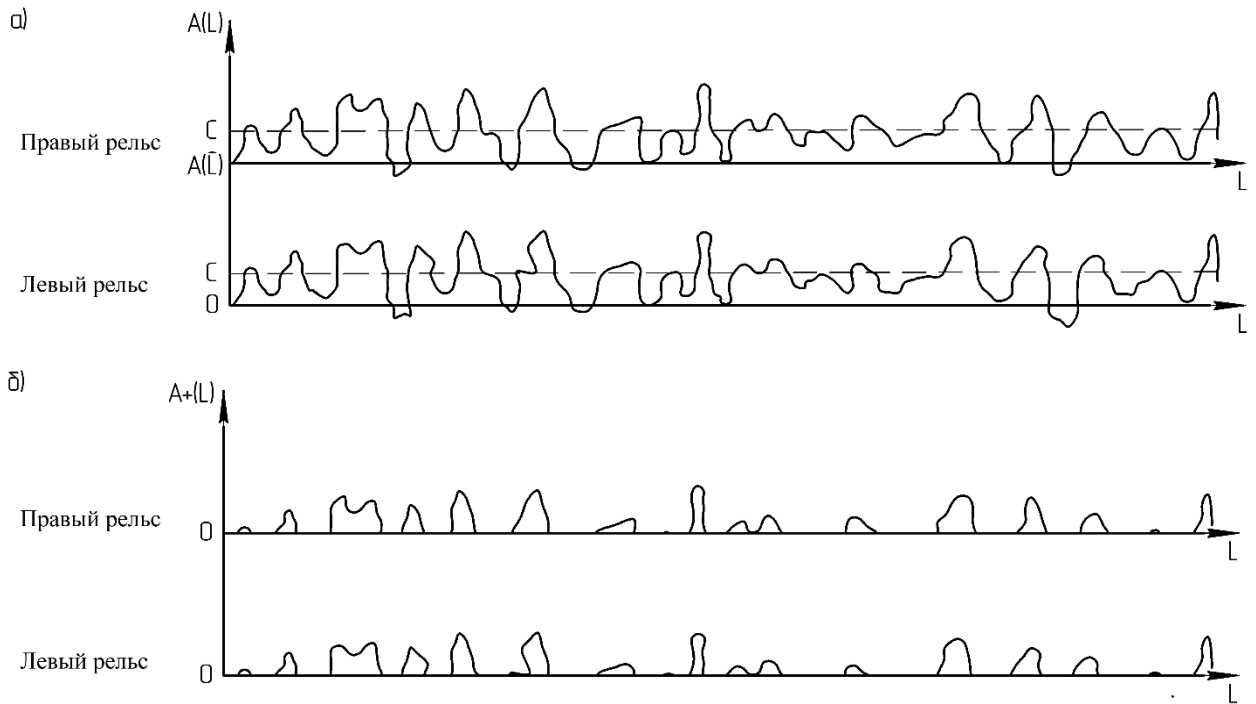


Рисунок 2.1 Запись состояния рельсовой колеи по показаниям вагона путеизмерителя: (а) в виде случайного процесса и (б) нелинейного преобразования $A \rightarrow 1(A-C)$ ограничитель(детектор) по C .

Модель процесса M сгенерируем детерминированной функцией в виде полинома порядка n :

$$M = \bar{\sigma}_0 + \bar{\sigma}_1 k + \frac{\bar{\sigma}_2}{2} k^2 + \dots + \frac{\bar{\sigma}_n}{n!} k^n = \sum_{i=0}^n \frac{\bar{\sigma}_i}{i!} k^i, \quad (2.7)$$

где k — номер прохода вагона-путеизмерителя; $\bar{\sigma}_i$ - постоянные коэффициенты, для определения которых берутся взвешенные значения наблюдений $\omega_k B_k$ ($k = 1, \dots, N$) при ω_k , убывающих соответственно количеству проходов вагона-путеизмерителя.

Ставится задача, определить порядок полинома и оценить сходимость модели. На основе анализа адаптивных моделей в предыдущем параграфе примем допущение, что веса наблюдений убывают по экспоненте и в этом случае оператор экспоненциального сглаживания порядка p будет иметь вид:

$$S_t^{(p)} = \alpha S_t^{(p-1)} + (1 - \alpha) S_{t-1}^{(p)}, \quad (2.8)$$

где α — коэффициент сглаживания

Существует система $(n + 1)$ уравнений, связывающих сглаженные величины $S_t^{(p)}$ с производными B_t^i т. е.

$$S_t^{(p)} = \sum_{k=0}^n (-1)^k \frac{B_t^k \alpha^p}{k! (p-1)!} \sum_{j=0}^{\infty} j^k (1-\alpha) \frac{(p-1+j)!}{j!}. \quad (2.9)$$

Решение этой системы позволяет получить значения b_i . Для определения порядка полинома вычисляем разности n -го порядка:

$$\begin{aligned} \Delta B[k] &= B_{k+1} - B_k, \\ \Delta^2 B[k] &= \Delta B[k+1] - \Delta B[k] \\ &\dots\dots\dots \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\Delta^n B[k] = \Delta^{n-1} B[k+1] - \Delta^{n-1} B[k]$$

Для каждой разности определяем средние значения

$$\bar{\Delta}^n B[k] = \frac{\left[\sum_{i=1}^N \Delta^n B[k] \right]}{n} \quad (2.11)$$

Если разности $(n - 1)$ -го порядка в среднем не равны нулю, а среднее разностей n -го порядка равно нулю, то моделью будет полином $(n - 1)$ -й степени, а начальной оценкой коэффициента перед старшим членом полинома среднее разностей $(n - 1)$ -го порядка [.

Проведенные исследования показывают, что, начиная с $n=3$, разности $(n-1)$ в среднем не равны 0, но среднее разностей n -го порядка пренебрежимо мало, и, следовательно, можно ограничиться полиномом второго порядка. Таким образом, модель будет выглядеть:

$$B = b_0 + b_1 N + 0,5 b_2 N^2 + \zeta, \quad (2.12)$$

где b_0, b_1, b_2 коэффициенты модели; ζ – случайная составляющая процесса.

Ряд, описываемый уравнением (2.12) часто называют рядом Юла. В следующей главе будут показаны зависимости, построенные на примере исходных данных, полученных с вагона путеизмерителя.

Отметим, что B_i зависит только от настоящего и прошлых значений случайной последовательности ε_i и не зависит от ее будущих значений [156].

Оптимальное значение α для адаптивной модели будет определяться из условия минимизации выражения (2.6), то есть, взвешенная сумма квадратов отклонений сглаженных значений ряда от его истинных значений является минимальной.

$$l = \alpha \sum (1 - \alpha)(x_{t-i} - x_{t-i})^2. \quad (2.13)$$

Аппроксимируем полученную зависимость и про экстраполируем, приняв для каждой выборки уравнение регрессии:

$$A_i = \beta_1 t + \beta_0, \quad (2.14)$$

где β_1, β_0 — коэффициенты модели, определяемые по методу наименьших квадратов; A_i — амплитуда неровности или, если оцениваем участок пути, то B_i ; t — число дней или число проходов вагона-путеизмерителя; i — порядковый номер неровности. Степень полинома определялась из условия, что $\bar{\Delta}^n x[k] \rightarrow 0$ и дальнейшее увеличение n приводит к росту $\bar{\Delta}^n x[k]$. Степень полинома не превышала 2-й, а коэффициент α , подсчитанный для данной выборки, равен 0,01. Результаты прогноза на конкретных примерах показаны в главе 3.

Поле допуска степеней отступлений просадок согласно нормативным документам [80] составляет 5—10 мм, поэтому ошибка прогноза 1—2 мм допустима [157,158].

Для учета влияния работ по техническому обслуживанию железнодорожного пути между проходами вагона путеизмерителя коэффициенты модели должны приспособливаться к непрерывно меняющимся условиям эксплуатации железнодорожного пути. При получении коэффициентов модели (2.12) возьмем взвешенные значения интегральных(балльных) оценок участка пути по показаниям вагона-путеизмерителя, убывающие по экспоненте, при этом временные ряды балльных оценок предварительно выравниваются следующим образом: из оценки участка пути при $(j-1)$ -м проходе вагона-путеизмерителя вычитается оценка тех неисправностей пути, которые были фактически устранены и не обнаружены при j -м проходе. Влияние ζ заметно при переходе от не

выравненных рядов к выравненным и от рядов балльных оценок к рядам средних по участку ординат неровностей, а с увеличением пропущенного тоннажа низкочастотная составляющая процесса $\tilde{B}$ имеет тенденцию к росту, причем ярко выраженной периодической составляющей, вызываемой влиянием сезонности, не наблюдается.

Известно [115,116,132,161,162], что адаптивная модель будет оптимальна при значении параметра α , определяемого по формуле

$$\alpha = \delta \sqrt{1 + 0,25\delta} - 0,5\delta, \quad (2.15)$$

где $\delta = \sigma_{\tilde{B}}^2 / \sigma_{\varepsilon}^2$ - отношение дисперсий модели и случайной составляющей.

Чем больше дисперсия случайной составляющей σ_{ε}^2 , тем меньше значение α .

Аппроксимирующая модель рассчитывалась по $(N - 1)$ -й точке, причем N -я точка, соответствующая последнему проходу вагона-путеизмерителя, считалась контрольной. По ней эмпирически и оценивалась точность прогноза к N -му проходу вагона-путеизмерителя. Принято считать прогноз точным, если рассчитанное по модели значение $A_{N_{np}}$ попадает в диапазон $A_N + \gamma$, где A_N — фактическое замеренное значение ординаты неровности N -го прохода путеизмерительного вагона; γ — погрешность записи измеряемых величин. Как показывают исследования [130,131, 133, 156, 157], погрешности измерения параметров рельсовой колеи вагоном-путеизмерителем превышают паспортные значения, однако погрешность γ была установлена на основе паспортных значений, что предъявляет еще более жесткие требования к оценке точности прогноза.

В этом случае необходимо ввести фильтрацию данных выпадающих из выборки (выбросов), вызванных случайной ошибкой диагностики или внезапно появившимся дефектом, устраняемым немедленно.

2.5. Фильтрация информации о состоянии железнодорожного пути, получаемая с вагона-путеизмерителя

2.5.1. Применение фильтра Калмана. Фильтр Калмана основан на байесовской модели, похожей на скрытые марковские модели [149, 161, 162]. К моменту времени t фильтр Калмана восстанавливает вероятностное распределение для значения параметров в следующий момент $(t+1)$. Распределение описывается функцией плотности нормального распределения с вектором среднего μ_t и ковариационной матрицей Σ_t .

Вероятность как мера «нормальности» зарегистрированного значения состояния пути x_{t+1} равна

$$p_{t+1}(x_{t+1}) = p_{t+1}(x_{t+1} | \mu_t, \Sigma_t) \quad (2.16)$$

Смысл фильтра заключается в том, что в каждый момент времени t диагностируемое значение x_t заменяется на наиболее вероятное значение

$$\hat{x}_t = \arg \max_{x_t} p_t(x_t) \quad (2.17)$$

При применении фильтра Кальмана для нескольких параметров не эффективно, так как: ковариационная матрица Σ_t как правило, плохо обусловлена; а настройка параметров плотностей $p_t(x_t)$ и анализ взаимодействия параметров довольно сложные. Но главная проблема в том, что этот фильтр дает слишком сглаженное решение.

2.5.2 Быстрое преобразование Фурье. Известно, что выбросы имеют высокую частоту гармоник [154], поэтому предлагается фильтровать высокочастотные значения с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ) наблюдаемого временного ряда $(x_1, \dots, x_T)$. Высокие частоты исключаются из спектра, и к измененному спектру применяется обратное преобразование Фурье. Однако при проверке этот метод оказался неэффективен. Идея быстрого преобразования Фурье со скользящим окном заключается в анализе локальных характеристик спектра параметра. В каждый момент t БПФ применяется только к значениям $(x_{t-h}, \dots, x_{t-1}, x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t+h})$, где h – параметр метода, называемый шириной окна [147, 153, 163]. Обозначим:

$$Y_t = FFT(x_{t-h}, \dots, x_{t-1}, x_t, x_{t+1}, \dots, x_{t+h}) \quad (2.18)$$

Спектр Y_t в момент времени t интерпретируется как ненормированная плотность локального распределения частот. Плотность не нормируется специально для того, чтобы учитывать локальную амплитуду параметра.

Тогда мерой «нормальности» t -го значения можно считать среднее значение спектра EY_t . Далее используется пороговое правило для определения, произошла ли ошибка при формировании данных или нет в момент t и если да, то неверные значения заменяются при помощи линейной интерполяции правильных значений. Однако этот метод слишком чувствителен к выбору порога. Поэтому предлагается среднюю частоту параметра отсортировать и по сути задачу можно сформулировать как задачу нахождения точки сгиба линии, изображающей отсортированные значения частот, решая ее оптимальным вписыванием в кривую ломаной линии, состоящей из двух сегментов. Если обозначить отсортированные частоты $(f_1, \dots, f_T)$, то для нахождения точки сгиба необходимо найти лучшее t и установить порог на уровне f_t . Для этого кривая $f = (f_1, \dots, f_T)$ аппроксимируется двухсегментной ломаной $\ell = (\ell_1, \ell_2)$:

$$\ell_1 = \frac{f_t - f_1}{t - 1}(\tau - 1) + f_1, 1 \leq \tau \leq t; \quad (2.19)$$

$$\ell_2 = \frac{f_t - f_T}{t - T}(\tau - T) + f_T, t \leq \tau \leq T. \quad (2.20)$$

Качество аппроксимации $Q(f, \ell(t))$ определяется как:

$$Q(f, \ell(t)) = \sum_{\tau=1}^T |\ell(\tau) - f(\tau)| \quad (2.21)$$

Результаты аппроксимации в зависимости от t приведены на рисунке 2.2.

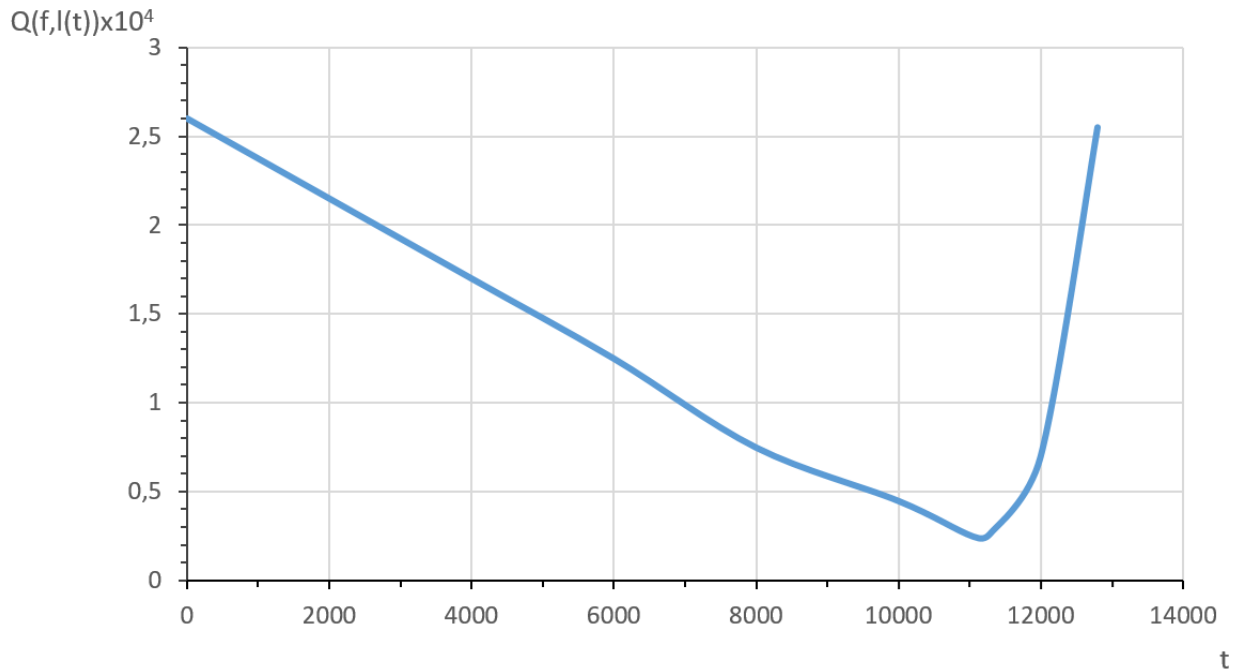


Рисунок 2.2 Оценка качества аппроксимации

По оси X отложены выбираемые значения t , по оси Y – значения качества аппроксимации $Q(f, \ell(t))$. Оптимальное значение t^* как точка перегиба получается решением задачи оптимизации:

$$t^* = \arg \min_t Q(f, \ell(t)) \quad (2.22)$$

Метод сглаживает дискретные параметры. Но для его реализации необходимо провести выбор структуры модели его измерительной системы, отвечающей требованиям адекватности и наблюдаемости.

2.6. Восстановление плотности распределения исходных данных получаемых в процессе диагностирования состояния железнодорожного пути для формализации адаптивных моделей прогнозирования его состояния

2.6.1. Анализ распределений плотности параметрических и непараметрических моделей. Выбор типа распределения.

Как упоминалось в предыдущей главе, после выбора адекватной модели выполняется процедура параметрической идентификации коэффициентов этой модели [151,157,161,164]. Адаптивный контроль состояния железнодорожного пути основан на использовании информации, измеряемой датчиками

путеизмерительного вагона или измерительной тележки. Для достижения цели адекватного прогнозирования состояния железнодорожного пути должна быть реализована обратная связь алгоритма идентификации через контролируемые параметры [142, 146, 165]. Анализ функций распределения случайных величин оценки состояния железнодорожного пути приведен в таблице 2.2.

Данные об отказах элементов верхнего строения пути в условиях эксплуатации являются цензурированными выборками, охватывающими незначительную часть интервала изменения значений наработки до отказа и должны быть выровнены большим числом распределений. Строго вероятностные обоснования, согласно которым отказы рассматриваются как отвлеченные случайные события достаточно подробно изучены [132,143,147, 164,165,166]. Менее изучены закономерности возникновения отказов, основанные на изучении кинетики деградиационных процессов, происходящих железнодорожном пути, когда отказ трактуется как пересечение допустимого уровня Π случайным процессом $\zeta(t)$, описывающим поведение некоторого гипотетического параметра.

Тип закона распределения наработок до отказа зависит от свойств случайного процесса $\zeta(t)$. Такая трактовка отказа приводит к распределениям, параметры которых имеют явный физический смысл (типа средней скорости изменения определяющего параметра, среднеквадратического отклонения скорости изменения определяющего параметра и т.д.). Наиболее распространенные физико-вероятностные обоснования использования распределения случайной величины в теории надежности механических объектов. Физико-вероятностное обоснование использования распределения случайной величины, сделанное на основе анализа литературных источников [128, 130, 132,142,159,162,165,168,169] для оценки надежности железнодорожного пути и путевых машин, механизмов, подвижного состава для технического обслуживания железнодорожного пути приведен в таблице 2.3.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что при моделировании процесса прогнозирования появления дефектов железнодорожного пути можно принять Бета распределение B и как частный случай нормальное распределение;

Гамма распределение, G ; но наиболее эффективным будет применение распределения Гумбеля для минимальных значений, $Gmin$. Однако предварительно необходимо решить задачу восстановления плотности распределения, что особенно важно в условиях не полной информации об объекте [167, 168, 169, 171, 172, 173].

Таблица 2.2. Анализ законов распределения случайных величин и их числовые характеристики применительно к оценке состояния железнодорожного пути

Название распределения	Плотность распределения	Значение $f(0)$	Параметры распределения	Математическое ожидание	Дисперсия
Вейбула-Гнеденко (W)	$f(t) = \frac{b}{a} \left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{t}{a}\right)^b\right]$	0, если $b > 1$. $\frac{1}{a}$, если $b = 1$. $\frac{10}{a}$ если $b < 1$.	D1 = a. D2 = b.	$M = a \cdot \Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right)$	$D = a^2 \cdot \left[\Gamma\left(\frac{2}{b} + 1\right) - \left(\Gamma\left(\frac{1}{b} + 1\right) \right)^2 \right]$
Диффузное монотонное (DM)	$f(t) = \frac{\mu + t}{2\mu\gamma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{t - \mu}{\gamma\mu\sqrt{t}}\right)^2\right]$	0	D1 = μ . D2 = γ .	$M = \mu(1 + 0,5\mu\gamma^2)$	$D = \mu^3\gamma^2 \cdot (1 + 1,25\mu\gamma^2)$
Гамма-распределение (G)	$f(t) = \frac{a^b}{\Gamma(b)} \cdot t^{b-1} \exp(-at)$	0, если $b > 1$. a, если $b = 1$. 10a, если $b < 1$.	D1 = a. D2 = b.	$M = \frac{b}{a}$	$D = \frac{b}{a^2}$
Логарифмическое нормальное (LN)	$f(t) = \frac{\lg e}{\sigma \cdot t \sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\lg t - a}{\sigma}\right)^2\right]$	0	D1 = σ . D2 = a.	$M = 10^{a + \frac{\sigma^2}{2A}}$ $A = \lg e$	$D = M^2 \left(10^{\frac{\sigma^2}{A}} - 1 \right)$

Распределение Гумбеля для максимальных значений (Gmax)	$f(t) = \frac{1}{\sigma} \cdot \exp \left[-\frac{t-\mu}{\sigma} - \exp \left(-\frac{t-\mu}{\sigma} \right) \right]$	вычислить	D1 = σ . D2 = μ .	$M = \mu + 0,577\sigma$	$D = (1,283\sigma)^2$.
Распределение Гумбеля для минимальных значений (Gmin)	$f(t) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[\frac{t-\mu}{\sigma} - \exp \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right) \right]$	вычислить	D1 = σ . D2 = μ .	$M = \mu + 0,577\sigma$	$D = (1,283\sigma)^2$.
Нормальное распределение (N)	$f(t) = \frac{1}{\sigma} \exp \left[\frac{t-\mu}{\sigma} - \exp \left(\frac{t-\mu}{\sigma} \right) \right]$	вычислить	D1 = σ . D2 = μ .	M = a.	D = σ^2
Диффузное монотонное (DN)	$f(t) = \frac{1}{t\sqrt{2\pi\gamma t}} \cdot \exp \left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\gamma\mu^2 t} \right]$	0	D1 = μ . D2 = γ .	$M = \mu$.	$D = \gamma\mu^3$
Бета-распределение (B)	$f(t) = \frac{1}{b-a} \cdot \frac{\Gamma(m+n)}{\Gamma(m) \cdot \Gamma(n)} \times$ $\times \left(\frac{t-a}{b-a} \right)^{m-1} \left(1 - \frac{t-a}{b-a} \right)^{n-1}$ $a \leq t \leq b$	$f(a) = 0$ $f(b) = 0$	D1 = a. D2 = b. D3 = m. D4 = n.	$M = \frac{b-a}{m+n} \cdot m + a$	$D = \left(\frac{b-a}{m+n} \right)^2 \cdot \frac{mn}{m+n+1}$

Таблица 2.3. Физико-вероятностное обоснование использования распределения случайной величины при анализе надежности железнодорожного пути и путевых машин, механизмов, подвижного состава для технического обслуживания железнодорожного пути.

	Рекомендуемое распределение	Рекомендуемое применение
Распределение	Физико-вероятностная модель	Применение для ж.д. пути
Вейбулла, W	Наработка до пересечения допустимого уровня.	Анализ усталостной долговечности рельсов
	случайным нестационарным флуктуационным, процессом, с возрастающим трендом общего вида	статического разрушения рельсов при возрастании действующих нагрузок
	случайным некомпактным процессом с независимыми реализациями с линейным законом изменения математического ожидания	до достижения заданной деформации или появления усталостной трещины с постоянной скоростью накопления
Гамма распределение, G	Наработка до пересечения допустимого уровня компактным случайным процессом с сильным перемешиванием, с монотонными реализациями и с линейным законом изменения математического ожидания.	Распределение времени, необходимых для появления (b) событий, с постоянной интенсивностью λ . Пример, наработка до предельно допустимого износа, зависящего от условий эксплуатации в кривых, величина зазоров в рельсовых стыках и т.д.
Логарифмически нормальное, LN	Наработка до пересечения допустимого уровня компактным случайным процессом с независимыми нестационарными приращениями, с не монотонными реализациями и с логарифмически меняющимся математическим ожиданием	Усталостная долговечность, прочность, пластическая деформация, с убывающей скоростью накопления - эффект "залечивания". Наклеп, ослабление и затяжка клемно-болтовых соединений рельсов.
Гумбеля G	Распределение значения независимых случайных величин при $n \rightarrow \infty$, имеющей вид экспоненты	
для максимальных значений, $Gmax$	Максимально, неограниченно справа	Время безотказной работы железнодорожного пути, с допущением, что его

		элементы n в смысле надежности параллельны
для минимальных значений, G_{min}	Минимально, неограниченно слева	И дополнительным к п.3.1. допущением: независимые случайные величины длительности безотказной работы отдельных элементов распределены по нормальному закону.
Бета распределение B	Случайная величина, зависящая от большого числа случайных малосущественных факторов при наличии нескольких существенных факторов, распределена примерно по бета закону	Оценка доли выявленных дефектных элементов верхнего строения пути (рельсов, шпал, креплений и т.д.) в единицу времени. Время технического обслуживания СПС на ремонтном предприятии
Нормальное, N частный случай Бета распределения	Наработка до первого пересечения установленного уровня компактным случайным гауссовским процессом с сильным перемешиванием, с не монотонными реализациями и с линейным законом изменения математического ожидания	Распределение прочностных характеристик элементов железнодорожного пути. Эффективно при коэффициенте вариации меньше 0,2 и при плохой аппроксимации с другими распределениями.

2.6.2. Методы непараметрического восстановления плотности.

Наиболее распространенные методы непараметрического восстановления плотности основываются на алгоритмах построения гистограмм парзеновского окна, методе потенциальных функций, суть которых в том, что плотность выше в тех точках, рядом с которыми находится большое количество объектов выборки, и если мощность множества элементарных исходов много меньше размера выборки, то в качестве восстановленной по выборке плотности можно использовать гистограмму значений выборки. В противном случае (например, непрерывном) данный подход не применим, так как плотность концентрируется вблизи обучающих объектов, и функция распределения претерпевает резкие

скачки. Приходится использовать восстановление методом Парзена-Розенблатта [174,175].

Основные достоинства метода: не предполагается наличие априорных предположений о распределении данных – виде функции распределения, семейства и т.д.; восстанавливает распределение данных с любой наперед заданной точностью, при размере обучающей выборки, стремящейся к бесконечности. Основные недостатки метода: при больших размерностях данных точность восстановления ухудшается, требуется увеличение обучающей выборки; необходимо хранить и использовать всю обучающую выборку или значительную ее часть, что не удовлетворяет требованию адаптивности [174, 176,177].

Параметрический подход к восстановлению плотности предполагает наличие априорной информации о распределении данных (см., например, таблицу 2.2). Задача заключается в нахождении оценок неизвестных параметров распределения, как правило, методом максимального правдоподобия [140,142,147,178]. Достоинства метода: нет необходимости хранить всю выборку, так как имеется аналитически заданная функция, задающая плотность распределения. Недостатки метода: если исходное предположение о распределении данных неверно, то качество восстановления плотности будет низким; значительное влияние «шумов» при применении стандартных методов восстановления (например, метод максимального правдоподобия).

Как показывает анализ распределений плотности, отсутствие «гибкости» функции плотности может быть решено за счет применения модели смеси гауссовых распределений, позволяющей достаточно эффективно настроить параметры данного распределения.

Функция плотности смеси гауссовых распределений записывается следующим образом:

$$p(x) = \sum_{i=1}^k w_i \mathcal{N}(x|\mu_i, \Sigma_i) \quad (2.23)$$

где w_i – веса смеси распределений, $\mathfrak{K}(x|\mu_i, \Sigma_i)$ – плотность многомерного (размерность – количество регистрируемых параметров) нормального распределения с математическим ожиданием μ_i и матрицей ковариации Σ_i .

2.6.3. Алгоритмы классификации методов восстановления плотности распределения

Метод восстановления плотности распределения ARD-ЕМ есть метод восстановления плотности в виде смеси гауссовских распределений с помощью модифицированного ЕМ-алгоритма ([177]), обеспечивающей возможность автоматического отбора числа компонент по нисходящей процедуре. То есть на каждой итерации число кластеров не увеличивается (остается прежним или уменьшиться).

Модель восстанавливаемой плотности распределения простой выборки $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ представим:

$$p(x) = \sum_{i=1}^k w_i \mathfrak{K}(x|\mu_i, \Sigma_i) \quad (2.24)$$

$$\mathfrak{K}(x|\mu_i, \Sigma_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}^n \det(\Sigma_i^{0.5})} \exp\left(-\frac{1}{2}(x-\mu_i)\Sigma_i^{-1}(x-\mu_i)^T\right) \quad (2.25)$$

В нашем случае компонентами являются показателями вагона путеизмерителя о состоянии железнодорожного пути, определяющие комплексную оценку участка пути B_i [112, 180], которые в общем виде служат структурным параметром модели. Метод ARD-ЕМ накладывает регуляризацию на каждую из компонент комплексной оценки в виде априорного распределения на веса компонент:

$$p(w_i|\alpha_i) = \sqrt{\frac{\alpha_i}{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}w_i^2\alpha_i\right\} \quad (2.26)$$

Данный подход оптимизирует апостериорную вероятность параметров распределения:

$$p(\mu, \Sigma, w|X, \alpha) \propto p(X|\mu, \Sigma, w)p(w|\alpha)$$

$$-\log(p(X|\mu, \Sigma, w)p(w|\alpha)) = -\sum_{i=1}^N \log\left(\sum_{j=1}^K w_j \mathfrak{K}(x_i|\mu_j, \Sigma_j)\right) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^K w_i^2 \alpha_i \rightarrow \min(\mu, \Sigma) \quad (2.27)$$

где μ, Σ совокупность математических ожиданий и ковариационных матриц компонентов соответственно. Выбор значений параметров α производится путем максимизации обоснованности модели:

$$p(X, \mu_{MP}(\alpha_{fix}), \Sigma_{MP}(\alpha_{fix}), \alpha) = \int_{\mathcal{M}} p(X | \mu_{MP}(\alpha_{fix}), \Sigma_{MP}(\alpha_{fix}), w) p(w | \alpha) dw \rightarrow \max(\alpha)$$

$$\mathcal{M} = \{w | \sum_{i=1}^K w_i = 1\} \quad (2.28)$$

Для упрощения функции применим приближение Лапласа:

$$\log(p(X, \mu_{MP}(\alpha_{fix}), \Sigma_{MP}(\alpha_{fix}), \alpha)) \approx$$

$$\log(p(X | \mu_{MP}(\alpha_{fix}), \Sigma_{MP}(\alpha_{fix}), w_{MP}) p(w_{MP} | \alpha)) - \frac{1}{2} \log(\det(H_{pr})) + Cons$$

(2.29)

Где H_{pr} проекция гессиана регуляризованного правдоподобия (дифференцирование по параметрам w) на линейное многообразие $\mathcal{M}$.

Чтобы исключить рост параметров регуляризации при оптимизации нахождения параметров α в процессе нахождения параметров распределения w , устанавливается порог значений параметров α , при превышении которого соответствующая компонента убирается.

В окончательном виде алгоритм следующий:

Вход: выборка X , начальное число кластеров K .

1. $(\mu_{old}, \Sigma_{old}, w_{old}) = EMgauss(X, K), \alpha_i = 1, i = 1 \dots K$
2. До сходимости повторять:
 - 2.1. $(\mu_{new}, \Sigma_{new}, w_{new}) = EMgaussReg(X, K, \mu_{old}, \Sigma_{old}, w_{old}, \alpha)$
 - 2.2. $\alpha = EvidenceMax(X, K, \mu_{new}, \Sigma_{new}, w_{new}, \alpha)$
 - 2.3. $(\mu_{old}, \Sigma_{old}, w_{old}) = (\mu_{new}, \Sigma_{new}, w_{new})$

Выход: $\mu_{new}, \Sigma_{new}, w_{new}, \alpha$

Процедура *EMgauss* решает стандартную задачу восстановления смеси гауссовских распределений ЕМ-алгоритмом, *EMgaussReg* решает задачу восстановления смеси гауссовских распределений при заданном априорном распределении на параметры w . При этом $\mu_{old}, \Sigma_{old}, w_{old}$ являются начальным приближением параметров алгоритма. Процедура *EvidenceMax* решает задачу максимизации обоснованности по параметрам α . С помощью стандартного

алгоритма классификации опорных векторов (support vector machine – SVM) будем решать задачу классификации на один класс. Настройка производится на выборке $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ показаний вагона путеизмерителя, независимо для дальнейших рассуждений какую оценку состояния пути мы принимаем, а именно: бальную, скользящее среднее, число отступлений от норм содержания рельсовой колеи, спектральную плотность участка пути и т.д. Метки класса $Y = \{-1, 1\}$ как объект класса определяются: $y = 1$ являются объектом класса (можно двигаться с установленной скоростью) и не является объектом класса (требуется ограничение скорости вплоть до закрытия перегона). Настраиваются вектора w и ρ (характеристика участка пути и нормативные требования к эксплуатации участка). Решающее правило классификатора, настраиваемого по методу опорных векторов:

$$y(x) = \text{sign}(K(x, w) - \rho) \quad (2.30)$$

где $K(x, w)$ – функция, удовлетворяющая теореме Мерсера, называется «функцией ядра» [151, 175]. Параметры модели определяются в ходе решения следующей оптимизационной задачи:

$$\frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{1}{N\nu} \sum_{i=1}^N \xi_i - \rho \rightarrow \min \quad (2.31)$$

$$\langle w, x_i \rangle \geq \rho - \xi_i, \quad i = 1, \dots, N$$

$\xi_i \geq 0$, где ρ добавлено в функционал качества с целью исключить стремления параметра к $-\infty$.

Решение задачи основано на доказательстве теоремы.

Пусть решение задачи (2.31) удовлетворяет условию $\rho \neq 0$.

Тогда верны следующие утверждения:

ν задает верхнюю границу доли ошибок классификации алгоритма на обучающей выборке;

количество «опорных векторов» не меньше νN ;

пусть обучающая выборка является реализацией независимых одинаково распределенных случайных величин с непрерывной плотностью распределения. В случае применения метода перехода в спрямляющее пространство функция ядра должна иметь аналитическое представление и не должна быть константой.

Обозначим число опорных векторов за $S(X)$. При выполнении данных условий верно соотношение:

$$\frac{S(X)}{vN} \rightarrow 1 \text{ при } N \rightarrow \infty.$$

Для подтверждения данного результата экспериментальным образом для рассматриваемых данных были проведены численные эксперименты на сгенерированных данных показаний вагона путеизмерителя. Была сформирована случайная подвыборка данных из регистрируемых векторов на данной выборке (проходов вагона путеизмерителя по участку пути протяженностью 6 км.) была восстановлена плотность по модели методом ARD EM. В качестве входных данных алгоритма классификации в один класс SVM (без использования перехода в спрямляющее пространство) были использованы частные производные расстояния Махаланобиса соответствующего вектора до центра ближайшей компоненты подмножества показаний вагона путеизмерителя.

Таким образом, можно сделать промежуточный вывод о том, что адаптивная настройка параметров алгоритма оценки и прогнозирования состояния железнодорожного пути, основанная на методе классификации в один класс адекватна.

Очевидно, что при первоначальной настройке алгоритма на выборке $X = \{x_1, \dots, x_N\}$, для точной адаптации алгоритма при добавлении данных $Y = \{y_1, \dots, y_M\}$ необходимо провести повторную настройку алгоритма на выборке $X \cup Y$. Однако подобная процедура требует увеличения объема хранимой информации, что в условиях технологии вагона путеизмерителя обеспечить затруднительно [79].

2.7. Алгоритм работы моделей прогнозирования возможного появления дефектов железнодорожного пути в условиях неполной информации

Как упоминалось ранее состояние железнодорожного пути характеризуется совокупностью параметров, недопустимое изменение которых (например, отступления от норм содержания четвертой степени) приводит к потере

работоспособности железнодорожного пути, что характеризуется как минимум ограничения скорости движения по участку.

Будем считать, что нам неизвестен закон распределения наработки до отказа определяемых вагоном путеизмерителем параметров состояния железнодорожного пути в виде отступлений от норм содержания [156,181]. При этом наработкой до отказа будем считать появление третьей или четвертой степени отступлений от норм содержания, вызывающих ограничение скорости. Тогда число отступлений N на участке пути, которые необходимы, чтобы оценить наработку t безотказной работы участка пути с вероятностью $P_H(t)$ при нижней γ доверительной границе вероятности безотказной работы за наработку t , которую будем считать, как пропущенный по участку пути тоннаж [182] составляет:

$$N = \frac{\ln(1-\gamma)}{\ln P_H(t)}, \quad (2.32)$$

Например, при $\gamma = 0,9$ и $P_H(t) = 0,95$ число выявленных отступлений должно быть 45 штук.

Таким образом, число $N_{3,4i}$ дефектов, вызвавших появление отступлений по показаниям вагона путеизмерителя 3 и 4 степени или по результатам натурного осмотра ограничение скорости из общего число выявленных вагонов путеизмерителем отступлений второй степени или промеров, сделанных ручным шаблоном дорожным мастером N_i с наработкой пропущенного тоннажа или года эксплуатации пути t_i . В настоящее время вероятность безотказной работы по данным об отказах в эксплуатации традиционно [173,178] оценивается по формуле:

$$P(t) = \exp[-\int_0^t \lambda(\tau) d\tau], \quad (2.33)$$

в которую вместо истинной интенсивности отказов $\lambda(t)$ подставляются значения эмпирической интенсивности отказов, вычисленные по формуле:

$$N_{3,4i} / (N_i \cdot \Delta t_i) = \hat{\lambda}_i, \quad t_{i-1} \leq t \leq t_i. \quad (2.34)$$

Цензурированная выборка [168,183], не сгруппированная в интервалы, состоит из индивидуальных значений наработок до отказа $\{\xi_i\}$, $i = \overline{1, n}$ и до цензурирования $\{T_i\}$, $i = \overline{1, m}$.

Цензурированная выборка, сгруппированная в интервалы наработки, полностью определяется числом отказавших $\overline{n_i}$ и цензурированных m_i элементов в каждом из интервалов наработки из общего числа взятых под наблюдение элементов. Другими словами, если сгруппировать цензурированную выборку в k интервалов, то $\overline{n_i}$ и m_i равны числу элементов множеств $\{\xi_i\}$, $\{T_i\}$, попавших в i -ый интервал. Так как функция распределения наработки до отказа непрерывна слева, считается, что отказы реализовались в правых концах t_i интервалов группирования, а цензурированию соответствуют середины $t_{i+0,5}$ интервалов группирования.

К настоящему времени известны различные варианты (случаи) цензурированных выборок [171,172,183]. Разнообразие решаемых задач приводит к увеличению числа случаев цензурирования и расширению множества методов обработки цензурированных выборок.

В автоматизированной системе анализа надежности цензурированную выборку удобно записывать в виде таблицы D , содержащей три строки.

$$D = \begin{bmatrix} t_1 & t_{1,5} & t_2 & t_{2,5} & \dots & t_k & t_{k+1/2} \\ \overline{n_1} & 0 & \overline{n_2} & 0 & \dots & \overline{n_k} & 0 \\ 0 & m_1 & 0 & m_2 & \dots & 0 & m_k \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

При сгруппированном способе задания исходной информации в первой строке записываются в порядке возрастания правые концы интервалов группирования, в которые происходили отказы и середины интервалов $t_{(i+1/2)}$, в которые имело место цензурирование. Во второй строке, в i -м столбце записываются числа отказов $\overline{n_i}$, которые соответствуют наработке t_i . В третьей строке записывается m_i - число отступлений от норм содержания, которые были цензурированы (устранены до перехода в третью или четвертую степень, иначе говоря, до наступления отказов).

Таблица D по результатам наблюдений за состоянием железнодорожного пути в течение T лет, при $\Delta t = 1$ год будет иметь следующий вид:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 1,5 & 2 & 2,5 & 3 & \dots & T \\ \overline{n}_1 & 0 & \overline{n}_2 & 0 & \overline{n}_3 & \dots & \overline{n}_T \\ 0 & m_1 & 0 & m_2 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Несмотря на обилие методов оценки вероятности безотказной работы по цензурированным выборкам [172], специфика данных об отказах элементов верхнего строения железнодорожного пути в эксплуатации не допускает прямого использования методов оценки показателей надежности, принятых, например, в машиностроении.

Для данных об отказах элементов железнодорожного пути, когда число первоначально установленных на испытания опытных узлов монотонно убывает как по причине их отказов, так и снятия с испытаний, числа $\overline{n}_i$ и m_i вычисляются по формулам

$$\overline{n}_i = n_i, \quad m_i = N_i - N_{i+1} - \overline{n}_i, \quad (2.37)$$

где N_i - число обследованных элементов верхнего строения пути (измерений отступлений от норм содержания пути) с наработкой t_i на момент обследования; n_i - число обнаруженных первых отказов (неисправностей) из числа обследованных элементов; k - число интервалов, группирования.

Для данных об отказах в условиях плановых работ по текущему содержанию пути и в условиях внеплановых работ числа $\overline{n}_i$ и m_i вычисляются по формулам

$$\overline{n}_i = (n_i \cdot N(t_i)) / N_i, \quad m_i = N_i - n_i. \quad (2.38)$$

Здесь $N(t_i)$, N - величины, связанные с таблицей D и вычисляемые по формулам:

$$\begin{cases} N(t_i) = N - \sum_{k=1}^{i-1} (\overline{n}_k + m_k) \\ N = \sum_{j=1}^k (N_j \prod_{k=1}^{j-1} (1 + \frac{n_k}{N_k - n_k})). \end{cases} \quad (2.39)$$

После таких преобразований, исходные данные об отказах элементов верхнего строения пути становятся эквивалентными гипотетическому плану испытаний на надежность вида NUZ [178], что позволяет считать числа n_i

отказавших в i -ом интервале элементов для большинства временных интервалов равны нулю или близки к нулю. Тогда в силу медленной сходимости эмпирической интенсивности отказов к истинной интенсивности $\lambda(t)$, традиционный метод оценки вероятности безотказной работы по формулам (2.32) и (2.33) приводит к значительным погрешностям. В этом случае для улучшения точности, более перспективным является пользоваться для их обработки методы оценки показателей надежности по цензурированным выборкам после некоторых модификаций этих методов. При сравнительно коротком времени наблюдений за состоянием железнодорожного пути и в случае отличным содержанием участка пути использование методов Джонсона, Каплана-Мейера и Нельсона, учитывающих цензурированность выборки [170]. Для всех значений t_i таблицы **D**, соответствующих моментам отказов, функция распределения наработки до отказа оценивается по формулам, приведенным в таблице 2.4, где r_i - прогнозируемое число отказов до момента t_i с учетом элементов, цензурированных ранее. В нижней строке таблицы 2.4 приведены модифицированные варианты формул с учетом сгруппированности исходных данных об отказах в эксплуатации.

Одновременное использование метода медианной порядковой статистики и метода Джонсона подсчета нового порядкового номера отказа (таблица 2.4) позволяет получать количественные значения показателей надежности по малому числу наблюдений. Доказано [170, 184], что оценки, полученные методами Джонсона, Каплана-Мейера и Нельсона, асимптотически тождественны, причем метод Джонсона дает заниженные оценки вероятности безотказной работы, а метод Каплана-Мейера - завышенные оценки. С целью преодоления ошибки завышения показателя надежности, в смежных отраслях машиностроения рекомендуется использовать метод Джонсона оценки вероятности безотказной работы по цензурированной выборке.

Таблица 2.4 Алгоритмы вычисления оценок показателей надежности железнодорожного пути по цензурированным выборкам

Наименование показателя	Метод вычисления оценок	Основные алгоритмы вычисления оценок	модифицированные алгоритмы вычисления оценок
Функция распределения	Джонсона, совмещенный с методом медианной порядковой статистики (при малых N)	$r_i = r_{i-1} + (1 + N - r_{i-1}) / (1 + N(t_i))$	$\hat{F}_i = (r_i - 0,3) / (N + 0,4)$
		$r_i = r_{i-1} + \bar{n}_i (1 + N - r_{i-1}) / (1 + N(t_i))$	$\hat{F}_i = (r_i - 0,3) / (N + 0,4)$
Функция распределения	Джонсона (при больших N)	$r_i = r_{i-1} + (1 + N - r_{i-1}) / (1 + N(t_i))$	$\hat{F}_i = r_i / (N + 0,4)$
		$r_i = r_{i-1} + \bar{n}_i (1 + N - r_{i-1}) / (1 + N(t_i))$	$\hat{F}_i = r_i / (N + 0,4)$
Вероятность безотказной работы	Каплана-Мейера	$\hat{P}_i = \prod_{k \leq i} (1 - \frac{1}{N(t_k)})$	
		$\hat{P}_i = \prod_{k \leq i} (1 - \frac{\bar{n}_k}{N(t_k)})$	
Функция распределения	Нельсона	$\hat{\lambda}_i = 1 / (N(t_i) \Delta t_i)$	$\hat{F}_i = 1 - \exp \left[- \sum_{k=1}^i \frac{1}{N(t_k)} \right]$
		$\hat{\lambda}_i = \bar{n}_i / (N(t_i) \Delta t_i)$	$\hat{F}_i = 1 - \exp \left[- \sum_{k=1}^i \frac{\bar{n}_k}{N(t_k)} \right]$

В качестве теоретического закона распределения ресурса участка железнодорожного пути принимаем усеченное распределение Гумбеля для минимальных значений / **Gmin** / с функцией распределения и с параметром смещения t_0 .

$$F(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq t_0 \\ c \cdot \left(1 - \exp \left(- \exp \left(\frac{t - t_0 - \mu}{\sigma} \right) \right) \right) & t_0 < t < T, \\ 1 & \text{при } t > T \end{cases} \quad (2.40)$$

Распределение Гумбеля для минимальных значений [186] является предельной моделью при $n \rightarrow \infty$ для распределения минимального значения (n) независимых случайных величин, исходные распределения которых убывают со

скоростью экспоненты. Распределение *Gmin* используют в качестве теоретического закона распределения времени безотказной работы системы, состоящей из большого числа последовательно соединенных (в смысле надежности) элементов при допущении, что длительность безотказной работы отдельных элементов - независимые случайные величины, распределенные по нормальному закону.

В нашем примере железнодорожный путь верхнее строение которого состоит из многих элементов и, как показано в предыдущих главах, величина состояния рельсовой колеи, опосредованно характеризующей наличие дефектов элементов верхнего строения пути является случайным процессом с монотонными реализациями [11,115,187,188]. Разброс реализаций случайного процесса связан как с индивидуальными верхнего строения пути, так и с различиями в условиях эксплуатации. При пересечении конкретной реализации случайного процесса верхнего значения, принятого равным четвертой степени отступления, назначается ограничение скорости и дефект железнодорожного пути устраняется.

2.8. Оценивание значений функции распределения неисправностей пути до повторного появления после устранений

В предыдущих параграфах рассматривалась теория оценивания функций распределения в случае если неисправность пути появилась впервые, можно предположить после планового ремонта. Однако на практике неисправности при текущем содержании пути устраняются и часто появляются вновь. Представим, что основное уравнение теории восстановления (мгновенное восстановление), а именно, устранение отказа в работе железнодорожного пути, как появление неисправности 3 или 4- степеней будет выглядеть следующим образом:

$$\omega(t) = f(t) + \int_0^t \omega(\tau) f(t-\tau) d\tau. \quad (2.42)$$

В виде системы равенств

$$\omega(t_i) = f(t_i) + \sum_{j=0}^{i-1} \omega(t_j) f(t_i - t_j) \Delta t_j. \quad (2.45)$$

где $\hat{\omega}(t)$ значение эмпирического потока отказа в некоторой «средней» точки i -го интервала наработки, определяемое по формуле:

$$\hat{\omega}_i = n_i / (N_i \cdot \Delta t_i) \quad (2.46)$$

Подставив вместо $\omega(t)$ их оценки $\hat{\omega}_i$ и решив эти равенства относительно $f(t)$, получим оценки частоты отказов

$$\hat{f}_i = \frac{\hat{\omega}_i \cdot \sum_{j=1}^{i-1} \hat{\omega}_j \cdot \Delta t_j}{1 + \hat{\omega}_0 \Delta t_i}, \quad i = \overline{1, k}. \quad (2.47)$$

Используя равенство

$$F(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau,$$

получим формулу для оценивания значений функции распределения наработки до первого появления неисправности третьей или четвертой степени:

$$\hat{F}_0 = 0, \quad \hat{F}_i = \sum_{k=1}^i \hat{f}_k \cdot \Delta t_k. \quad (2.48)$$

Для простоты расчетов будем считать, что функция распределения наработки до первого отказа совпадает с функцией распределения наработки между отказами в процессе технического обслуживания железнодорожного пути.

2.9. Проверка статистических гипотез

Для решения задачи прогнозирования появления неисправностей железнодорожного пути (по сути прогнозирования надежности работы пути) недостаточно знать оценки функции распределения наработки до отказа. Необходимо знать закон распределения наработки до отказа и параметры этого распределения. Выбор закона распределения был проведен в предыдущих параграфах. Представление данных об отказах в эксплуатации в виде цензурированных выборок, а также полученные формулы (2.37) и (2.38) для расчета числа отказов $\bar{n}_i$ и цензурированных m_i позволило использовать метод максимального правдоподобия (МП), в котором в качестве оценок параметров A и B функции распределения $F(t, A, B)$ наработки до отказа принимаются такие значения $\hat{A}, \hat{B}$, которые максимизируют функцию правдоподобия (минимизируют логарифмическую функцию правдоподобия:

$$S(A, B) = -\ln L(A, B)$$

Форма записи функции правдоподобия зависит от модели цензурирования.

Пусть данные об отказах в опытном поезде представляют собой цензурированную выборку $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$, $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ с известными значениями наработок до отказа и цензурирования. Тогда с точностью до константы, не зависящей от параметров A и B , функция правдоподобия записывается в виде [184,187]:

$$L_0(A, B) = \prod_{i=1}^n f(\xi_i, A, B) \prod_{i=1}^m [1-F(\tau_i, A, B)]. \quad (2.49)$$

При сгруппированном способе задания статистической информации функция правдоподобия записывается в виде [187]

$$L_1(A, B) = \prod_{i=1}^k [f(t_i, A, B)]^{\bar{n}_i} [1-F(t_{i+1/2}, A, B)]^{m_i}. \quad (2.50)$$

Здесь $f(t, A, B)$ - двухпараметрическая плотность распределения наработки до отказа.

Если длина Δt интервала группирования является достаточно большой величиной, функцию правдоподобия рекомендуется записывать в виде

$$L_2(A, B) = \prod_{i=1}^k [F(t_i, A, B) - F(t_{i-1}, A, B)]^{\bar{n}_i} \prod_{i=1}^k [1-F(t_{i+1/2}, A, B)]^{m_i} \quad (2.60)$$

Если нельзя с уверенностью сказать, что выявленные отказы относятся к последнему временному интервалу, функция правдоподобия примет вид:

$$L_3(A, B) = \prod_{i=1}^k [F(t_i, A, B)]^{\bar{n}_i} [1-F(t_i, A, B)]^{m_i} \quad (2.61)$$

где $\bar{n}_i$ - число неисправностей, отказавших на интервале $[0; t_i]$ из числа N_i обследованных участков пути с наработкой t_i .

В методе максимального правдоподобия оценки параметров распределений обычно получают решением системы уравнений

$$\begin{cases} \partial L_n(A, B) / \partial A = 0 \\ \partial L_n(A, B) / \partial B = 0 \end{cases} \quad (2.62)$$

Недостаток предлагаемого метода заключается в том, что подобные системы уравнений необходимо составлять по отдельности для каждого случая цензурирования и для каждого типа закона распределения наработки до отказа, причем для распределений, отличных от Вейбулловского распределения, получение уравнений правдоподобия представляет собой сложную самостоятельную задачу [186]. Однако возможно перейти к приближенным

методам определения минимума целевой функции $S(A, B) = -\ln L(A, B)$, а оценка параметров распределений проводится с применением метода наименьших квадратов (НК), который состоит в минимизации суммы квадратов отклонений эмпирической функции распределения $\hat{f}(t)$ от теоретической функции $F(t)$ /П/, т.е. в минимизации функции вида

$$S_n(A, B) = \sum_{i=1}^K (\hat{F}_i - F(t_i, A, B))^2, \quad (2.63)$$

где $\hat{F}_i$ - оценка значения функции распределения в точке t_i , вычисленная одним из рассмотренных ранее методов; $F(t_i, A, B)$ - значение выравнивающей функции распределения с параметрами A и B в точке t_i .

Применение параметрических методов оценивания предполагает проверку правильности выбора закона распределения, которая формулируется как задача проверки гипотезы $H_0: \hat{F}(t) = F(t)$ при альтернативе $H_1: \hat{F}(t) \neq F(t)$, где $F(t)$ - теоретическая функция распределения, а $\hat{F}(t)$ - эмпирическая функция распределения, соответствующая наблюдаемой выборке.

В настоящее время для проверки гипотез о согласии эмпирических распределений наработки до отказа с теоретическими законами по полным выборкам чаще всего используется один из трех критериев: Колмогорова, Крамера-Мизеса, Пирсона. Как показали исследования, прямое использование этих критериев для цензурированных выборок оказалось невозможным [177]. Однако путем сопоставления свойств различных критериев можно рекомендовать [177, 188] применение модификации критерия Колмогорова для однократно цензурированных выборок и применение модификаций критериев Мозеса и Пирсона для многократно цензурированных выборок. В методике для проверки гипотезы о совпадении эмпирического и теоретического распределений используется критерий Пирсона [168]. Процедура применения критерия выглядит следующим образом. Вычисляется статистика Пирсона

$$X_p^2 = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{\Delta r_i \cdot N \cdot \Delta F(t_i)^2}{N \Delta F(t_i)}, \quad (2.64)$$

где Δr_i - приращение условного номера отказа, $\Delta F(t_i)$ - теоретическая вероятность отказа в i -ом интервале.

Для данных выявленных в процессе оценки железнодорожного пути вагоном путеизмерителем об отказах (неисправностях рельсовой колеи), справедливы равенства

$$\Delta r_i = \frac{\bar{n}i(1+N \cdot r_{i-1})}{1+N(t_i)} = n_i, \quad N=N_I \quad (2.65)$$

Где N и $N(t_i)$ вычисляются по формулам (2.38)

Таким образом, рассмотрены два способа оценки показателей надежности: при не сгруппированном способе задания цензурированной выборки и соответственно, сгруппированном.

2.10. Автоматизированное распознавание поверхностных дефектов верхнего строения пути с использованием примитивов Хаара и модифицированного алгоритма Лукаса-Канаде

Одним из перспективных способов оценки состояния железнодорожного пути является способ, позволяющий визуально распознавать дефекты верхнего строения, чего в прежние годы в связи с отсутствием технических средств сделать было невозможно. В большинстве случаев, когда нужно простое сравнение двух достаточно похожих фрагментов изображения его реализуют через их **ковариацию** (или что-нибудь аналогичное). Берётся образец (на фотографии — цветок) и передвигается по изображению по X и Y в поисках точки, где отличие образца (J) от изображения (I):

$$\sum_{i < W, j < H} |I(x+i, y+j) - J(i, j)| \quad (2.66)$$

достигает своего минимума.

Этот способ очень быстр в реализации, интуитивен и досконально известен. Но основной недостаток этого способа-маленькая скорость работы — если нужно обнаружить область $n \times n$ на изображении $m \times m$, то количество операций будет пропорционально $n^2 \cdot (m-n)^2$.

Дефекты верхнего строения, например, износ рельсов, трещины шпал и т.п. влияют на показания вагона путеизмерителя, описывающие очертания рельсовой

колеи и часто являются следствием этих дефектов. Однако, коль скоро мы разрабатываем автоматизированную систему управления технологическим процессом технического обслуживания и ремонта железнодорожного пути, необходимо выявлять основные дефекты пути, которые, как и выправка и подбивка пути должны быть устранены с минимальным участием человека. В предыдущих параграфах главы разработаны адаптивные модели прогнозирования появления неисправностей рельсовой колеи. Однако, если применить так называемое адаптивное усиление (adaptive boosting) или сокращённо AdaBoost в виде примитивов Хаара [190,191], что позволит оценить и поверхностные дефекты, например, трещину в шпале и тем самым повысить эффективность планирования управляющих воздействий на путь.

Предположим, имеется набор эталонных объектов и множество простых классификаторов, тогда на основе их синтеза можно составить один более совершенный и мощный классификатор. AdaBoost вызывает слабый классификатор в цикле, после каждого вызова обновляется распределение весов D_t , отвечающих важности каждого из объектов обучающего множества. На каждой итерации веса любого неверно классифицированного объекта возрастают, новый классификатор h_t минимизирует взвешенную ошибку классификации по взвешенной ошибки классификатора ε_t :

$$h_t = \arg \min_{h_j \in H} \varepsilon_j, \text{ здесь } \varepsilon_t = \sum_{i=1}^m D_t(i) [y_i \neq h_j(x_i)], \quad (2.67)$$

Если $\varepsilon_t \geq 0.5$, то выполнение алгоритма прекращается и строится результирующий классификатор

$$H(x) = \text{sign} \left(\sum_{t=1}^T \alpha_t h_t(x) \right), \quad (2.68)$$

$$\text{в котором } \alpha_t = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_t}.$$

Выражение для обновления распределения D_t определяется из условия выполнения:

$$e^{-\alpha_t y_i h_t(x_i)} \begin{cases} < 1, & y(i) = h_t(x_i) \\ > 1, & y(i) \neq h_t(x_i). \end{cases} \quad (2.69)$$

Таким образом, после выбора оптимального классификатора h_t для распределения D_t , объекты x_i , идентифицируемые классификатором h_t корректно, имеют веса меньшие, чем объекты, идентифицируемые некорректно, и когда алгоритм тестирует классификаторы на распределении D_{t+1} , он выберет классификатор, который лучше идентифицирует объекты, неверно распознаваемые предыдущим классификатором. Для построения отдельных классификаторов используются примитивы Хаара [191,192,193]. Стандартный набор таких примитивов работает по следующей схеме: на эталонное изображение накладывается какой-либо из примитивов, затем вычисляется сумма значений пикселей в белой области примитива и чёрной области и из первого значения вычитается второе. Получаемая в итоге величина представляет собой обобщённую характеристику анизотропии базового участка изображения N

$$N = Q_w - Q_{bl}, \quad (2.70)$$

здесь Q_w , Q_{bl} - суммарное количество, соответственно, белых и черных пикселей в примитивах, расположенных в выделенной области изображения.

Недостатком методики является необходимость большого количества накладываемых примитивов, например, для изображения 24x24 пикселя, количество примитивов около 180 тысяч. Задача алгоритма адаптивного усиления заключается в том, чтобы выбрать те примитивы, которые наиболее эффективно выделяют данный объект. Например, для поиска деревянных шпал с продольной трещиной подходит примитив с горизонтальной полосой, а поиска прижога после шлифования примитив в виде капли. На основе таких классификаторов с отобранными наиболее эффективными примитивами строится каскад. Каждый последующий элемент каскада имеет более жёсткие условия успешного прохождения, чем предыдущий (используется больше примитивов), тем самым до конца доходят только «полностью описывающие изображение» комплексные примитивы.

Следующим шагом алгоритма является оценка изменения местоположения точек поверхности объекта с течением времени. Если система движется достаточно быстро, то алгоритм с использованием примитивов Хаара не справится с задачей детектирования и распознавания дефектов, поэтому для подобных ситуаций предлагается использовать модифицированный алгоритм Лукаса-Канаде распознавания образов по характерным точкам [194,195,]. Оптический поток представляется как изображение видимого движения объектов на некоей сцене, получаемое в результате перемещения наблюдателя относительно сцены. При этом пиксель изображения с координатами (x, y, t) в плоскости и времени и интенсивностью $I(x, y, t)$ за прогонку одного кадра получает приращения $(\Delta x, \Delta y, \Delta t)$. Изменение интенсивности пикселя при малых перемещениях представим в виде ряда Тейлора:

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial I}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial I}{\partial t} \Delta t \quad (2.71)$$

Считая, что за малое перемещение интенсивность графической точки не изменится, можно записать основное уравнение оптического потока в компонентах скорости точки в направлении основных координатных осей:

$$I_x v_x + I_y v_y + I_t = 0, \quad (2.72)$$

$$\text{где } v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \frac{\partial I}{\partial x} = V_x, \quad v_y = \frac{\Delta y}{\Delta t} \frac{\partial I}{\partial y} = V_y, \quad I_x = \frac{\partial I}{\partial x} \frac{\partial I}{\partial x} = I_x, \quad I_y = \frac{\partial I}{\partial y} \frac{\partial I}{\partial y} = I_y, \\ I_t = \frac{\partial I}{\partial t} \frac{\partial I}{\partial t} = I_t.$$

Уравнение (2.72) должно быть разрешено относительно неизвестных V_x и v_y . На основании метода Лукаса-Канаде предполагаем, что оптический поток одинаков для всех пикселей в пределах небольшого прямоугольного участка изображения, охватывающего множество пикселей $(q_i)_{i=1}^n$. Вектор скорости оптического потока $v = [v_x, v_y]^T$ для центрального пикселя p можно получить, учитывая, что интенсивность есть функция от положения конкретного пикселя q_i :

$$I_x(q_i)v_x + I_y(q_i)v_y + I_t = 0 \quad (2.73)$$

Методом наименьших квадратов сводим переопределенную систему (2.73) из n уравнений с двумя неизвестными к системе из двух уравнений с двумя неизвестными, выбирая размеры прямоугольного фрейма вокруг исследуемого пикселя. Этот выбор происходит за счет сопоставления двух взаимоисключающих условий: уменьшение размера фрейма позволяет «не смешивать» исследуемые подвижные объекты с неподвижным фоном, увеличение фрейма позволяет обнаруживать и отслеживать большие перемещения объекта. Для решения двойственной проблемы реализации метода Лукаса-Канаде, предлагается использовать пирамидальную итерационную схему Боке [196], основанную на принципе последовательной обработки изображения на разных уровнях разрешающей способности, от грубой (верх пирамиды) до более точной оценки (низ пирамиды) перемещения объекта в общей картине. Сама оценка перемещения конкретного пикселя для каждого уровня разрешения определяется численно за несколько итераций (при этом достигается условие сходимости), аналитическое представление оценки используется только для малых перемещений, когда в разложении в ряд можно пренебречь старшими членами. Задача о сравнении последовательных кадров системы видео- или фотофиксации сводится к определению координат искомого пикселя на последующем кадре (J), зная его координаты на предыдущем изображении (I). При построении итерационной схемы в виде пирамиды на нижнем уровне располагаются кадры в первоначальном разрешении ($I^0 = I$, $J^0 = J$), на каждом последующем уровне разрешение уменьшается в два раза. Обработка кадров происходит сверху вниз, начиная с уровня L_m . Координаты исследуемого пикселя на исходном изображении для уровня L_m определяются согласно:

$$u^L = \frac{u}{2^L} \triangleq \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

Рассматривается прямоугольный фрейм вокруг искомого пикселя размером $(p_x \pm w_x; p_y \pm w_y)$ ($p_x \pm w_x; p_y \pm w_y$). Если предположить, что пиксель p изображения I^L

переместился в позицию $p + \Delta p$ изображения J^L , то для нахождения перемещения Δp требуется минимизировать сумму квадратов отклонений пикселей по координатным осям:

$$\varepsilon = \sum_{x=p_x-w_x}^{p_x+w_x} \sum_{y=p_y-w_y}^{p_y+w_y} \left[I^L(x, y) - J^L(x + \Delta p_x, y + \Delta p_y) \right]^2 \quad (2.75)$$

Определение перемещений всех пикселей изображения связано со значительными вычислительными сложностями, поэтому чаще всего ограничиваются отслеживанием перемещений отдельных пикселей, что вполне достаточно для определения геометрических и кинематических характеристик объектов – твердых тел. Предлагается отслеживать пиксели, интенсивность цвета которых существенно отличается от аналогичного параметра соседних пикселей, т.е. рассматриваются пиксели, расположенные на границах объектов. Причем в первую очередь рассматриваются пиксели, расположенные на стыках нескольких границ. Угловые точки определяются как локальные максимумы меры Харриса [195], превышающие заданный порог h :

$$\{x_c\} = \{x_c \mid R(x_c) > R(x_i), \forall x_i \in W(x_c) > h\} \quad (2.75)$$

где $W(x_c)$ – множество пикселей 8-кратной окрестности искомого пикселя.

При определении положения объекта (захват объекта) выделяются характерные точки изображения с помощью детектора Харриса-Лапласа, находящиеся в центральной части изображения (для выделения центральной части используется прямоугольный фрейм). Характерные точки за пределами фрейма считаются фоновыми и неподвижными относительно стационарной системы отчета. Перемещение фона определяется как среднее перемещение фоновых точек от момента запуска алгоритма до текущего момента времени. Происходит идентификация перемещений характерных точек во фрейме относительно фона методом Боке [196]. На втором этапе следящий фрейм ориентируется на характерную точку, имеющую наибольшее перемещение относительно фона в текущий момент времени. Характерные точки внутри фрейма, определенное перемещение которых больше некоторого заданного порога обнаружения $\rho_{обн}$,

считаются принадлежащими исследуемому объекту. Когда перемещение следящего фрейма относительно его характерного размера превышает некоторое значение порога захвата $\rho_{\text{захв}}$, то определение объекта считается состоявшимся. Если в фазе определения объекта перемещения характерных и фоновых точек отслеживалось от их начальных положений в момент запуска алгоритма, то в следующей фазе – фазе ведения объекта, перемещения точек определяются за последние N кадров, где N – длина массива в памяти. По мере движения системы видеодетекторов фоновые точки выходят за пределы кадра, снижая точность оценки перемещения фона. При сокращении количества фоновых точек на 30% инициируется повторный поиск характерных точек и повторный захват объекта в текущей позиции следящего фрейма.

Таким образом, рассмотрев применение двух вариантов распознавания объектов – алгоритма адаптивного усиления (Adaptive Boosting), использующего каскадные классификаторы с примитивами Хаара, и алгоритма распознавания по характерным точкам, - для каждого из которых определялись вероятности ошибок первого и второго рода в зависимости от размера объекта в пикселях (и как следствие расстояния до объекта) можем оценить их эффективность сравнивая графически размеры границ объекта на изображении (размытия объекта, рисунок 2.3 а, б), рисунок 2.4 а, б и скорости объекта рисунок 2.5 а, б.

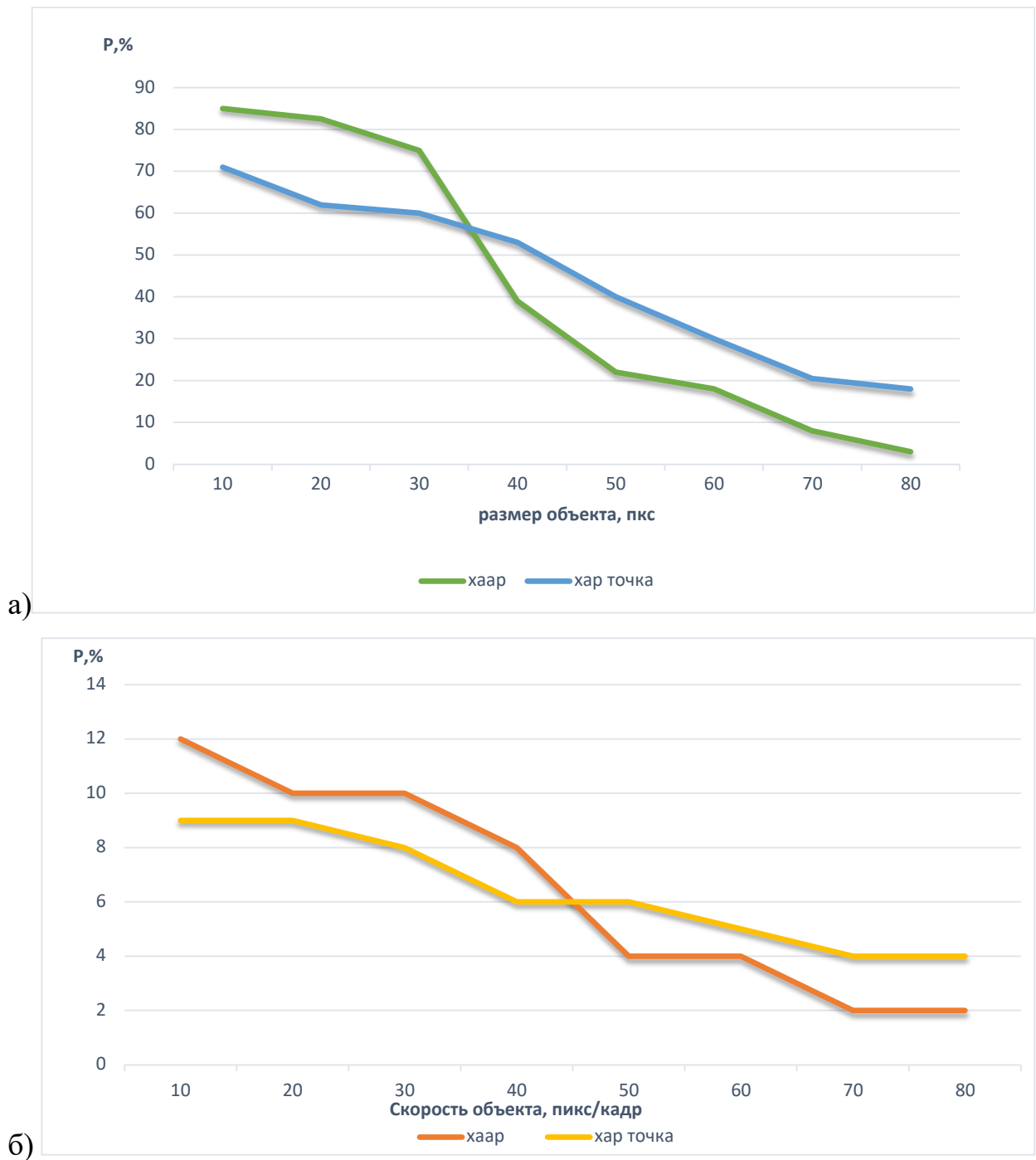


Рисунок 2.3. Зависимость вероятности ошибки первого (а) и второго (б) рода от размеров объекта

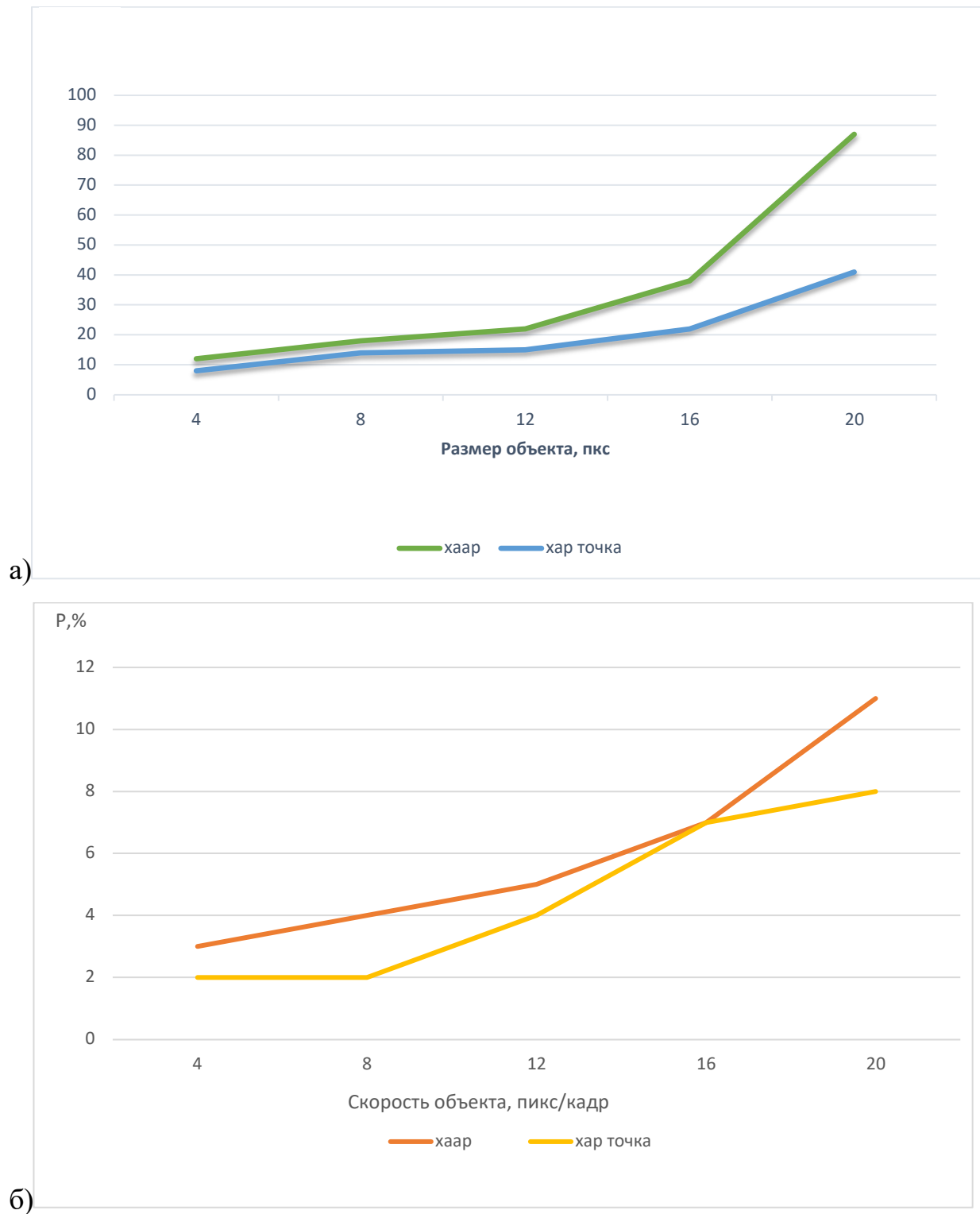


Рисунок 2.4. Зависимость вероятности ошибки первого (а) и второго (б) рода от размеров границ объекта

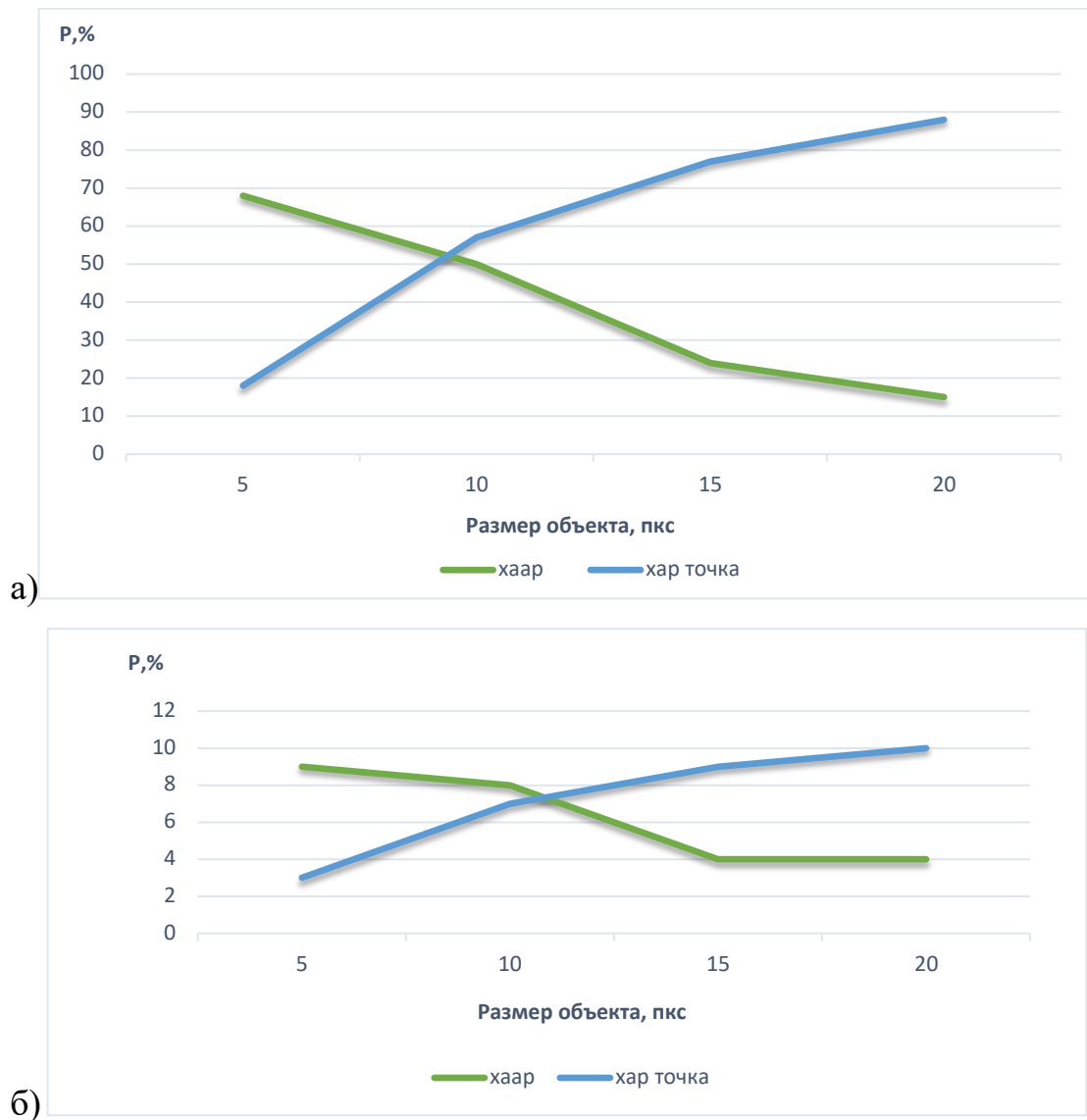


Рисунок 2.5. Зависимость вероятности ошибки первого (а) и второго (б) рода от скорости объекта

Как видно из рисунков 2.3, 2.4, 2.5 для более близко расположенных и медленнее движущихся объектов вероятность ошибок первого и второго рода меньше для алгоритма распознавания объектов с использованием примитивов Хаара, в то время как для всех остальных объектов наиболее подходящим является применение алгоритма с использованием характерных точек.

Применение предлагаемого алгоритма на вагонах путеизмерителях ЦНИИ 4 или иных, оборудованных системой видеонаблюдения и мощными вычислительными устройствами позволит автоматически определять дефекты пути, которые ранее определялись исключительно визуально.

Выводы по второй главе

2.11.1. Построена адаптивная модель состояния железнодорожного пути и его прогнозирования как ядро автоматизированной системы технического обслуживания железнодорожного пути в части выполнения работ по выгрузке и укладки балласта в пути и его планово-предупредительной выправки – адаптивная модель эталонного состояния объекта.

2.11.2. Проведено физико-вероятностное обоснование различных распределений случайной величины для оценки надежной работы железнодорожного пути. Доказано, что для настройки параметров модели целесообразно применять модель смеси гауссовских распределений.

2.11.3. Предложено ввести понятие кластера состояния пути по показаниям вагона путеизмерителя, динамически обновляемого при каждом проходе вагона путеизмерителя и обосновано его разбиение на множество нечётких зон, объединяемых множеством развивающихся нечётких кластеров гауссовых композиционных моделей (Gaussian Mixture Model, GMM).

2.11.4. Разработан алгоритм классификации методов восстановления плотности распределения исходных данных о состоянии пути, получаемых в процессе диагностирования вагонами путеизмерителями с использованием методов параметрического восстановления плотности распределения и ЕМ – алгоритма.

2.11.5. Разработана методика корректировки модели в процессе обучения при ее эксплуатации и возможного изменения перечня контролируемых параметров железнодорожного пути, определяющих исправное состояние системы.

2.11.6. Проведена оценка качества аппроксимации закономерностей изменения состояния пути разработанными моделями на основе анализа методов фильтрации информации о состоянии железнодорожного пути, поступающей с вагонов путеизмерителей при формировании матрицы исходных данных.

2.11.7. Разработана методика построения моделей прогнозирования для выявления трендов изменения состояния железнодорожного пути по показаниям

вагона путеизмерителя в условиях не полной информации и наличия корреляции параметров и объемов выполненных работ.

2.11.8. Показано, что входом в адаптивную модель обнаружения тренда изменения состояния железнодорожного пути служит вектор параметрических данных, характеризующий состояние контролируемой системы. Динамика векторов особенностей системы в рамках каждого состояния представляется нелинейной моделью

2.11.9. Обосновано применение примитивов Хаара и модифицированного алгоритма Лукаса-Канаде для автоматического распознавания дефектов железнодорожного пути при автоматизации управления технологическим процессом замены дефектных элементов в автоматизированной системе технического обслуживания пути

2.11.10. При исследованиях были использованы данные показаний вагона путеизмерителя для выбранных участков протяженностью 5 и 10 км.

2.11.11. В результате проведенных исследований обобщенный алгоритм оценки состояния железнодорожного пути, прогнозирования закономерностей его изменения и выработки управляющих воздействий на железнодорожный путь заключается в следующем:

1. Ввод исходных данных от автоматизированной системы вагона путеизмерителя о состоянии рельсовой колеи оцененных по видам отступлений.
2. Формирование базы отказов железнодорожного пути (отступления 3-й степени, вызвавшие ограничения скорости и 4-й степени);
3. Формирование базы данных обследованных участков по наработке (пропущенному тоннажу) t_i
4. Уплотнение данных при совпадении участков с одинаковым пропущенным тоннажом;
5. Преобразование исходных данных в таблицу вида **D**
6. Расчет величин $\bar{n}_i$, mi , $N(ti)$, N
7. Оценка значений функции распределения наработки до отказа
8. Вычисление вероятности появления отказов

9. Построение адаптивных моделей прогнозирования появления неисправностей рельсовой колеи.

10. Определение мест с наибольшей вероятностью возможного появления неисправностей пути

11. Прогнозирование величин неисправностей на основе адаптивных моделей прогнозирования

12. Ввод исходных данных с автоматизированной системы управления выправкой и рихтовкой железнодорожного пути (результаты расчета сдвижек и подъемов железнодорожного пути для устранения выявленных и прогнозных значений отступлений от норм содержания рельсовой колеи;

13. Расчет потребного объема балласта для выправки, подъемки и рихтовки железнодорожного пути;

14. Выработка дистанционно управляющих воздействий на рабочие органы хоппер-дозатора.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОЦЕНКЕ АДАПТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ АНАЛИЗА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

3.1. Выбор участков железнодорожного пути для эксперимента.

Для экспериментальной проверки, разработанных в предыдущей главе моделей были выбраны участки железнодорожного пути с разными техническими характеристиками, по которым были сформированы матрицы наблюдений на основе показаний вагонов путеизмерителей с ежемесячных отчетных данных по результатам проходов этих вагонов по контролируемому участку. Информация получена от вагонов – путеобследовательских станций (ВПС) ЦНИИ-4 и КВЛ-П на различных участках, характеристики которых приведены в таблице 3.1 в среднем за 5 лет эксплуатации. Период наблюдений от 6 до 18 месяцев, интервал между замерами определен технологией работы вагона-путеизмерителя и равен одному месяцу.

Закономерности строились для: статистических характеристик геометрических неровностей пути; параметров устройства кривых участков пути, ширины колеи, бокового износа рельсов проведение экспериментального исследования алгоритма расчета закономерностей. Анализ проводился на участках реконструкции верхнего строения пути, капитального ремонта, усиленного среднего и среднего ремонта, планово-предупредительной выправки пути и т.п. Информация об условиях эксплуатации выбиралась из системы баз данных путевого хозяйства (ЕКАСУИ).

На каждой дороге выбирались участки протяженностью от 30 до 180 км прямые и кривые, оценивался каждый километр, балльная оценка, скользящее среднее, число отступлений. Во всех случаях длина L анализируемого участка была не менее 1 км. В основном период наблюдений с декабря 2014 по январь 2018 г.г. Анализ изменения состояния пути проводился на участках, на которых были выполнены в разное время разные ремонты. Выборке эксплуатационно -

технических характеристиках пути подлежали следующие данные: установленные скорости движения V ; грузонапряженность Γ (млн.т.км брутто на км в год); радиус кривой участка пути; тип пути (бесстыковой, звеньевой); тип шпал (железобетонные, деревянные); тип креплений; тип балласта – щебеночный; год и тип ремонта пути, проводимого в наблюдаемый период; пропущенный тоннаж, после капитального или усиленного капитального ремонта пути (млн. т. брутто).

Пропущенный тоннаж пересчитывался на даты проходов вагона путеизмерителя, а при анализе изменения ширины колеи и бокового износа рельсов пропущенный тоннаж по рельсам дополнительно определялся с момента выполнения смены рельсов на новые или старогодные или смены рельсов с переменной канта. Характеристики экспериментальных участков железнодорожного пути приведены в таблице 1.

Таблица.1 - Характеристики анализируемых участков пути

	Дорога	L в м	Γ млн.т.км брутто на км в год	V пассж/груз, км/ч	Скрепления	L_p / всего кривых на участке
1	Московская	130	60	140/80/	КБ, АРС	54,8 /19
2	Приволжская	157	27	100/80	КБ, ЖБР	61,5 /0
3	Октябрьская	176	104	100/80	КБ, АРС	82,5 /0
4	Юго-Восточная	110	53	120/80	КБ, АРС	36,2 /0
5	Западно-Сибирская	225	63	100/80	КБ, ЖБР	89,7 /0
6	Восточно-Сибирская	30	49	70/70	КБ, ДО	0 / 28
7	Северо-Кавказская	162	50	120/80	КБ, ЖБР, ДО	40,2 /13
8	Южно-Уральская	151	52	110 /80	КБ, АРС	60,2 /
9	Дальневосточная	120	50	70/60	КБ, ЖБР, ДО	29,5 /20

По результатам прохода вагона ЦНИИ-4, определялись и/или рассчитывались: характеристики параметров устройства и содержания кривой:

железная дорога, направление, номер пути; тип пути (главный, станционный и т.п.); перегон; станция; ориентация кривой; наличие смежной кривой; количество элементарных кривых; начало кривой в плане км, м; конец кривой в плане, км, м; длина кривой в плане; угол поворота кривой; данные заезда вагона-путеизмерителя.

Для элементарной кривой указывалось, км, м в плане и по уровню: начало и конец кривой; начало и конец круговой кривой; длины элементарной и круговой кривой; угол поворота круговой кривой; радиусы r минимальный, средний и максимальный в пределах круговой кривой, включая СКО кривизны (или рихтовки); максимальное, среднее, СКО и минимальное значения возвышения; максимальная, средняя, минимальная и СКО ширины колеи в круговой кривой; максимальный, средний, СКО и минимальный боковой износ рельсов; уклон отвода возвышения первой и второй переходной, максимальный и минимальный уклоны; длины первой переходной в плане; длина первой и второй переходной по уровню; длина второй переходной в плане; максимальное и минимальное непогашенное ускорение для грузового и пассажирского движения соответственно; параметры расстройств кривой по кривизне и по уровню; максимальная скорость подъема колеса на рельс; максимальное значение скорости нарастания непогашенного ускорения и его координата (км,м); нормативные (допустимые) скорости движения по участку для грузовых и пассажирских поездов; непогашенное ускорение; скорости по непогашенному ускорению для грузовых и пассажирских поездов; скорость по отводу возвышения уровня; по нарастанию непогашенного ускорения; по сопряжению смежных кривых; скорость на элементарной кривой для пассажирского и грузового движения; общая допустимая скорость на элементарной кривой для грузового движения.

Для формирования матрицы наблюдений примем следующие обозначения: Начало круговой кривой в км и м; km, m ; длина круговой, м L_k ; длина 1-ой переходной, м L_1 ; длина 2-ой переходной, м L_2 ; среднее отклонение длин кривых по кривизне и по уровню, м dL ; максимальное отклонение длин кривых по

кривизне и по уровню, mxL м; радиус (средний), м R ; кривизна (средняя), мм mKr ; СКО кривизны, мм sKr ; возвышение (среднее), мм mH ; СКО возвышения, мм sH ; ширина-1520 мм (средняя), мм mWd ; СКО ширины, мм sWd ; максимальная ширина колеи-1520 мм, мм $mxWd$; модифицированное среднее ширины колеи -1520мм, мм $Шир$; боковой износ рельсов (средний), мм mIz ; СКО бокового износа рельсов, мм sIz ; максимальный боковой износ рельсов, мм $mxIz$; Модифицированное среднее износа, мм $Износ$; непогашенное ускорение (среднее), $м/с^2$ mAn ; максимальное непогашенное ускорение, $м/с^2$ $mxAn$; максимальный отвод возвышения (на базе 30м) на 1-ой переходной, мм/м $gr1$; максимальный отвод возвышения (на базе 30м) на 2-ой переходной, мм/м G_{r2} ; Скорость изменения непогашенного ускорения, $м/с^3$ F_i ; Коэффициент расстройств кривой P ; Скорость по приказу (пассажирского состава), км/ч V_{pz} ; Допустимая скорость движения (пассажирского состава), км/ч V_{dp} ; Допустимая скорость движения по непогашенному ускорению, км/ч V_{kr} ; Допустимая скорость движения по отводу возвышения, км/ч V_{pr} ; Пропущенный тоннаж, млн.т. $T_{он}$.

3.2. Формирование матрицы наблюдений. Фильтрация исходных данных.

Для проверки разработанных моделей участки выбирались как наихудшие по состоянию железнодорожного пути, так и соответствующие среднесетевым показателям. В качестве исходной информации принимались средние значения балльной оценки, количества отступлений от норм содержания пути, показатель среднеквадратичного отклонения (СКО) на участке и индекса неровности геометрии колеи Co . Средняя оценка на километре или суммарная на участке рассчитывалась для участков протяженностью 10 км, если иное не оговорено особо. Таким образом, формирование матрицы наблюдений по оценке геометрии рельсовой колеи (ГРК) проводилась по:

- количеству (на 10 км длины) выявленных отступлений разных видов (сужение, уширение, уровень, перекося, просадка, рихтовка, см. таблицы в

приложении), получаемых из ведомостей оценки состояния рельсовой колеи ПУ-32, предоставленных ДИЦДМ;

- по величинам средних квадратичных отклонений (СКО) и сводного индекса S_o , характеризующего средневзвешенную суммарную величину СКО отдельных параметров.

Анализ состояния пути на обоих участках 1 и 2 по величинам СКО параметров геометрии колеи показал, что все параметры за период эксплуатации оказались стабильными без заметной тенденции к росту в анализируемый период.

Средняя балловая оценка на анализируемых участках колебалась в пределах 40 – 90 баллов, что хуже среднесетевых показателей как показано в приложении в таблице П.1 для 4-х анализируемых участков из расчета 10 км на участке.

Состояние пути на участке испытаний можно оценить, как удовлетворительное, но выше среднесетевых показателей.

Анализ состояния пути на анализируемых участках по количеству выявленных отступлений разных параметров из ведомостей ПУ-32, приведенные в приложении (табл. П2 и П.3) показывает, что отсутствует тенденция к увеличению или уменьшению количества отступлений, но имеются колебания в течение года - наибольшее количество отступлений приходится на зимне-весенний период и снижается в летне-осенний период.

Анализ по числу отступлений показывает большой разброс, причем в наибольшей степени по уширению и сужению колеи, так как - погрешности в настройке на 1 мм могут привести к существенным отличиям в результатах оценки.

Но более объективной оценкой геометрии рельсовой колеи (ГРК) служат величины среднеквадратических отклонений (СКО), по которым определяется общую оценку и «тренд» изменений состояния ГРК. Динамика среднеквадратичных отклонений (СКО) на участке испытаний приведена в приложении в таблице П.4.

Проведённый анализ состояния пути для разных участков по величинам СКО параметров, оцениваемых вагоном путеизмерителем показал, что все

параметры относительно стабильны, изменчивость величин в разы меньше, чем изменчивость количества отступлений, вызванная погрешностями измерений. Динамика индекса неровности геометрии колеи S_o приведена в таблице П.5. Общее состояние участков по геометрии колеи несколько отличается, величины СКО всех параметров ГРК на участке 2, в среднем, на 15 – 20 % меньше (т.е. неровности на пути - меньше), чем на участке 1.

3.3. Оценка выявленных закономерностей изменения состояния железнодорожного пути по моделям

3.3.1. Анализ закономерностей по полиномиальным и линейным моделям

Сравнительный анализ участков 1 и 2 по моделям, приведенным на рисунках 3.1-3.7 показал стабильное состояние пути на всех участках и отсутствие «деградации» пути.

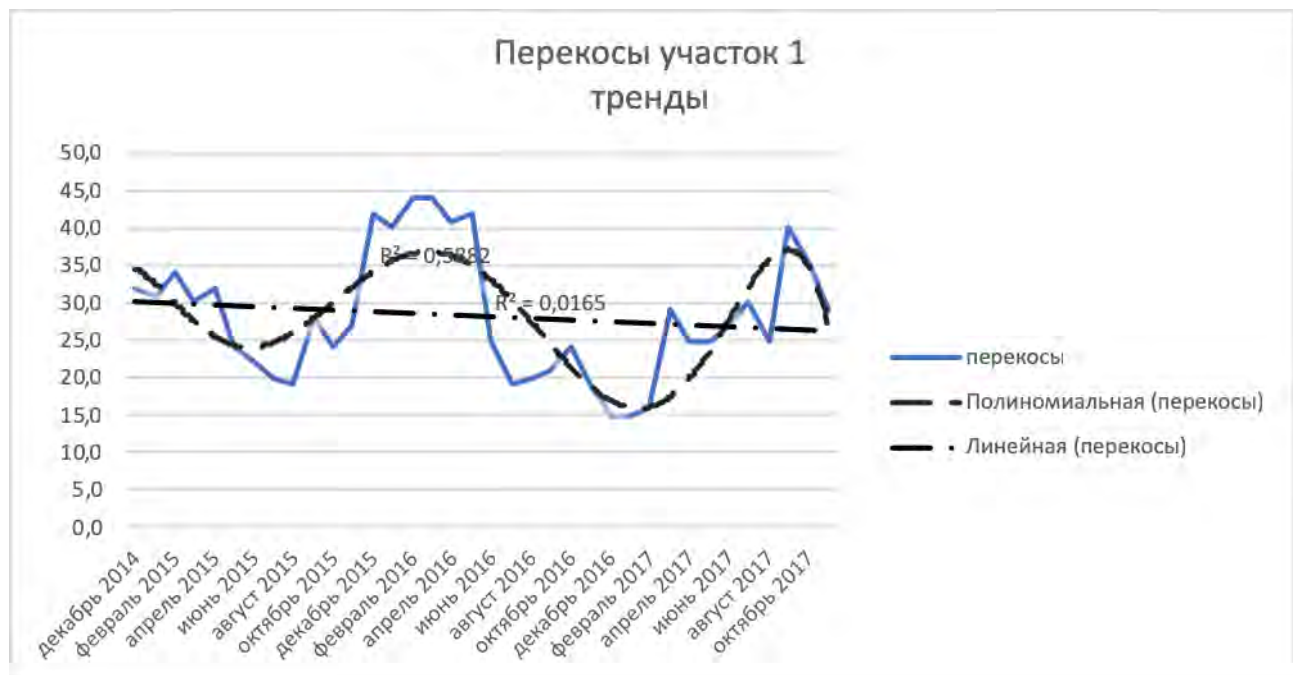


Рисунок 3.1. Тренды закономерностей изменения состояния участка 1 пути по параметру перекося на основе полиномиальных и линейных моделей



Рисунок 3.2. Тренды закономерностей изменения состояния участка 2 пути по параметру перекосы на основе полиномиальных и линейных моделей



Рисунок 3.3. Тренды закономерностей изменения состояния участка 1 пути по параметру просадки на основе полиномиальных и линейных моделей



Рисунок 3.4. Тренды закономерностей изменения состояния участка 2 пути по параметру просадки на основе полиномиальных и линейных моделей



Рисунок 3.5. Тренды закономерностей изменения состояния участка 1 пути по параметру рихтовка на основе полиномиальных и линейных моделей



Рисунок 3.6. Тренды закономерностей изменения состояния участка 2 пути по параметру рихтовка на основе полиномиальных и линейных моделей



Рисунок 3.7. Тренды закономерностей изменения состояния участка 1 пути по параметру рихтовка на основе полиномиальных и линейных моделей



Рисунок 3.8. Тренды закономерностей изменения состояния участка 2 пути по параметру рихтовка на основе полиномиальных и линейных моделей

3.3.2. Оценка точности прогноза по линейным и полиномиальным моделям и проверка закона распределения оценок участка пути

На основе полученных и выше представленных экспериментальных данных были рассчитаны показатели регрессионной статистики, которые сведены в таблицы, приведенные в Приложении и на графиках, приведенных ниже.

Показатели регрессионной статистики математических моделей прогнозирования закономерностей появления неисправностей рельсовой колеи

соответственно для перекосов и балльной оценки и ширины колеи и балльной оценки приведены в таблице П 6. В качестве остатков принимается разность между реальным значением балльной оценки участка и прогнозным, полученным из регрессии. На рисунках 3.9 и 3.10 приведены графики разбросов (остатков) прогнозных значений по одному из параметров рельсовой колеи.

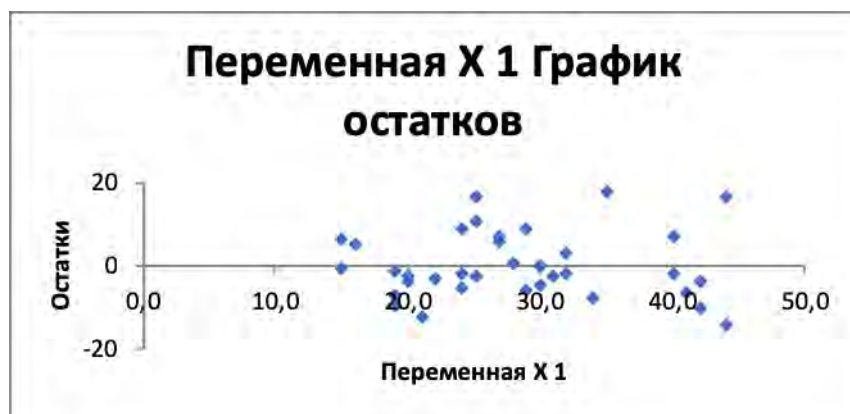


Рисунок 3.9 График разбросов (остатков) прогнозных значений по одному из параметров (перекосы) рельсовой колеи

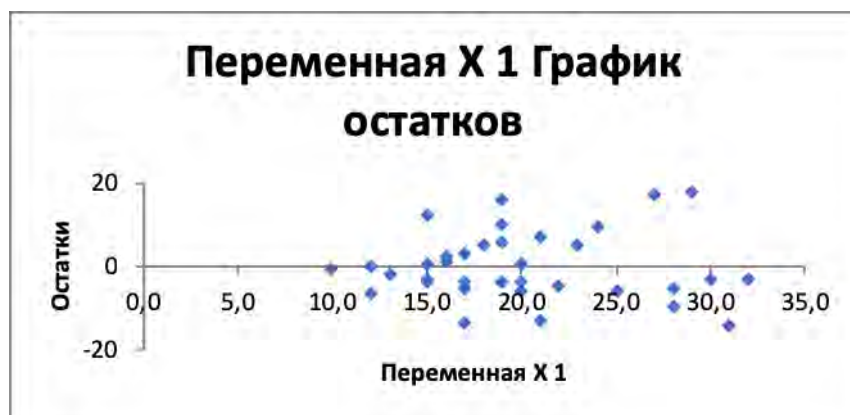


Рисунок 3.10 График разбросов (остатков) прогнозных значений по одному из параметров (ширина колеи) рельсовой колеи

Результаты расчетов по оценке значимых факторов (дисперсионного анализа) сведены в таблицу, приведенную в Приложении (таблицы П7 и П8). На рисунках 3.11 и 3.12 приведены фактические оценки участка пути и предсказанные по построенным моделям.

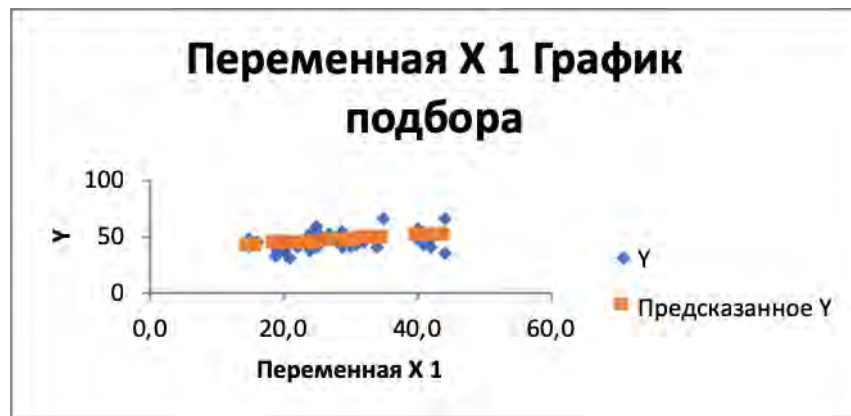


Рисунок 3.11 График прогноза оценок первого участка пути

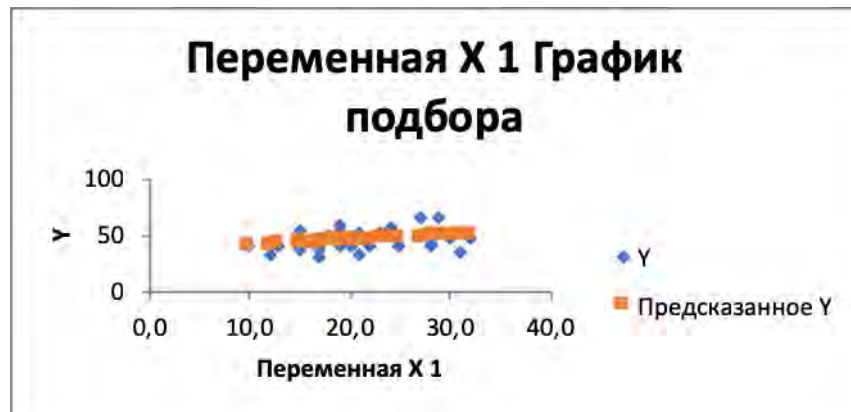


Рисунок 3.12 График прогноза оценок второго участка пути

Рассчитывались квантили для балльной оценки участка пути, позволяющие оценить вероятность прогноза, иначе говоря его точность, приведенные в приложении (таблица П9 и П10). Графики нормального распределения для проверки гипотезы о нормальном распределении приведены на рисунках 3.13 и 3.14. Из построенных графиков квантилей видно, что распределения оценок участков по показаниям вагона путеизмерителя не в полной мере соответствует нормальному распределению, что подтверждает теоретические исследования предыдущей главы, рекомендовавшие применять бета распределение.

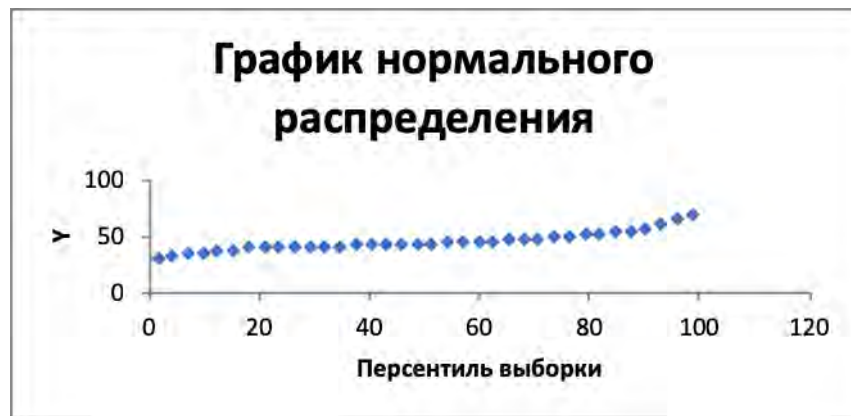


Рисунок 3.13 График проверки гипотезы о виде распределения по выборке первого участка пути



Рисунок 3.14 График проверки гипотезы о виде распределения по выборке второго участка пути

3.3.3. Оценка износа рельсов, влияющих на оценку состояния железнодорожного пути по показаниям вагона путеизмерителя

Для оценки износа рельсов, влияющего на оценку по параметрам показаний вагона путеизмерителя уширение и сужение рельсовой колеи, на участках, приведенных в таблице 3.1. выбраны участки, характеристики которых приведены в таблице 3.2. Мониторинг изменения износа рельсов проводился по показаниям путеизмерителя ЦНИИ-4. Боковой износ рельсов измеряется по обоим рельсовым нитям, учитываемой и оцениваемой величиной являются боковой износ наружного рельса в кривых.

Таблица 3.2. Характеристики экспериментальных участков пути для оценки износа, влияющего на оценку участка пути

характеристики	Номера участков								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Длина участка км	6	6	11	9	6	8	8	9	9
Тип скрепления	КБ	КБ	АРС	пандрол	АРС	АРС	КБ	КБ	ЖБР
V пасс/груз	100/8 0	100/8 0	120/8 0	230/9 0	200/9 0	100/8 0	100/8 0	80/60	90/60
R _{min} кривых м	700	300	450	3000	2720	2000	2000	1000	1000
% прямых/ кривых	85/15	85/15	90/10	80/20	90/10	85/15	85/15	85/15	85/15
Г в млн.т.км.бр в год	10	17,6	20,7	17,3	17,2	50	50	22,7	45,2
Т в млн.ткм бр.	52	71,6	93,3	25,6	81,4	200	200	225	449

Введем понятие обобщенная оценка ширины колеи (ОШК) и бокового износа рельсов (БИ), интегральный показатель - модифицированное среднее ширины колеи (МСШК) и износа (МСБИ), а именно, сумма среднего значения μ и среднеквадратического отклонения (СКО) σ параметра, умноженного на квантиль. - значение вероятности нормального распределения. Принимаем вероятность 99, а квантиль нормального распределения 2,326 [182]и получаем:

$$\mu_{99} = \mu + 2,326 \times \sigma, \quad (3.1)$$

Как видно из рисунка 3.14 при длине круговой кривой 100 м значение показателя ширины колеи или бокового износа превосходят модифицированное среднее на длине не более 1м и соответствует максимальному значению параметра в кривой.

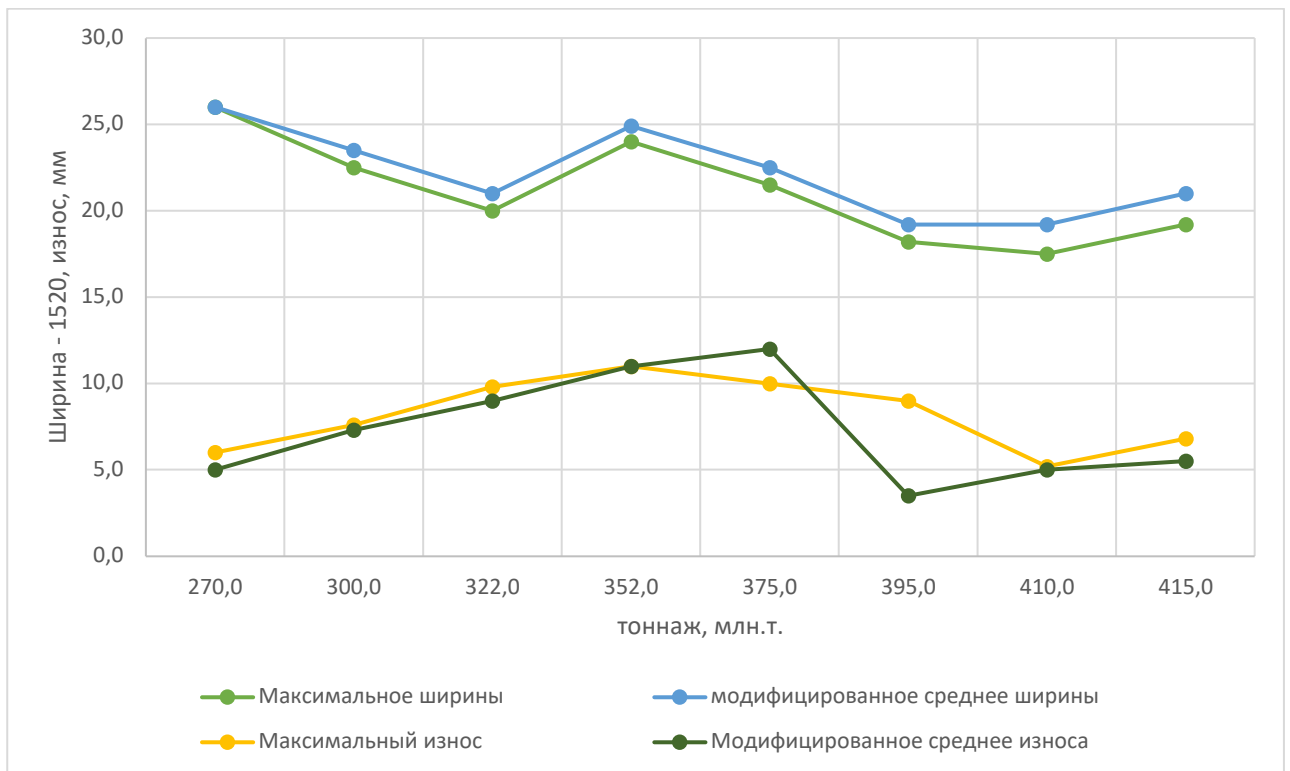


Рисунок 3.14. Изменение показателей бокового износа и ширины колеи

Для анализа изменения состояния пути в процессе эксплуатации рассчитываются среднеквадратические отклонения просядок рельсовых нитей и отклонений уровня от скользящего среднего (перекосы). СКО вычисляются на участках пути длиной равной пикету, а именно 100 м последовательно, со сдвигом по пути на 20 м по известным формулам математической статистики. Для обобщенной оценки состояния геометрии отрезка пути введем θ - безразмерный комплексный показатель, характеризующие состояние геометрии пути в вертикальной плоскости, который вычисляется как сумма отношений СКО $\sigma_{пр.пр.}$, $\sigma_{пр.лв}$ просядок и $\sigma_{пер}$ перекося к $\sigma_{пр}(120)$, $\sigma_{пер}(120)$ - соответствующим пороговым значениям, установленным для скорости 120 км/ч.

На основании статистической обработки фактических данных на участках пути различных категорий и состояния полученные пороговые значения безразмерного комплексного показателя для разных установленных скоростей движения пассажирских поездов приведенные в таблице П.11 фактически подтвердили ранее проведенные исследования АО «ВНИИЖТ» [15, 90,]. По

значениям показателя θ вычисляются величины условной расчетной скорости соответствующей состоянию пути (СССП). Которые являются обобщенной числовой оценкой состояния геометрии рельсовой колеи на отрезке (пикете, километре, перегоне) и характеризуют вероятность появления опасных отступлений, ограничивающих скорость движения поездов.

Модифицированное среднее СССП₇₅ с вероятностью $p=0,75$ с квантилем 0,674 рассчитывается как сумма средних значений скользящих значений СССП_μ; и СССП_σ - среднеквадратическое отклонение скользящих значений СССП на участке в виде: $СССП_{75} = СССП_{μ} + 0,674 \times СССП_{σ}$ Это означает, что 75% пикетов участка имеют значения СССП больше величины СССП₇₅. На основе информации по условиям эксплуатации кривых, выбранных из системы баз данных путевого хозяйства (СБД-П) за 5 лет и результатам исследований АО «ВНИИЖТ» [112,144] получены фактические значения параметров устройства и содержания, которые собраны в таблицы, в которых для каждого участка пути. Для оценки изменения фактических величин параметров устройства, ширины колеи и бокового износа рельсов в кривых участках пути для каждой кривой формируется таблица П.12, которая содержит анализируемые характеристики кривых по проходам вагона ЦНИИ-4.

Проведенный анализ изменения ширины колеи и бокового износа рельсов подтверждает работоспособность моделей и в целом идентичен результатам, полученным ранее ВНИИЖТ [114,197]. Действительно, разобьем период эксплуатации на три группы по пропущенному тоннажу. Первая, от 0 до 20-50 млн. т. выявлена наибольшая интенсивность роста показателей: кривых радиусом 200-350 м интенсивность роста ширины колеи 0.15-0.20 мм/млн. т., бокового износа 0.12-0.18мм/млн. т; в кривых радиусом 600-800 м интенсивность роста ширины колеи 0.12-0.18 мм/млн. т., бокового износа - 0.10-0.15 мм/млн. т. Вторая группа: от 20-50 млн. т. до 100-200 млн. т. рост интенсивности снижается: в кривых радиусом 200-350 м интенсивность роста ширины колеи 0.08-0.12 мм/млн. т., бокового износа - 0.07-0.10 мм/млн. т; в кривых радиусом 600-800 м на этом этапе интенсивность роста ширины колеи 0.10-0.15 мм/млн. т., бокового износа -

0.08-0.12 мм/млн. т. В кривых малого радиуса и в кривых радиусом до 800-850 м в этот период, как правило, производится смена или перекладка рельсов, что приводит к изменению значений ширины колеи и бокового износа. Третья группа, более 100-200 млн. т, резкое снижение интенсивности роста показателей: в кривых радиусом 200-350 м интенсивность роста ширины колеи 0.03-0.05 мм/млн. т., бокового износа - 0.01-0.03 мм/млн. т; в кривых радиусом 600-800 м на этом этапе интенсивность роста ширины колеи 0.004-0.008 мм/млн. т., бокового износа - 0.001-0.003 мм/млн. т.

Таким образом, заметного изменения значений интенсивности роста показателей после проведения смены рельсов (новыми, старогодными, с переменной канта) не наблюдается. Динамика ширины колеи и бокового износа в кривых показывает, что прогноз изменение параметров по значениям модифицированных средних, учитывающих неравномерность ширины колеи и износа в кривой возможно линейной регрессией.

Предварительно проводим фильтрацию исходных данных для выявления сбойных измерений ширины колеи и бокового износа рельсов, получаемых оптическими датчиками, особенно при проездах в зимний период [104, 117].

Анализ изменения возвышения показывает колебание среднего значения возвышения в кривой $\pm 4-7$ мм, колебания вызваны с ошибками измерений (неверным определением «нулевой» линии уровня) и изменением состояния, связанного с замерзанием и оттаиванием балласта. Устойчивый тренд изменения возвышения говорит о недостатке или избытке возвышения в кривой. Резкие колебания возвышения в периоды замерзания и оттаивания балласта, как правило, свидетельствуют о потере его несущей способности, а резкие изменения возвышения свидетельствуют о проведении работ по переустройству кривой. На рисунке 3.15 показаны графики изменения среднего значения возвышения в четырех различных кривых, которые хорошо иллюстрируют характер поведения возвышения в кривых в процессе эксплуатации.

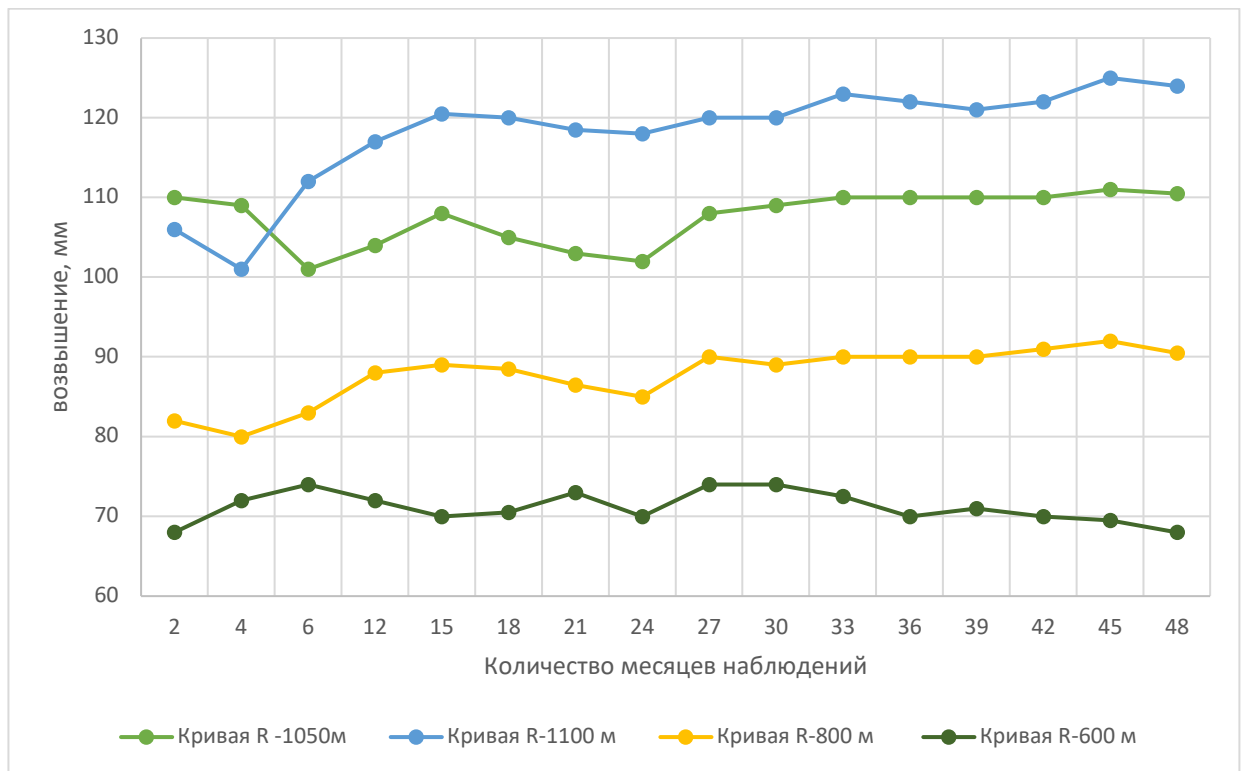


Рисунок 3.15. Изменение среднего значения возвышения в кривых

Рассмотрим два значения непогашенного ускорения: среднее значение, как среднее по всем измерениям кривизны и уровня в круговой кривой; максимальное на всей кривой. Из анализа видно, что максимальное значение непогашенного ускорения на всех анализируемых кривых находится на круговой кривой, а сезонные колебания значений непогашенного ускорения, связанные, как правило, с изменением возвышения (замерзание, оттаивание, увлажнение балласта) в кривой. Колебания максимального непогашенного ускорения $\pm 0.02-0.03$ м/с² от среднего значения и коррелированы с изменением возвышения. На наблюдаемых участках резкие изменения непогашенного ускорения вызваны не появлением «заводин» в плане, а проведенным переустройством кривых. На рисунке 3.16 показаны графики изменения максимального непогашенного ускорения в трех кривых приблизительно одного радиуса, с разным возвышением и одинаковой установленной скоростью пассажирского состава 100 км/ч. Превышение норматива содержания пути по значению непогашенного ускорения 0.7 м/с² вызвано тем, что возвышение при проектировании кривой рассчитывается, как правило, без учета возможного изменения возвышения, происходящего в процессе эксплуатации, поэтому установленную в проекте скорость после

длительной эксплуатации пути ограничивают. На рисунке 3.16 ограничение показано 95 км/ч. По оценке устойчивого роста трендов непогашенного ускорения и возвышения, можно судить о тенденции потери несущей способности балласта и проседании наружной нити. Тренды падения непогашенного ускорения и возвышения – характеризует тенденцию проседания внутренней нити.

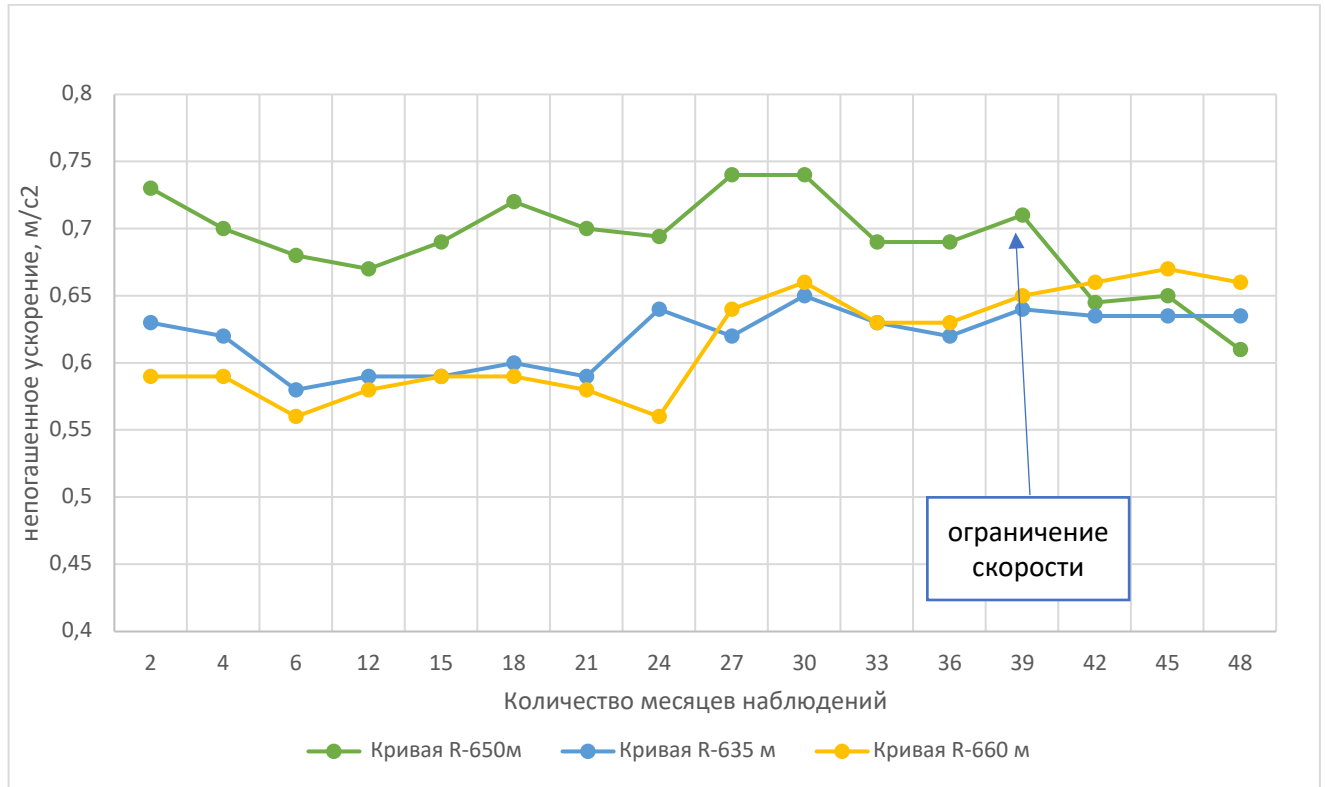


Рисунок 3.16. Изменение максимального значения непогашенного ускорения

Устойчивый тренд изменения непогашенного ускорения при отсутствии тренда по возвышению служит иллюстрацией выраженной тенденции расстройств кривой в плане. Анализ показывает, что сезонные колебания значений параметра, связаны с первую очередь изменением (замерзание, оттаивание, увлажнение балласта) уровня на переходных кривых. Колебания параметра составляют $\pm 0.04-0.06$ мм/м относительно среднего значения. Изменения параметра вызваны выполненными работами по переустройству кривой [198]. На рисунке 3.17 приведены графики изменения максимального отвода возвышения в двух кривых одного радиуса, с разным возвышением и одинаковой установленной скоростью пассажирского состава 70 км/ч.

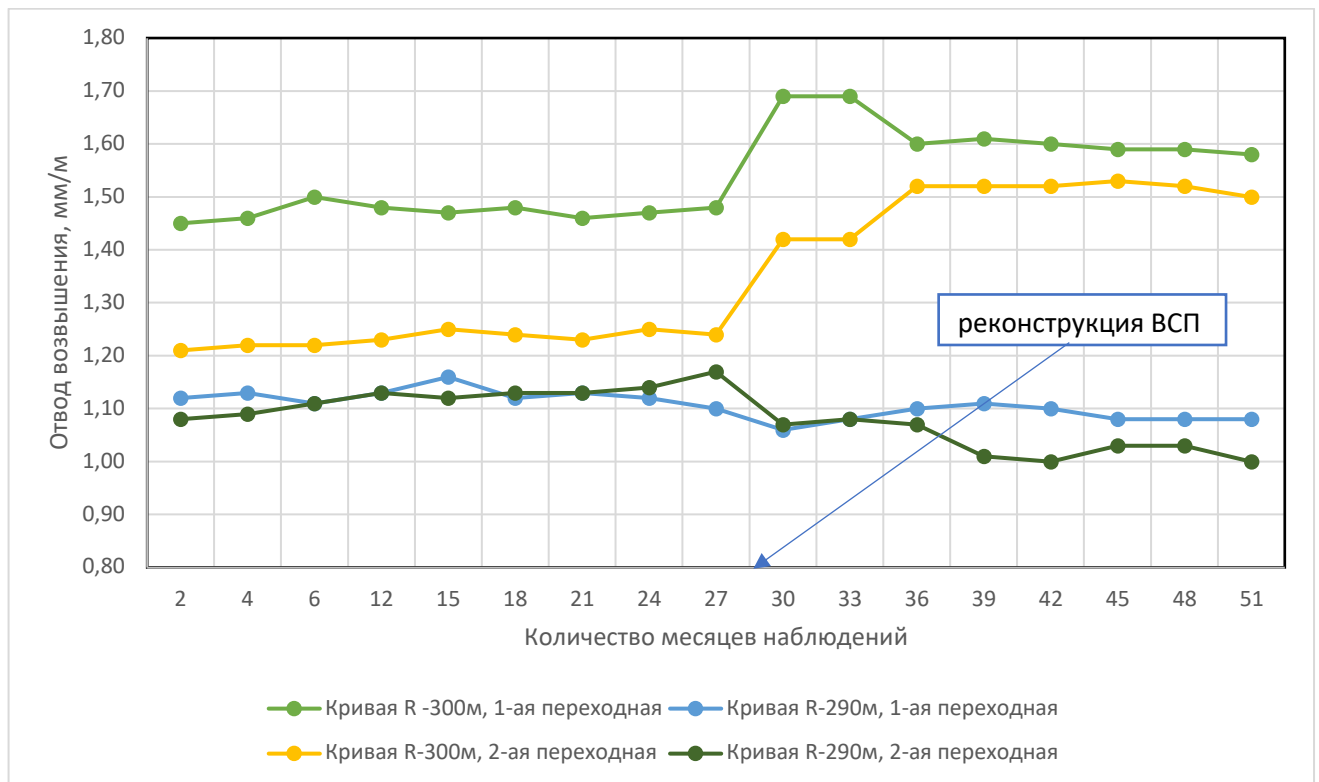


Рисунок 3.17 Изменение максимальных значений отвода возвышения

3.4. Выбор оптимальных параметров адаптации и проверка моделей прогнозирования по цензурированным выборкам

3.4.1. Определение оптимальных параметров адаптации.

Как было обосновано в главе 2, оптимальное значение α для адаптивной модели определяются из условия минимизации выражения (2.6) согласно (2.13).

Аппроксимация и экстраполяция полученных зависимостей проводилась по формулам (2.14) Результаты прогноза по адаптивным моделям приведены в таблице П.13. Поле допуска степеней отступлений просадок согласно нормативным документам [198] составляет 5—10 мм, поэтому ошибка прогноза 1—2 мм допустима.

Из таблицы 3.1 были выбраны участки пути с различным типом верхнего строения и различными эксплуатационными характеристиками общей протяженностью 60 км, период наблюдения от 1 до 9 лет. Рассматривались временные ряды балльных оценок B и скользящего среднего по участку как

предварительно выравненные, так и не выравненные. Основным инструментом анализа временных рядов являются их автокорреляционные функции R с задержкой K и дисперсии. Результаты расчетов приведены на рисунке 3.18. Выбраны два участка, 1- пропущенный тоннаж 0 (после проведенного капитального ремонта) и участок 2, пропущенный тоннаж 750 млн. брутто. Сплошная линия - не выравненные; штрих пунктирная – выравненные.

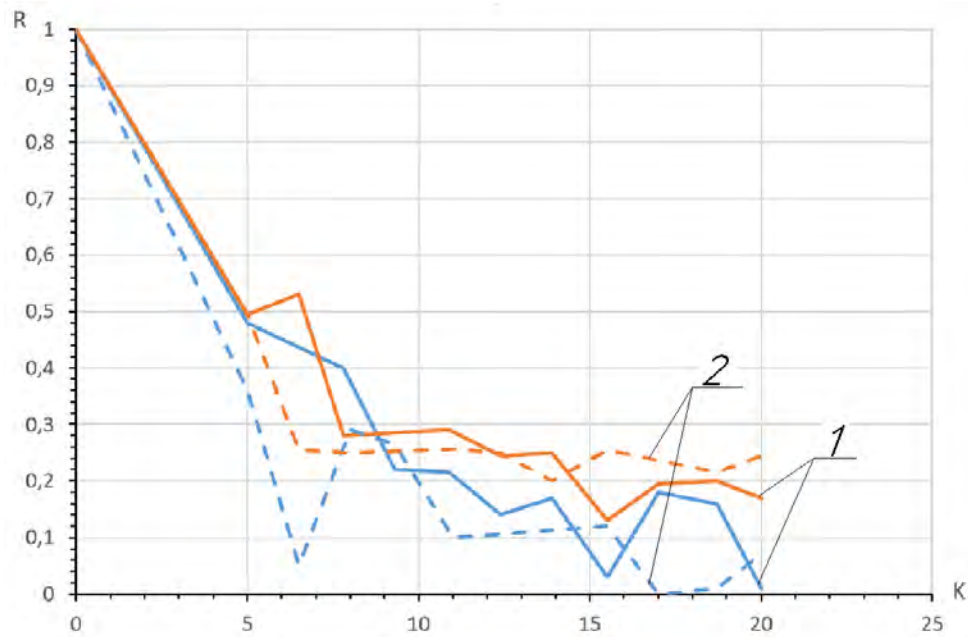


Рисунок 3.18 - Автокорреляционные функции временных рядов балльных оценок участков пути

Как видно из рисунка 3.18, влияние ς заметно при переходе от не выравненных рядов к выравненным и от рядов балльных оценок к рядам средних по участку ординат неровностей, а с увеличением пропущенного тоннажа низкочастотная составляющая процесса $\tilde{B}$ имеет тенденцию к росту, причем ярко выраженной периодической составляющей, вызываемой влиянием сезонности, не наблюдается, что подтверждается и выше приведенными исследованиями.

Для выбора оптимального значения параметра адаптации (2.15) Проводился эксперимент, последовательно задавались значения α от 0,01 до 0,9 с шагом 0,01 и для каждого значения рассчитывалась дисперсия σ_{np}^2 . Получено, что α для средних по участку ординат неровностей колеблется в пределах 0,2—0,6, а σ_{np}^2 —

от 0,2 до 2,5 мм, причем меньшая точность прогноза для рихтовки, а большая по уровню и просадкам. Модели нулевого порядка практически применимы при прогнозировании для любых периодов эксплуатации. Модели первого и второго порядков дают более высокую точность прогноза и особенно в период, предшествующий капитальному ремонту, чем модели нулевого порядка, но более чувствительны к случайным колебаниям процесса. Поэтому эффективнее использовать модель нулевого порядка, меняя ее чувствительность за счет изменения параметра адаптации α .

Реакция модели нулевого порядка на изменение параметра адаптации α на участке пути, на котором выдано ограничение на скорость движения, а работы по устранению единичных отступлений до капитального ремонта практически не проводились показана на рисунке 3.19 для трех кривых, построенных при разных значений α , первая (1) $\alpha=0,6$; вторая (2)- $\alpha=0,4$; третья (3) $\alpha=0,1$.

Для данного примера нулевая модель при $\alpha = 0,6$ дает вполне удовлетворительное приближение к фактическим значениям процесса. Практически формулу для расчета α с учетом фактической грузонапряженности участка Γ и в соответствии с нормативными сроками плановых ремонтов представим, как:

$$\alpha = \frac{2}{1 + 12 \cdot \frac{(T_j - T_{j-1})}{\Gamma}}, \quad (3.2)$$

где T_j , T_{j-1} —пропущенный тоннаж, млн. т брутто, соответственно к J -му и $(J-1)$ -му ремонтам; Γ — грузонапряженность участка, млн. т брутто в год, на 1 км пути.

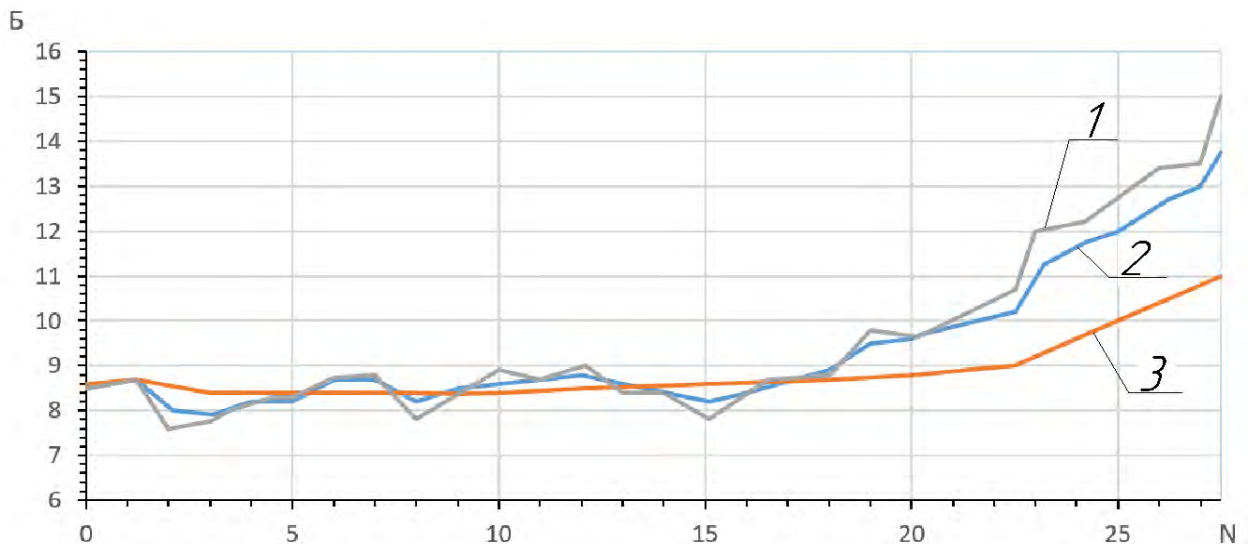


Рисунок 3.19 - Зависимость оценок Б участка от числа проходов вагона-путеизмерителя от параметров адаптации α

Точность прогноза определялась из условия попадания рассчитанное по модели значение $A_{N_{np}}$ в диапазон $A_N + \gamma$, где A_N — фактическое замеренное значение ординаты неровности N-го прохода путеизмерительного вагона; γ — погрешность записи измеряемых величин. Выше мы называли это остатками.

3.5. Экспериментальная проверка моделей закономерностей развития неисправностей рельсовой колеи на основе сформированной матрицы показаний вагона путеизмерителя как цензурированной выборки.

Как было доказано в главе 2 при цензурированной выборки число неисправностей N на участке пути, на котором предполагалось оценить наработку t безотказной работы с вероятностью $P_N(t)$ при нижней γ доверительной границе вероятности безотказной работы и пропущенный по участку пути тоннаж t , определяли по формуле (2.32), при этом цензурированию соответствовали середины интервалов группирования.

Анализ технического состояния и надежности участка железнодорожного пути проводился на основе матрицы наблюдений сформированной по показаниям вагона путеизмерителя, записанных в ведомости ПУ-32 что показано в таблице П 14. Эти данные представляют собой многократно цензурированную выборку при

сгруппированном способе задания исходной информации с малым числом [183,199,200]. Число отказов и цензурирований этой выборки вычисляется по формулам (2.36). Значения эмпирической функции распределения ресурса железнодорожного пути, вычислялась методом Джонсона, учитывающим цензурированность выборки, а также традиционным методом по формулам главы 2, а именно: (2.32), (2.33). Результаты расчетов сведем в таблицу П. 15. Таким образом, основе неполной информации были построены линейные, полиномиальные, экспоненциальные и логарифмические модели для перекосов, просадок, рихтовки и ширины колеи, приведенные на рисунках 3.20, 3.21, 3.22, 3.23, 3.24, 3.25, 3.26, 3.27. Действительно, метод Джонсона при малом числе измерений позволяет получать более точные оценки, чем традиционный метод.



Рисунок 3.20 Закономерности на основе разных моделей для перекосов по участку 1



Рисунок 3.21 Закономерности на основе разных моделей для перекосов по участку 2



Рисунок 3.22 Закономерности на основе разных моделей для просадок по участку 1



Рисунок 3.23 Закономерности на основе разных моделей для просадок по участку 2



Рисунок 3.24 Закономерности на основе разных моделей для рихтовок по участку 1



Рисунок 3.25 Закономерности на основе разных моделей для рихтовок по участку 2



Рисунок 3.26 Закономерности на основе разных моделей для ширины колеи по участку 1



Рисунок 3.27 Закономерности на основе разных моделей для ширины колеи по участку 2.

3.6 Прогнозирование трудозатрат множественной регрессией.

На основе усредненных данных с вагонов-путеизмерителей восстановлена множественная регрессия между регистрируемыми параметрами и объемом работ за данный временной интервал. В качестве исходных данных значения просадки, ширина колеи и соответствующий объем работ в ч/м на данном участке пути без детализации по работам.

Общее назначение множественной регрессии, термин был впервые использован в работе Пирсона - Pearson, 1908, состоит в анализе связи между несколькими независимыми переменными (называемыми также регрессорами или предикторами) и зависимой переменной.

Рассмотрим два случая. В первом, с помощью множественной регрессии восстановим зависимость трудозатрат от просадок и отклонений колеи от номинала. В приложении к главе 3 (таблица П.16-П.19 представлены результаты регрессии в зависимости от переменных (просадок, ширины колеи и рихтовки)

Из представленных результатов видно, что при включении в модель рихтовки в рельсе стандартная ошибка на данной выборке сократилась по сравнению с зависимостью на основе только лишь просадок и отклонений колеи.

Анализируя весовые коэффициенты каждого из участвующего параметра можно видеть обратную пропорциональность между отклонениями контролируемых параметров и трудозатратами.

Таким образом, для данного участка железнодорожного пути видно, что в периоды с большим объемом работ на поддержание пути наблюдались минимальные отклонения измеряемых характеристик пути.

3.7. Заключение по третьей главе

1. Для участков железнодорожного пути с различными характеристиками на различных дорогах была сформирована матрица наблюдений за несколько лет с 2014 по 2018 г.г. по показаниям вагонов путеизмерителей по основным параметрам, записываемых ими, а именно: количеству (на 10 км длины) выявленных отступлений разных видов (сужение, уширение, уровень, перекос, просадка, рихтовка, получаемых из ведомостей оценки состояния рельсовой колеи ПУ-32, предоставленных ДИЦДМ; по величинам средних квадратичных отклонений (СКО) и сводного индекса S_o по показаниям ПС ЦНИИ -4.

2. Анализ матрицы наблюдений с целью фильтрации недостоверных и случайных данных, показал, что по количеству выявленных отступлений разных параметров имеются колебания в течение года, наибольшее количество отступлений в зимне-весенний период и снижается в летне-осенний период, при этом наибольший разброс показаний по ширине рельсовой колеи, которые связаны с изменением уровня на переходных кривых, а значение показателя ширины колеи или бокового износа превосходят модифицированное среднее на длине не более 1м и соответствует максимальному значению параметра в кривой с колебаниями средних значений возвышения в кривой $\pm 4-7$ мм из за ошибок измерений, и смерзания и оттаивания балласта.

3. Рассчитан оптимальный коэффициент адаптации модели прогнозирования развития неисправностей и построены ранее во второй главе теоретически обоснованные модели закономерностей изменения состояния железнодорожного пути, линейные, полиномиальные, экспоненциальные и логарифмические с

расчетами их сходимости с фактическими значениями и проверкой применения гипотезы нормального закона распределения оценок участков пути.

4. Доказано, что распределения бальных оценок участков пути не в полной мере соответствуют нормальному распределению, что подтверждает теоретические исследования второй главы о целесообразности применения бета распределения.

5. Доказано на конкретных примерах, что зависимости изменения состояния пути построенные на основе экспоненциальной и логарифмической кривых менее адекватно описывают поведение железнодорожного пути чем полиномиальная, по которой точность прогноза оказалась наибольшей.

6. С целью возможности практического применения построенных закономерностей в условиях неполной информации при эксплуатации вагонов путеизмерителей матрица наблюдений была представлена как многократно цензурированная выборка при сгруппированном способе задания исходной информации с малым числом и на фактических данных подтвержден теоретический вывод о том, что при малом числе измерений метод Джонсона позволяет получать более точные оценки, чем традиционный метод и построенные на основе цензурированных выборок модели адекватно описывают устойчивый тренд, по которому можно прогнозировать появление неисправности 4-й степени, негативно влияющей на перевозочный процесс и быть основой для планирования предупредительных работ, включая применения их для расчета объема выгружаемого щебня с целью обеспечения рассчитанных величин сдвижек и подъемов железнодорожного пути. При этом построенные модели могут быть использованы в АСУ технологическим процессом выгрузки и укладки балласта в путь.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ТЕХНИЧЕСКИХ ТРЕБОВАНИЙ К МОДЕРНИЗАЦИИ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АСУ ТП ВЫГРУЗКОЙ И УКЛАДКОЙ БАЛЛАСТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1. Требования к технологии.

В предыдущих главах обоснована возможность создания технического обеспечения автоматизированной системы управления процессами выгрузки и укладки балласта в путь, состоящее из микропроцессорной системы управления машины типа ВПР, обеспечивающей управление процессом подбивки и рихтовки железнодорожного пути, вагона путеизмерителя, оборудованного автоматизированной системой формирования информации о состоянии железнодорожного пути и управления. Однако для завершения формирования технического обеспечения АСУ ТП ТО требуется проводить модернизацию хоппер-дозатора, осуществляющего функции выгрузки и укладки балласта в путь. Вагон путеизмеритель в качестве технического средства в АВСУ ТП ТО выполняет функции формирования матрицы наблюдений о состоянии железнодорожного пути, а машины типа ВПР с микропроцессорной системой управления, как техническое средство АСУ ТП ТО, осуществляет выработку управляющих воздействий на путь.

Модели и алгоритмы обработки матрицы наблюдений, сформированной вагоном путеизмерителем о состоянии железнодорожного пути, накопленной в течении нескольких проходов по контролируемому участку пути, для ввода в АСУ ТП разработаны во второй главе настоящего исследования.

Поэтому задача, которую необходимо решить в настоящей главе, провести модернизацию хоппер-дозатора ВПМ 770 с прерывистой выгрузкой с целью автоматизации процесса выгрузки и укладки балласта в путь без участия человека. Поэтому основная задача главы, разработка технических требований модернизации средств механизации технического обслуживания железнодорожного пути в автоматизированной системе технологическим

процессом управления выгрузкой и укладкой балластных материалов, а именно хоппер-дозатора ВПМ 770 и прежде всего дистанционное управление его разгрузочно-дозирующими механизмами.

4.2. Разработка системы дистанционного автоматического управления разгрузочно-дозирующими механизмами хоппер-дозатора ВПМ 770

4.2.1. Анализ системы управления разгрузочно-дозирующими механизмами хоппер-дозатора ВПМ 770 обеспечить автоматическое дистанционного управление крышками

Установка на разгрузочном люке бункера крышки, смонтированной на поворотном валу, расположенном вдоль хоппер-дозатора ВПМ 770, позволяет выгружать и укладывать балласт на путь порциями от 0,02 м³, что обеспечивает выгрузку оптимального количества балласта в места, необходимые для устранения выплесков. Автоматизация процесса открытия и закрытия крышек разгрузочных люков позволяет не только создать автоматизированную систему текущего содержания пути, но и новую технологию технического обслуживания железнодорожного пути и решить следующие задачи: определение объема работ с учетом местных условий; обеспечение равномерного качества и стабильности пути; выполнение работ в короткие сроки и с минимальным участием персонала; регистрация неисправностей, документирование фактов их устранения и контроль качества выполненных работ; автоматическое обнаружение дефектов с высокой точностью.

Анализ перспективных конструкций специального подвижного состава (СПС), эксплуатирующего на железных дорогах США и Европы, приведенный в предыдущих главах, показывает, что одним из направлений совершенствования конструкции СПС является обеспечение возможности дистанционного управления разгрузочными устройствами., которая технически автоматизировать процесс выгрузки и укладки балласта в путь.

Важнейшие функции, выполняемые при реализации комплексной механизированной и автоматизированной технологии работ: подсыпка или

выемка щебня и временное хранение излишнего балластного материала с выравниванием и формированием призмы; контроль качества щебня; стабилизация балластной постели и восстановление сопротивления поперечному сдвигу; контроль динамического сопротивления поперечному сдвигу; контроль начального качества с регистрацией результатов измерений.

Начальная стадия создания автоматизированной системы технического обслуживания пути должна начинаться с разработки схемы дистанционного управления крышками разгрузочных люков хоппер-дозатора ВПМ 770, что позволяет до 10% экономить время подготовки и выгрузки балласта в «окно», а также может быть использована для дистанционного управления разгрузочными крышками на других грузовых вагонов. Однако разработка системы шла для хоппер-дозатора ВПМ 770. Эксплуатируемая на хоппер-дозаторах ЦНИИ ДВЗ М и ВПМ 770, система управления пневмоприводом хоппер-дозатора приведена на рисунках 4.1 и 4.2.

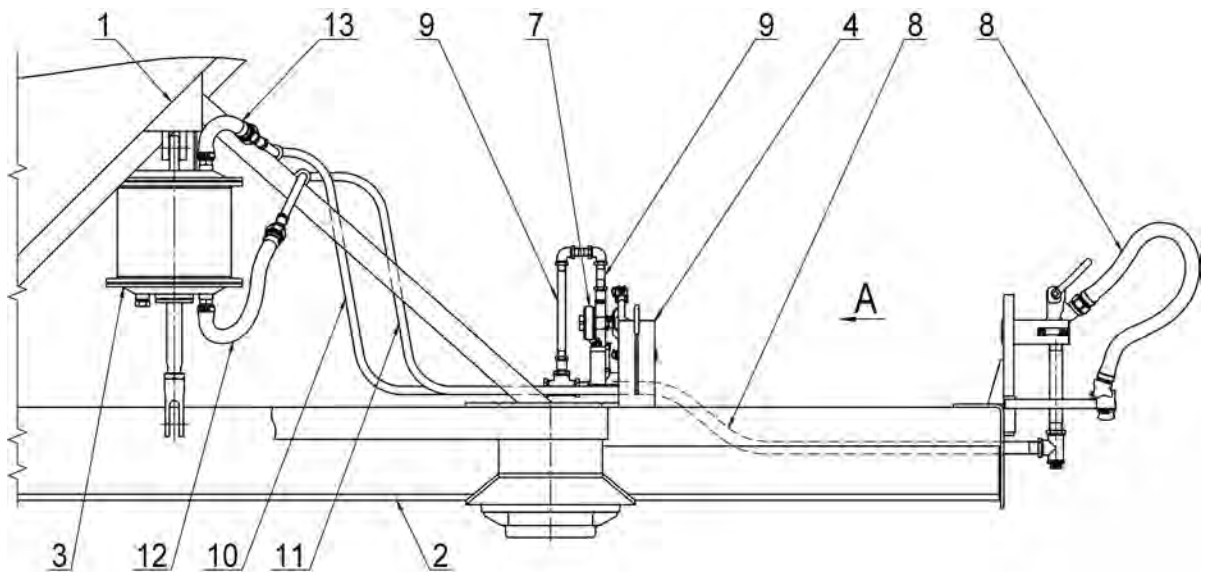


Рисунок 4.1. Схема механического управления пневмоприводом хоппер-дозатора.

1—кузов; 2—рама; 3—пневмопривод (пневмоцилиндр); 4—щиток управления; 7—кран распределительный; 8—пневмомагистраль; 9—трубопровод питающий; 10 и 11—трубопроводы; 12 и 13 — соединительные рукава.

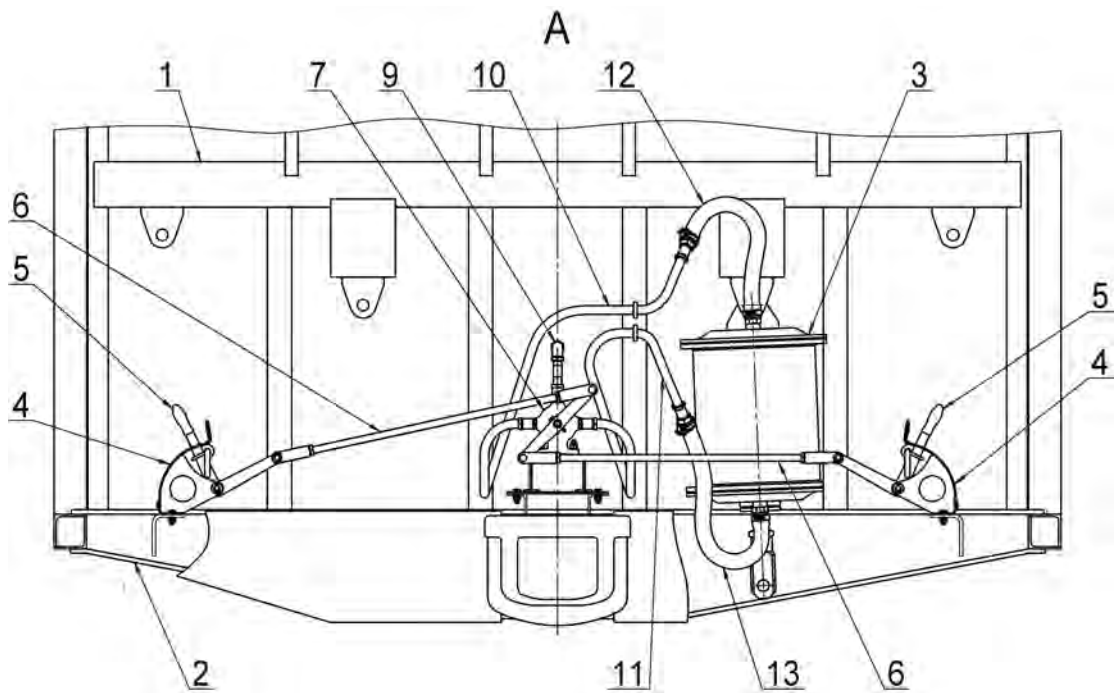


Рисунок 4.2. Схема ручного механического управления пневмоприводом хоппер-дозатора (вид А).

- 1- кузов; 2 – рама; 3–пневмопривод (пневмоцилиндр); 4–щиток управления; 5 – рукоятка управления; 6–тяга; 7–кран распределительный; 9–трубопровод питающий; 10, 11 -трубопроводы; 12 и 13 – соединительные рукава.

Применение этой схемы для реализации проекта дистанционного автоматического управления крышками разгрузочных люков хоппер-дозатора технически невозможно и требует переработки системы. Необходимо разработать схему пневмопривода, обеспечивающую дистанционное открытие и закрытие крышек разгрузочных люков.

4.2.2. Разработка привода дистанционного автоматического управления крышками разгрузочных люков хоппер-дозатора ВПМ 770

Основным недостатком зарубежных аналогов дистанционного управления крышками разгрузочных люков является отсутствие возможности независимого управления полостями пневмоцилиндра, что для обеспечения выполнения технологических процессов выгрузки и укладки балласта в технологии планово-предупредительной выправки пути является необходимым условием.

Предлагается: привод перемещения крышки люка хоппер-дозатора кинематически связать с крышкой пневмоцилиндр, полости которого сообщены с пневмомагистралью трубопроводами через дистанционно управляемого клапанного распределительного устройства с возможностью независимого управления каждым клапаном и независимого сообщения полостей пневмоцилиндра с пневмомагистралью или с атмосферой. Разработанная пневмосхема дистанционного управления разгрузочными крышками хоппер-дозатора ВПМ 770 приведена на рисунке 4.3, имеет принципиальные отличия от существующего ручного механического управления пневмоприводом хоппер-дозатора (Рисунок 4.1 и 4.2) и зарубежных аналогов и запатентована [].

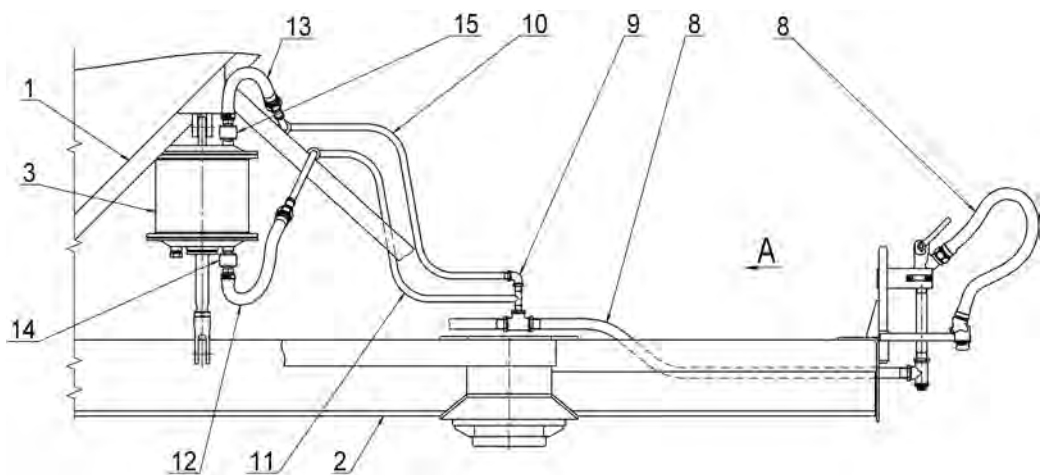


Рисунок 4.3. Схема радио или электроуправления пневмоприводом хоппер-дозатора.

1- кузов; 2-рама; 3-пневмопривод (пневмоцилиндр); 8- пневмомагистраль; 9- трубопровод питающий; 10 и 11-трубопроводы; 12 и 13 – соединительные рукава; 14 и 15 – пневмоклапан с электроуправлением.

На кузове хоппер-дозатора 1 (здесь и далее Рисунок 4.3), установленного на раме 2 крепится пневмоцилиндр 3, включенный в общую схему пневмопривода, состоящего из пневмомагистрали 8 с трубопроводами, питающим 9, поршневой полости 10 и штоковой полости 11 и соединительными рукавами 12 и 13. Клапан состоит из полого корпуса, в котором установлен подпружиненный золотник,

взаимодействующий с катушкой электромагнита. Таким образом, привод крышки люка хоппер-дозатора состоит из кинематически связанного с крышкой люка пневмоцилиндра 3, полости которого сообщаются с пневмомагистралью 8 трубопроводами 10 и 11 посредством дистанционно управляемого клапанного распределительного устройства 14 и 15. Распределительное устройство соединено с блоком управления. Причем независимое управление каждым клапаном для отдельного сообщения полостей пневмоцилиндра с пневмомагистралью или с атмосферой. Корпус клапана установлен на крышке пневмоцилиндра.

В каждой крышке пневмоцилиндра высверливается отверстие, которое совмещается с отверстием корпуса клапана. Для автоматического управления приводами крышек люков из кабины машиниста или с пульта управления вне состава блок управления связан с приводом каналами электрической или радио связи. Блок управления может быть совмещен с компьютером. Привод перемещения крышки люка работает следующим образом. В закрытом положении крышки люка электромагниты обесточены. Золотники находятся в исходном положении, трубопроводы 4, 5 перекрыты золотниками клапанов, а полости 2 и 3 пневмоцилиндра сообщены с атмосферой. При подаче напряжения на электромагнит катушки 11 клапана, установленного в трубопроводе 4, электромагнит клапана, установленного в трубопроводе 5 обесточен.

Перемещением золотника клапан сообщает одну из полостей пневмоцилиндра с пневмомагистралью для перемещения штока пневмоцилиндра и перемещения крышки, при этом другая полость пневмоцилиндра сообщается с атмосферой через другой клапан. При использовании предлагаемого привода упрощается управление приводом и обслуживание привода за счет независимой работы клапанов. Эта технология упрощает управление приводом и обслуживание его за счет независимой работы клапанов, при этом не менее чем на 10 минут сокращает время выгрузки щебня в «окно» и исключает применение дефицитных распределительных трехходовых кранов.

В порядке эксперимента на одном из серийных хоппер-дозаторов ВПМ 770 было установлено устройство дистанционного управления крышками

разгрузочных люков, которое подтвердило работоспособность устройства. Предложение имеет научную новизну, защищенную патентом на изобретение []. Соответствующие изменения были внесены в проект 770.00.000 хоппер-дозатора ВПМ 770 и в частности, переделана схема пневмопривода. Для серийного производства хоппер-дозаторов с дистанционным управлением крышками разгрузочных люков были разработаны технические требования к пневмосистеме управления разгрузкой хоппер-дозаторов модели ВПМ 770. Однако для дальнейшей практической реализации предложения необходимо усовершенствовать крышку разгрузочного люка.

4.2.3. Разработка усовершенствованной конструкции крышки управления выгрузкой балласта

Проведенный анализ эксплуатации хоппер-дозаторов ВПМ 770 на железных дорогах ОАО РЖД показал, что крышка разгрузочного люка серийного хоппер-дозатора, применима для автоматизированной системы управления технологическим процессом выгрузки и укладки балласта в путь, однако обладает недостаточной жесткостью и деформируется в процессе перевозки материала и при прерывании выгрузки.

Впервые предлагается усовершенствованная конструкция крышки разгрузочного люка вагона-хоппера, в виде изогнутого частью цилиндра листа с ребрами жесткости, вогнутой стороной перекрывающая кромки разгрузочного люка, с боковинами через которые проходит приводной вал. Каждая боковина снабжена втулкой со шпоночным пазом для установки в последний шпонки приводного вала. Ось приводного вала параллельна или совпадает с плоскостью симметрии изогнутого листа крышки и ориентирована вдоль оси вагона-хоппера. Каждое ребро жесткости выполнено из профиля, одна из граней которого, соединена с пластиной, жестко закрепленной на кромке изогнутого листа с возможностью рассекания потока разгружаемого материала прямолинейной кромкой изогнутого листа и кромкой пластины. Внешняя сторона пластины крышки образует с касательной к внутренней поверхности или с внутренней

поверхностью изогнутого листа острый угол, который может быть равен 5° - 30° . Каждая крышка снабжена закрепленным на валу рычагом, связанным с пневмоцилиндром. Пневмоцилиндр сообщен с пневмомагистралью вагона-хоппера и снабжен системой управления. На рисунке 4.4 приведена рисунок конструкции предлагаемой крышки.

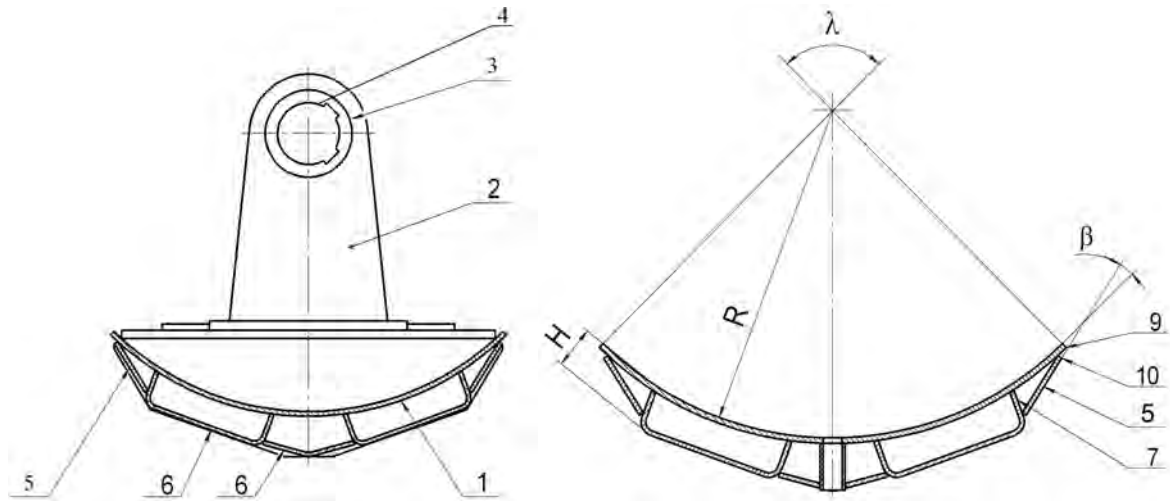


Рисунок 4.4. Конструкция усовершенствованной крышки

1- изогнутый лист; 2-боковины; 3 – втулка боковины, она охватывает вал – 4; 5- пластина; 6 –ребра жесткости из профиля высотой Н; 7 –границы профиля; 9- прямолинейная кромка изогнутого листа; 10-прямолинейная кромка пластины

Итак, каждая крышка разгрузочного люка содержит изогнутый лист 1, выполненный с возможностью герметичного контакта вогнутой стороной с кромками разгрузочного люка, и соединенные с противолежащими изогнутыми кромками изогнутого листа боковины 2, на которых жестко закреплен приводной вал 4. На противоположной вогнутой стороне изогнутого листа расположены ребра 6 жесткости. Каждое ребро 6 жесткости выполнено из профиля, высота которого равна. Профиль может быть выполнен в виде швеллера, в виде уголка, прямоугольным, квадратным, круглым и другим. Одна из граней 7 каждого профиля, обращенная к прямолинейной кромке изогнутого листа, соединена с пластиной 5, которая жестко закреплена на прямолинейной кромке 9 изогнутого листа с возможностью рассекания потока разгружаемого материала

прямолинейной кромкой изогнутого листа и кромкой 10 пластины. Внешняя сторона пластины 5 образует с касательной к внутренней поверхности или с внутренней поверхностью, или с кромкой внутренней поверхности изогнутого листа 1 острый угол β , который может быть равен $5^\circ - 30^\circ$ и должен обеспечивать наименьшее сопротивление, при рассекании струи высыпаемого из вагона материала в процессе закрытия крышки. При выполнении угла меньше 5° снижается жесткость крышки и вагона-хоппера, поскольку для получения плавного внешнего контура крышки необходимо уменьшать высоту ребра. При увеличении угла больше 30° увеличивается вес крышки и вагона-хоппера. Каждая боковина 2 снабжена втулкой 3 со шпоночным пазом для установки в шпоночный паз шпонки приводного вала. Ось приводного вала параллельна или совпадает с плоскостью симметрии изогнутого листа 13 крышки разгрузочного люка и ориентирована вдоль оси вагона-хоппера. На предлагаемую конструкцию получены патенты (см. приложение к главе 4 [201,202]).

Для расчета крышки на работоспособность в условиях реальной эксплуатации автоматизированной системы управления технологическим процессом выгрузки и укладки балласта были приняты допущения и условия: хоппер полностью загружен гранитным щебнем; наиболее неблагоприятное воздействия на крышку и вал момент открытия проема разгрузочного люка, с одновременным воздействием изгибающего момента от силы давления веса столба щебня, и крутящего момента на валу и крышке от действия пневмоцилиндра; одновременная деформация изгиба и кручения в поперечном сечении крышки; за основу четвертую гипотезу прочности [203]. Проведенные из этих условий расчеты подтвердили, что вал механизма привода крышки имеет запас прочности в 1,4 раза. Обоснование высоты загрузки щебня определяется из условия перекрытия проема разгрузочного люка крышкой при полностью загруженном хоппер-дозаторе из условия выполнения системы неравенств:

$$2 \cdot (\gamma \cdot V + m_d) \cdot g \leq 2P \quad (4.1)$$

$$(\gamma \cdot V + m_d) \cdot g \leq P$$

где: γ – насыпная плотность щебня, кг/м³; V – объем щебня, м³; m_d – масса дозатора, кг; P – усилие, развиваемое пневмоцилиндром привода дозатора в Н;

Объем выгружаемого через разгрузочное отверстие щебня V определяется как

$$V = B \cdot L \cdot h,$$

где h – высота столба щебня; B и L соответственно ширина и длина проема разгрузочного люка.

Возможность перекрытия проема разгрузочного люка крышкой полностью груженного хоппер-дозатора определяются из решения системы уравнения (4.1):

$$(\gamma \cdot B \cdot L \cdot h + m_d) \cdot g \leq P, \quad (4.2)$$

а максимально возможная высота загрузки (столба) щебня в хоппер-дозаторе h :

$$h \leq \frac{\frac{P}{g} - m_d}{\gamma \cdot B \cdot L}; \quad (4.3)$$

Проведенные для ВПМ 770 расчеты подтвердили, что высота столба щебня не может быть более чем 3,2 метра.

4.3. Классификация способов синхронизации управления выгрузкой балласта из хоппер-дозатора и выбор наиболее эффективного способа

4.3.1. Классификация способов синхронизации. Для совместной работы хоппер-дозатора ВПМ 770 и машины ВПР с микропроцессорной системой выправки и рихтовки с точной привязкой по месту расположения дефекта (выплеска) подсыпки балласта в заданном алгоритмом объеме балласта необходимо обеспечить синхронизацию по времени, перемещению, фазе, скорости движений не менее двух устройств. Способы синхронизации могут быть реализованы на примере различных схем гидропривода [204,205]. Под синхронностью будем понимать одновременность прихода выходных элементов гидродвигателей в заданное положение. Тогда разница в координатах определит степень синхронизации. Скорости выходных валов гидродвигателей будем синхронизировать путем синхронизации расходов воздуха, подающих в полости

гидродвигателей [207]. На основе проведенного выше анализа схем гидроприводов составим классификацию способов синхронизации в зависимости от целей решения практических задач. Классификация способов синхронизации приводов управления основана на общих понятиях классификации и может быть представлена в виде схемы, приведенной на рисунке 4.5. Анализ схем синхронизации приведен на рисунке 4.6. рассмотрим наиболее применяемые схемы.

4.3.2. Схема гидропривода с дроссельным способом синхронизации обеспечивает возможность синхронизации за счет равенства проводимостей дросселей и минимальным разбросом нагрузок между гидравлическими устройствами и тем самым равенством расходов рабочих жидкостей (см. Рисунок 4.6.а). Насос 1 из бака 2 подает рабочую жидкость в поршневые полости гидроцилиндров 4, 5 через дроссели 6 и 7 с давлением, регулируемым на выходе насоса предохранительным клапаном 3. Расходы через дроссели 6, 7 определяются давлением на входе и давлениями в поршневых полостях гидроцилиндров 4, 5.

4.3.3. Способ синхронизации регулятором потока позволяет применять схему при значительных разбросах нагрузок между устройствами. Рабочая жидкость от насоса (Рисунок 4.6.б) подаётся в поршневые полости гидроцилиндров 4, 5 через дроссели 6, 7, перепад давлений на которых поддерживается регуляторами 8, 9, что позволяет поддерживать постоянный перепад на дросселе.

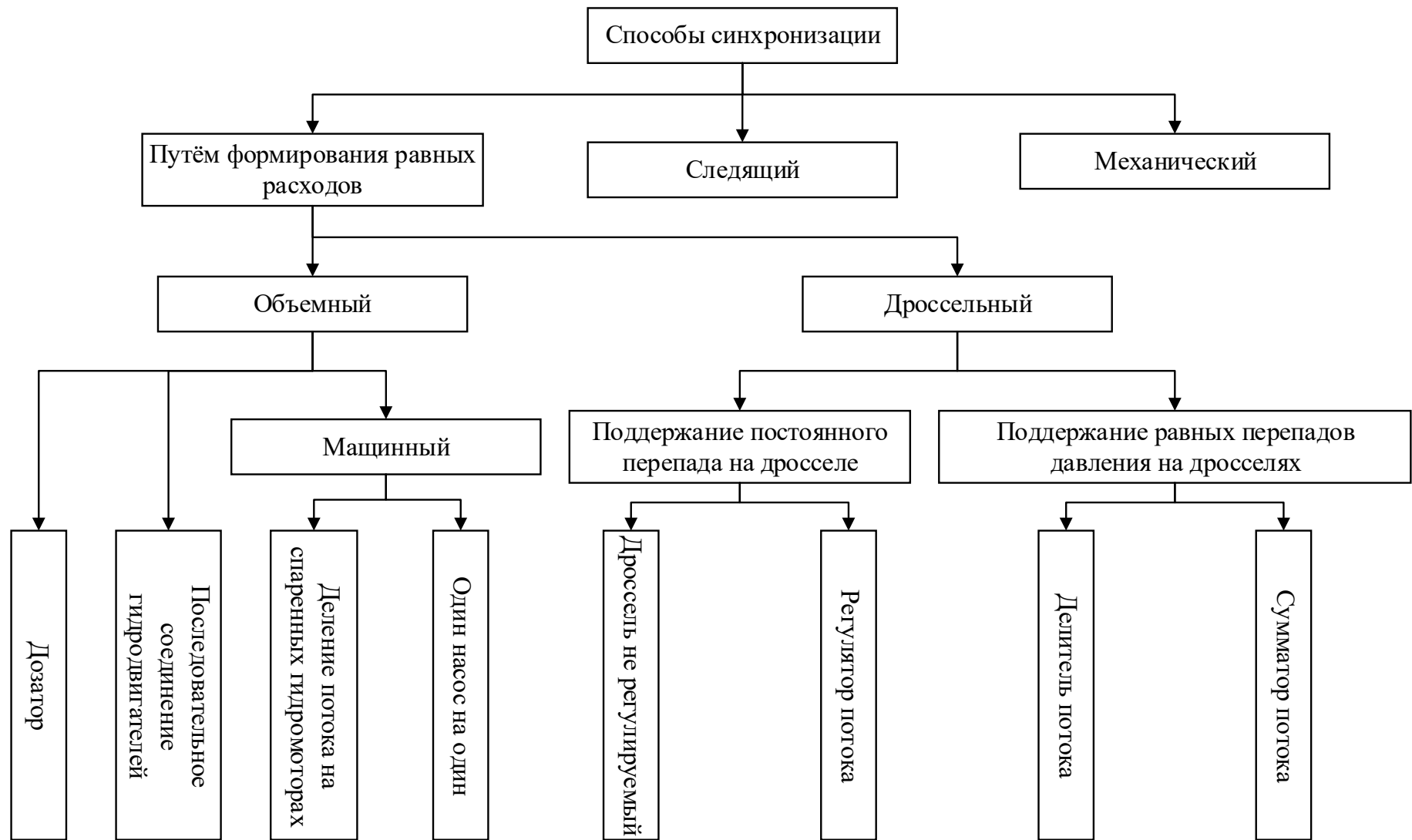


Рисунок 4.5. Классификация способов синхронизации объектов управления

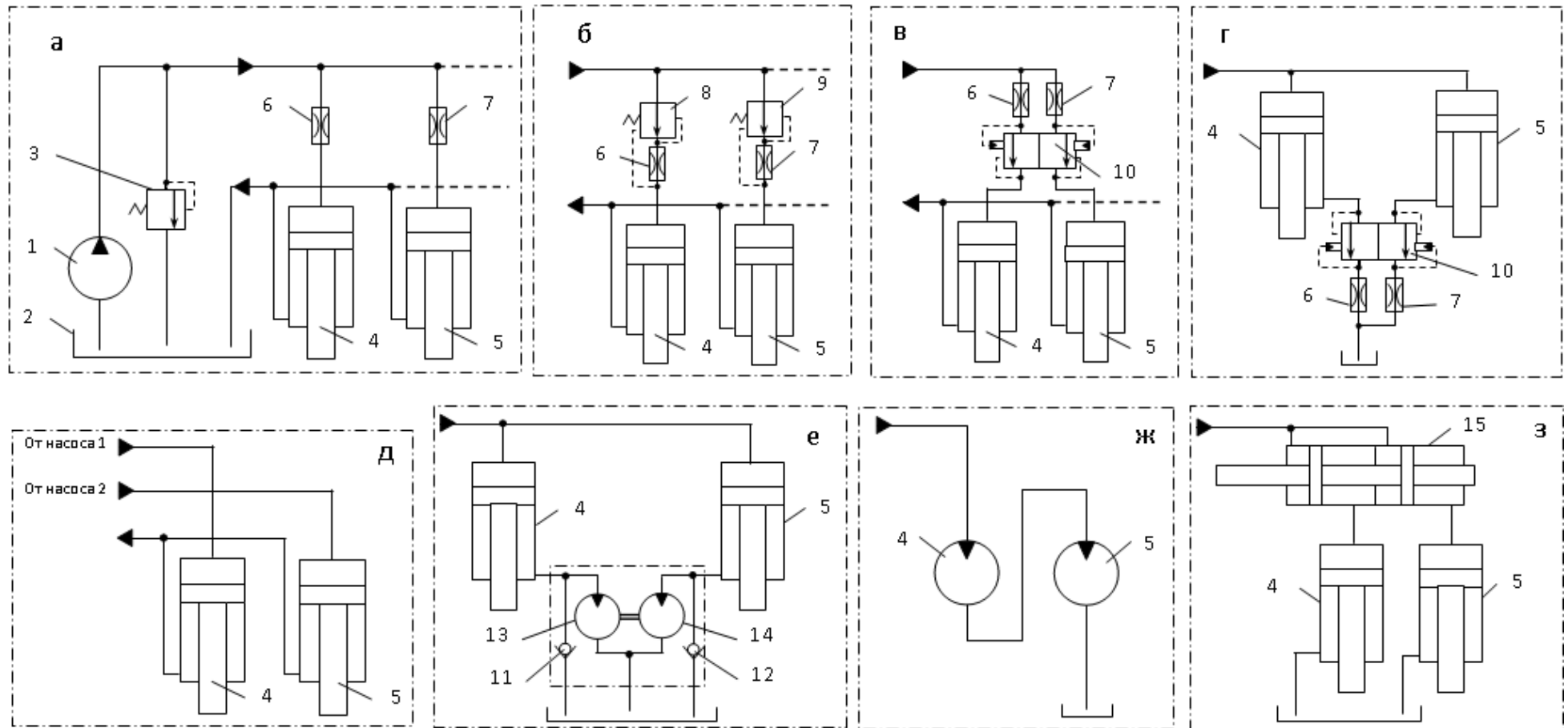


Рисунок 4.6. Схемы синхронизации элементов

а - постоянными дросселями; б - регуляторами потока; в - делителем потока; г - сумматором потока; д - общим приводом отдельных насосов; е - спаренными гидромоторами; ж - последовательным соединением гидродвигателей; з – дозатором.

1-Насос; 2- бак, 3-клапан предохранительный; 4, 5-гидродомкрат (гидроцилиндр, гидромотор); 6, 7-дроссель; 8, 9, 10-регулирующий элемент; 11, 12-обратный клапан; 13, 14-гидромоторы синхронизаторы, 15-дозатор

4.3.4. Способ синхронизации делителем потока основан на обеспечении равенства расходов рабочей жидкости (Рисунок 4.6.в). Запорный элемент делителя потока 10 (золотник) обеспечивает равенство перепадов давления на дросселях 6 и 7, запитываемых от общей сети, независимо от приложенной к гидроцилиндру 4 нагрузки. При приложении нагрузки к гидроцилиндру 4, золотник 10 сместится вправо, увеличивая суммарное гидравлическое сопротивление на входе в менее нагруженный гидроцилиндр 5. Новое равновесное положение золотника 10 возможно при равенстве давлений под торцами, что соответствует равенству перепадов давлений на дросселях 6 и 7. Равенство перепадов давлений обеспечивает равенство расходов, поступающих в поршневые полости гидроцилиндров 4 и 5.

4.3.5. Способ синхронизации сумматором потока обеспечивается равенством перепадов давления как показано на Рисунок 4.6.г. Рабочая жидкость из штоковых полостей сливается в бак через дроссели 6 и 7. Равенство перепадов на дросселях обеспечивается смещением золотника 10, что позволяет поддерживать равенство расходов рабочей жидкости из штоковых полостей и тем самым синхронизацию скоростей движения штоков гидроцилиндров 4 и 5.

4.3.6. Машинный способ синхронизации имеет наибольший КПД, давление на выходе насосов определяется нагрузкой и ограничивается настройкой предохранительных клапанов (рис 4.6.д). Насос 1 подает рабочую жидкость в поршневую полость гидроцилиндра 4, а насос 2 - в поршневую полость гидроцилиндра 5.

4.6.7. Способ синхронизации спаренными гидромоторами (см. Рисунок 4.6.е). Рабочая жидкость, из штоковых полостей гидроцилиндров 4 и 5 сливается через гидромоторы 13 и 14, валы которых соединены между собой. При равенстве рабочих объемов гидромоторов 13 и 14 обеспечивается равенство расходов рабочей жидкости из штоковых полостей и тем самым синхронность движения штоков гидроцилиндров.

4.3.8. Последовательным соединением гидроцилиндров или гидромоторов, показана на Рисунок 4.6.ж. Насос подает рабочую жидкость на

вход гидромотора 4. Выход гидромотора 4 сообщён с входом гидромотора 5, а уже выход гидромотора 5 сообщён с баком. Давление на входе гидромотора 4 определяется суммой нагрузок, приведенных к валам гидромоторов 4 и 5.

4.3.9. Схема синхронизации дозатором приведена на Рисунок 4.6.3. Насос подает рабочую жидкость в левые полости каждой секции дозатора 15. Из правых полостей секций дозатора 15 рабочая жидкость подается в соответствующую поршневую полость гидроцилиндра 4 и 5. Как показал анализ наиболее адекватным для решения поставленных в исследовании задач является схема применения насосной установки с регулируемым насосом.

4.4. Синхронизации управлением выгрузкой и укладкой балласта хоппер-дозаторами ВПМ 770 с рабочими органами машины типа ВПР

Исследования проектирования насосных установок с регулируемым насосом (здесь и далее НС с РН), показывает, что частота резонансных колебаний давления на выходе источника НС с РН находится в полосе рабочих частот гидропривода, так как возмущающее воздействие со стороны потребителей на источник НС с РН проходит через нелинейность типа «модуль», обладающую свойством удвоения частоты. Возмущающее воздействие на источник НС с РН потребляет расход $Q(t)$, при этом давление $P_n(t)$ на выходе будет изменяться и оказывать воздействие на гидропривод.

Пусть $Q(t)$ изменяется по закону $Q(t) = A_Q \sin(\omega t)$, тогда давление $P_n(t)$ в режиме установившихся вынужденных колебаний будет изменяться по закону $P_n(t) = A_p \sin(\omega t + \varphi)$. Отношение амплитуды A_p к A_Q определяется модулем частотной характеристики источника гидропитания

$$\frac{A_p}{A_Q} = |W_{\text{er}}(j\omega)| = \left| \frac{W_o(j\omega)}{1 + W_o(j\omega)W_p(j\omega)} \right|, \quad (4.4)$$

где $W_o(j\omega)$, $W_p(j\omega)$ - частотные характеристики регулируемого объекта и регулятора давления.

В статических режимах при $\omega=0$ и $0 < Q(t) < Q_m$ давление на выходе насоса должно находиться в пределах $P_n - P_{nn} \leq [\delta_c] P_{nm}$, где $[\delta_c]$ – коэффициент, характеризующий точность поддержания давления в статике, тогда

$$2A_p = \left| \frac{W_o(j0)}{1 + W_o(j0)W_p(j0)} \right| Q_m \leq [\delta_c] p_{nm}. \quad (4.5)$$

В динамических режимах при изменении потребляемого расхода с амплитудой $A_Q \leq [A_Q]$ где $[A_Q]$ – допустимая амплитуда колебаний расхода, давление на выходе источника НС с РН должно изменяться в пределах, не превышающих $[\delta_d] p_{nm}$:

$$2A_p = 2 \left| \frac{W_o(j\omega)}{1 + W_o(j\omega)W_p(j\omega)} \right| [A_Q] \leq [\delta_c] p_{nm}. \quad (4.6)$$

Введем обозначение:

$$r_\phi = 2 [A_Q] ([\delta_d] p_{nm})^{-1} \quad (4.7)$$

тогда задача выбора параметров передаточных функций регуляторов давления заключается в следующем: необходимо подобрать передаточную функцию РД $W_p(p)$ таким образом, чтобы максимум модуля частотной характеристики источника гидропитания не превышал r_ϕ^{-1} :

$$\sup_{\omega \in \{0, \infty\}} |W_{un}(j\omega)| \leq r_\phi^{-1} \quad (4.8)$$

в безразмерных координатах $\overline{p}_n = p_n p_{nm}; \overline{Q} = Q Q_{nm}^{-1}; \dots$ и т.д. Разделив числитель и знаменатель левой части (6.5) на $W_o(j\omega)$, получим:

$$\left| [W_o^{-1}(j\omega) + W_p(j\omega)]^{-1} \right| = r_\phi \quad (4.9)$$

Делая подстановку

$$\begin{aligned} W_o^{-1}(j\omega) &= a(\omega) + jb(\omega); \\ W_p(j\omega) &= U(\omega) + jV(\omega) \end{aligned}$$

в (6.6), получим:

$$[U(\omega) + a(\omega)]^2 + [V(\omega) + b(\omega)]^2 = r_\phi^2 \quad (4.10)$$

Для фиксированного значения частоты $\omega = \omega_i$ (4.10) есть уравнение окружности на комплексной плоскости с радиусом r_ϕ и с центром, смещенным

относительно начала координат в точку $\{-a(\omega_i), -b(\omega_i)\}$ (Рисунок 4.7.). На этой же плоскости строим вектор $\overline{W}_p(j\omega_i)$, соответствующий частоте $\omega = \omega_i$. Из Рисунок 4.7. следует: для того, чтобы удовлетворить условию (4.8.) необходимо и достаточно, чтобы конец вектора $\overline{W}_p(j\omega_i)$ не находился внутри окружности радиуса r_ϕ . [205]. Для другой частоты $\omega = \omega_n$, $\omega_n \neq \omega_i$ будем иметь окружность того же радиуса r_ϕ , но с центром, расположенным в точке $\{-a(\omega_n), -b(\omega_n)\}$. При изменении ω от 0 до ∞ след центра окружности будет представлять собой ни что иное, как годограф вектора $\overline{W}_o^{-1}(j\omega)$ повернутого на 2π радиан, то есть годограф вектора $-\overline{W}_o^{-1}(j\omega)$. Часть комплексной плоскости, ограниченную окружностью радиуса r_ϕ с центром в точке $\{-a(\omega), -b(\omega)\}$ назовем запретной областью r_ϕ для частоты ω . Тогда порядок выбора параметров передаточной функции РД будет заключаться в том, что вначале на комплексной плоскости строят амплитудно-фазочастотную характеристику (АФЧХ) $-\overline{W}_o^{-1}(j\omega)$, а затем подбирают АФЧХ регулятора давления $Wp(j\omega)$ так, чтобы для каждой частоты соответствующая ей точка находилась вне запретной области r_ϕ для этой же частоты.

На первом этапе отобразим на логарифмическую плоскость не саму окружность r_ϕ , а некоторую фигуру АВСД, описывающую окружность r_ϕ и образованную в результате пересечения лучей ОА и ОВ с окружностями радиусов R_1 и R_2 с центром в начале координат (Рисунок 4.7.). Причем лучи и окружности касаются окружности r_ϕ и образуют область шире запретной области r_ϕ за счет присоединения дополнительных участков, заштрихованных на рисунке 4.7. Тогда радиусы R_1 и R_2 ограничивают модуль, а лучи ОА и ОВ ограничивают фазу частотной характеристики. Зная $L[-\overline{W}_o^{-1}(j\omega)]$ и $\arg[-\overline{W}_o^{-1}(j\omega)]$ регулируемого объекта и задаваясь значением r_ϕ на ЛАЧХ и ЛФЧХ строят границы запретных областей (рисунок 4.8.) по следующим формулам:

$$\begin{aligned}
L_b &= 20 \lg [|W_o^{-1}(j\omega)| + r_\phi]; \\
L_n &= 20 \lg [|W_o^{-1}(j\omega)| - r_\phi]; \\
\gamma_b &= \arg [-W_o^{-1}(j\omega)] + \arcsin r_\phi |W_o^{-1}(j\omega)|^{-1}; \\
\gamma_n &= \arg [-W_o^{-1}(j\omega)] - \arcsin r_\phi |W_o^{-1}(j\omega)|^{-1}.
\end{aligned}
\tag{4.11}$$

Полученные таким образом запретные области назовем запретными областями r_ϕ для модуля и для фазы, соответственно. Учитывая вышесказанное можно сформулировать следующее условие: для того, чтобы источник НС с РН был устойчив и удовлетворял условию (4.8) достаточно, чтобы ЛАЧХ и ЛФЧХ регулятора давления не находились одновременно в запретных областях r_ϕ для модуля и фазы, соответственно. То есть, если в диапазоне частот $\{\omega_c, \omega_d\}$ когда $L|W_p(j\omega)|$ находится в запретной области r_ϕ для модуля, а $\arg W_p(j\omega)$ находится вне запретной области r_ϕ для фазы, то для $|W_{un}^{-1}(j\omega)|$ будет выполняться условие $\min |W_{un}^{-1}(j\omega)| \geq r_\phi$, а для передаточной функции источника НС с РН $\sup_{\omega \in \{0, \infty\}} |W_{un}(j\omega)| \leq r_\phi^{-1}$. Это означает, что, если построить уточненную $L|W_{un}^{-1}(j\omega)|$ (на рисунке 4.7. показана штрих пунктирной линией), то все точки ее будут расположены выше прямой, параллельной оси частот с ординатой $20 \lg r_\phi$.

Предложенный способ позволяет следить за изменением характеристики $L|W_{un}^{-1}(j\omega)|$ при изменении характеристики регулятора давления, даже если регулируемый объект описывается сложной частотной характеристикой, например, в распределенных параметрах, и подбирать $W_p(j\omega)$ так, чтобы обеспечить безусловное выполнение условия (4.8). Выше сформулированное условие является условием достаточным, так как на логарифмическую плоскость была отображена описывающая окружность r_ϕ фигура ABCD, поэтому в диапазоне частот, когда $L|W_p(j\omega)|$ находится в запретной области r_ϕ по модулю, следует уточнить запретную область r_ϕ по фазе [203,205].

Возьмем на окружности r_ϕ (рисунок 4.7) произвольную точку Е и из начала координат проведем в нее вектор с модулем R . Угол γ образованный этим вектором и вектором, проведенным из начала координат в точку O_i (центр

окружности r_ϕ) с модулем R_o , является запасом по фазе при заданном r_ϕ для регулятора давлений, у которого частотная характеристика $W_p(j\omega)$ касается окружности r_ϕ в точке Ж. Тогда по теореме косинусов из треугольника ОЖО₁

$$\cos \gamma = \frac{R^2 + R_o^2 - r_\phi^2}{2RR_o} \quad (4.12)$$

Учитывая, что:

$$R = |W_p(j\omega)|; R_o = |-W_o^{-1}(j\omega)|,$$

$$\text{Получим: } \cos \gamma = \frac{|W_p(j\omega)|^2 + |W_o^{-1}(j\omega)|^2 - r_\phi^2}{2|W_p(j\omega)||W_o^{-1}(j\omega)|} \quad (4.13)$$

На рисунке 4.7 показана уточненная запретная область r_ϕ по фазе (показано двойной штриховкой). В исследованиях автоматических систем используется показатель колебательности M , поэтому представляется целесообразным установить связь между r_ϕ и M . По определению применительно к источникам НС с РН:

$$M = \sup_{\omega \in \{0, \infty\}} \left| \frac{W_o(j\omega)W_p(j\omega)}{1 + W_o(j\omega)W_p(j\omega)} \right| \quad (4.14)$$

Деляя подстановку

$$W_o^{-1}(j\omega) = a(\omega) + jb(\omega); W_p(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega), \quad (4.15)$$

получим

$$\left[U(\omega) + \frac{M^2}{M^2 - 1} a(\omega) \right]^2 + \left[V(\omega) + \frac{M^2}{M^2 - 1} b(\omega) \right]^2 = \frac{M^2}{(M^2 - 1)^2} |W_o^{-1}(j\omega)|^2 \quad (4.16)$$

Последнее выражение для ω_i представляет собой уравнение окружности на комплексной плоскости с радиусом:

$$r_M = M(M^2 - 1)^{-1} |W_o^{-1}(j\omega)| \quad (4.17)$$

и центром, смещенным относительно начала координат в точку с координатами

$$\{-M^2 a(\omega)(M^2 - 1)^{-1}, -M^2 b(\omega)(M^2 - 1)^{-1}\} \quad (4.18)$$

Отобразив запретную область на логарифмическую плоскость вышеизложенным способом, получим выражение для верхних и нижних границ запретных областей r_m по модулю и фазе:

$$\begin{aligned} L_b^M &= L |W_O^{-1}(j\omega)| + 20 \lg M(M-1)^{-1}; \\ L_n^M &= L |W_O^{-1}(j\omega)| - 20 \lg M(M-1)^{-1}; \\ \varphi_b^M &= \arg[-W_O^{-1}(j\omega)] + \arcsin M^{-1}; \\ \varphi_n^M &= \arg[-W_O^{-1}(j\omega) - \arcsin M^{-1}] \end{aligned} \quad (4.19)$$

Сравнивая (4.17) и (4.19) получим, что с увеличением частоты запретная область r_ϕ сужается как по модулю, так и по фазе, а запретная область r_m от частоты не зависит. Границы запретных областей пересекаются в точках С и D (рисунок 4.8), но так как для точки С выполняется условие [205]:

$$(M-1)r_\phi = |W_O^{-1}(j\omega_c)| \quad (4.20)$$

Тогда расстояние от оси частот до точки С равно $\overline{\omega_c C} = 20 \lg Mr_\phi$. Соответственно для точки D выполняется условие $(M+1)r_\phi = |-W_O^{-1}(j\omega_d)|$, следовательно, расстояние от оси частот до точки D равно $\overline{\omega_d D} = 20 \lg Mr_\phi$.

Таким образом точки С и D одинаково удалены от оси частот, а ординаты этих точек равны $20 \lg R = 20 \lg Mr_\phi$. (Если $r_\phi = 1$, то расстояние от оси частот до прямой CD равно показателю колебательности М). Полученные соотношения устанавливают количественную связь между r_ϕ и М для каждого конкретного вида передаточной функции регулятора давления.

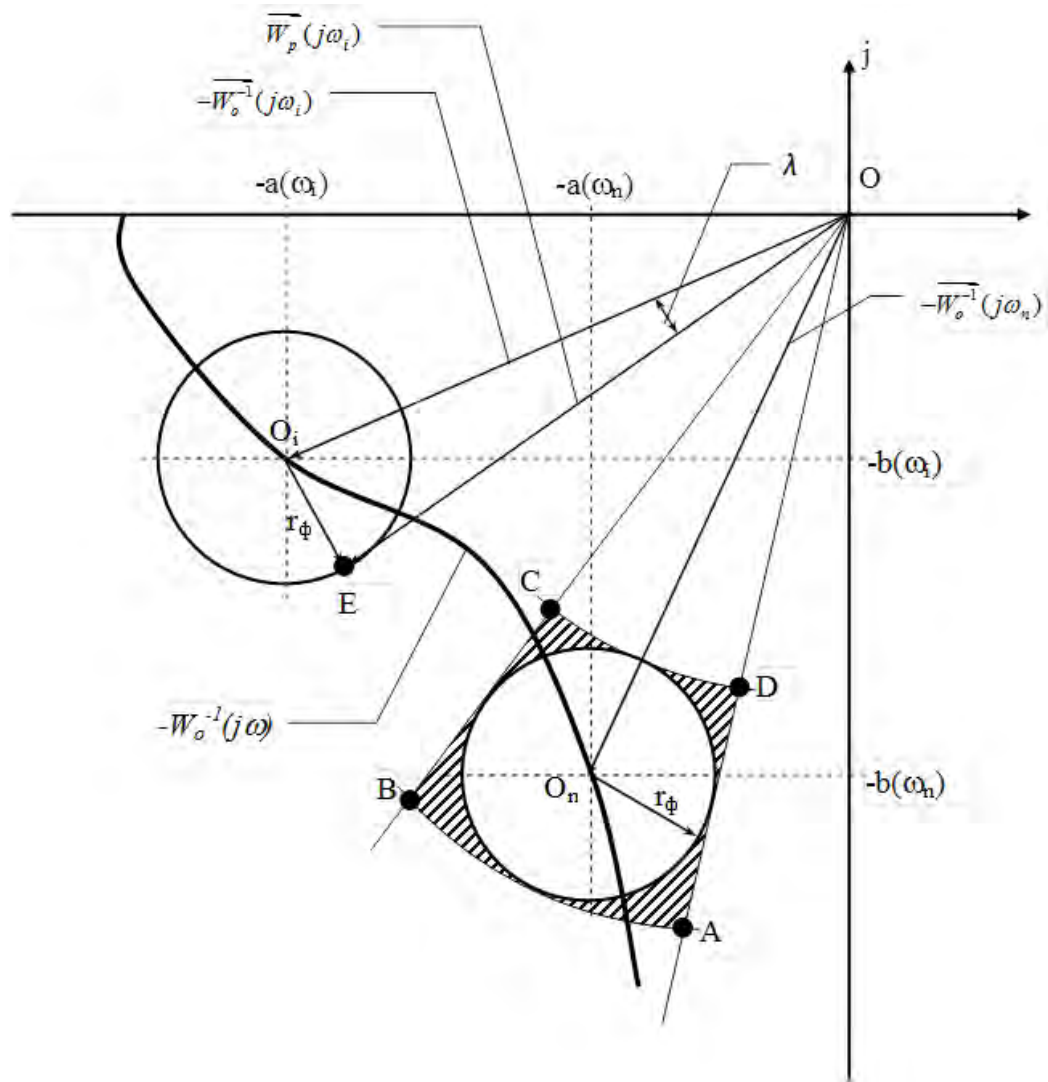


Рисунок 4.7. АФЧХ объекта регулирования (напорная линия гидросистемы) и запретная область r_ϕ .

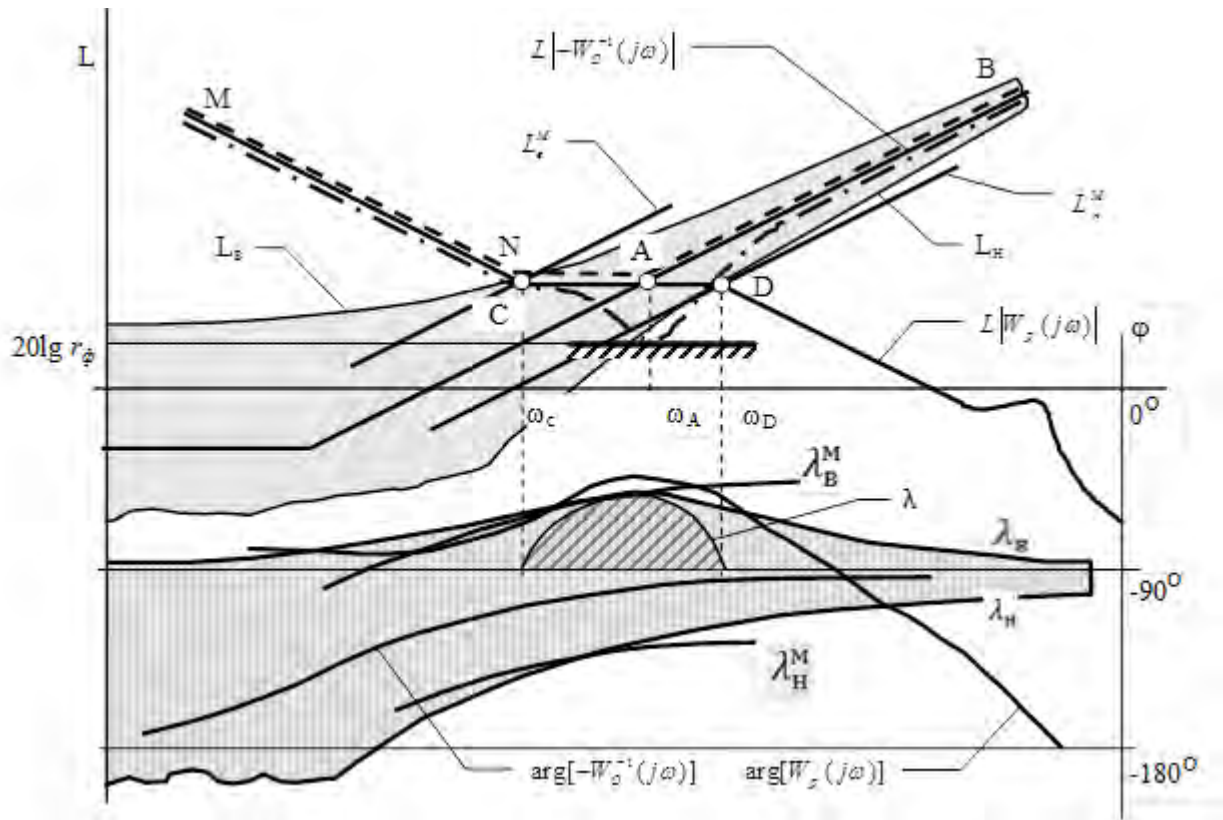


Рисунок 4.8. Построение обратной ЛАЧХ и ФЧХ насосной установки с регулируемым насосом.

4.5. Разработка технических требований к конструкции системы управления разгрузочно-дозировующим механизмом

Системы дистанционного управления разгрузочными устройствами подвижного состава железных дорог для практического применения разрабатываются впервые. Однако для дистанционного управления подвижными объектами и в частности, локомотивами такая система была разработана во ВНИИАС на уровне изобретений [208,209]. Предлагаемая система дистанционного управления пневматическими цилиндрами хоппер-дозаторов моделей ВПМ-770 и ВПМ-770ПГ состоит из блоков управления (БУ) установленных на каждом вагоне, стационарных пультов управления, установленных с двух сторон каждого вагона, переносного пульта управления (ППУ) и опционально дополнительного пульта управления (ДПУ). ППУ и ДПУ управляют работой БУ по радиоканалу. Конструкция системы должна

обеспечивать её работоспособность в условиях радиопомех от контактной сети в радиусе 300 м [210,211].

Блок управления должен размещаться на стационарно вагоне. Блок управления должен принимать радиосигналы от пультов управления и управлять соответствующими электромагнитными клапанами, установленными на вагоне (6 шт. для ВПМ-770ПГ и 7 шт. для ВПМ-770). При подаче напряжения на катушку электромагнитного клапана, клапан срабатывает и производится подача сжатого воздуха в одну из полостей рабочего пневмоцилиндра. При снятии напряжения с катушки электромагнитного клапана, подача сжатого воздуха в полость пневмоцилиндра прекращается, а полость соединяется с атмосферой. На каждом пневмоцилиндре устанавливается по два электромагнитных клапана (на каждую полость пневмоцилиндра). Блок управления должен иметь два стационарных пульта с увеличенными кнопками (для удобства их нажатия) с обеих сторон вагона для управления работой пневмоцилиндрами вручную непосредственно на вагоне и дублирующими функции друг друга, переносной пункт управления (ППУ) и дополнительный пункт управления (ДПУ). Блок управления должен иметь возможность подключения датчика ГЛОНАСС для передачи сигнала о координатах вагона на дополнительный пульт управления. Для электропитания блока управления должны применяться типовые аккумуляторные батареи (АКБ) напряжением 24 В. Заряд АКБ должен происходить от генератора, вращаемого пневмомотором, питаемым от рабочей пневмомагистрали вагона. Исполнение блок управления и стационарных пультов – IP55.

Переносной пульт управления. Для управления соленоидом клапанов должен использоваться ППУ с увеличенными кнопками (для удобства их нажатия). Должна иметься возможность управления с ППУ, как каждым вагоном по отдельности, так и выборочно несколькими или всеми одновременно. Для электропитания ППУ должны применяться типовые АКБ. Заряд АКБ должен осуществляться от ЗУ входящего в комплект оборудования от сети переменного тока напряжением 220В. Исполнение ППУ IP55.

Дополнительный пульт управления. Опционально должен быть дополнительный пульт управления (ДПУ) подключаемый к персональному компьютеру (ПК) для компьютеризированного управления открытием клапанов. ДПУ должен быть оснащён выносной антенной для двусторонней связи с БУ. ДПУ должен принимать от каждого БУ радиосигнал с координатами от датчиков ГЛОНАСС и передавать их на ПК, управлять работой клапанов, как каждого вагона по отдельности, так и выборочно несколькими или всеми одновременно. Число одновременно управляемых вагонов – до 20 шт. Для электропитания ДПУ должны применяться типовые аккумуляторные батареи. Заряд АКБ должен осуществляться от ЗУ входящего в комплект оборудования от сети переменного тока напряжением 220В. Кроме того ДПУ должен иметь возможность питания от сети переменного тока напряжением 220В. Исполнение ДПУ – IP52.

4.6. Экспериментальная проверка алгоритма автоматизированного дозирования балласта с дистанционным автоматическим управления разгрузочно-дозирующим механизмом хоппер-дозатора

4.6.1. В документацию на хоппер-дозатор ВПМ 770 были внесены изменения (извещение №770-200.18), позволяющие обеспечить автоматическую выгрузку балласта на основании расчета объема выгружаемого щебня потребного для обеспечения подъёмки и рихтовки пути, предложенного в первой главе настоящей работы. Стрелы прогиба пути в продольном профиле пересчитываются по формуле изменения поперечной площади призмы при подъёмке пути:

$$S_i = \frac{4.25 * h_i}{1000} + \frac{1.5 * h_i^2}{1000000}, m^2 \quad (4.20)$$

где h_i – просадка в расчетном сечении.

Объем щебня на 1 м. длины призмы:

$$V_i = \frac{(S_i + S_{i+1})}{2}, m^3 \quad (4.21)$$

Общий требуемый объем щебня:

$$V_{\text{общ}} = \sum_0^l V_i, \text{м}^3 \quad (4.22)$$

Имея данную информацию, суммируем, необходимый объем щебня на любой заданной длине участка.

Для экспериментальной проверки работоспособности разработанной комплексной технологии текущего содержания пути и оценки ее экономической эффективности на Юго-Восточной ж.д. были выбран серийно поставленный хоппер-дозатор ВПМ-770 и машина ВПР-02М, оборудованная типовой микропроцессорной системой выправки пути. В программу микропроцессорной системы был добавлен алгоритм, разработанный на основе теоретических расчетов выше, позволяющий рассчитать объем щебня, подсыпаемого в места предполагаемой выправки пути. Результаты работы машины ВПР-02 М совместно с хоппер-дозатором ВПМ 770 приведены на рисунках 4.9. и 4.10.

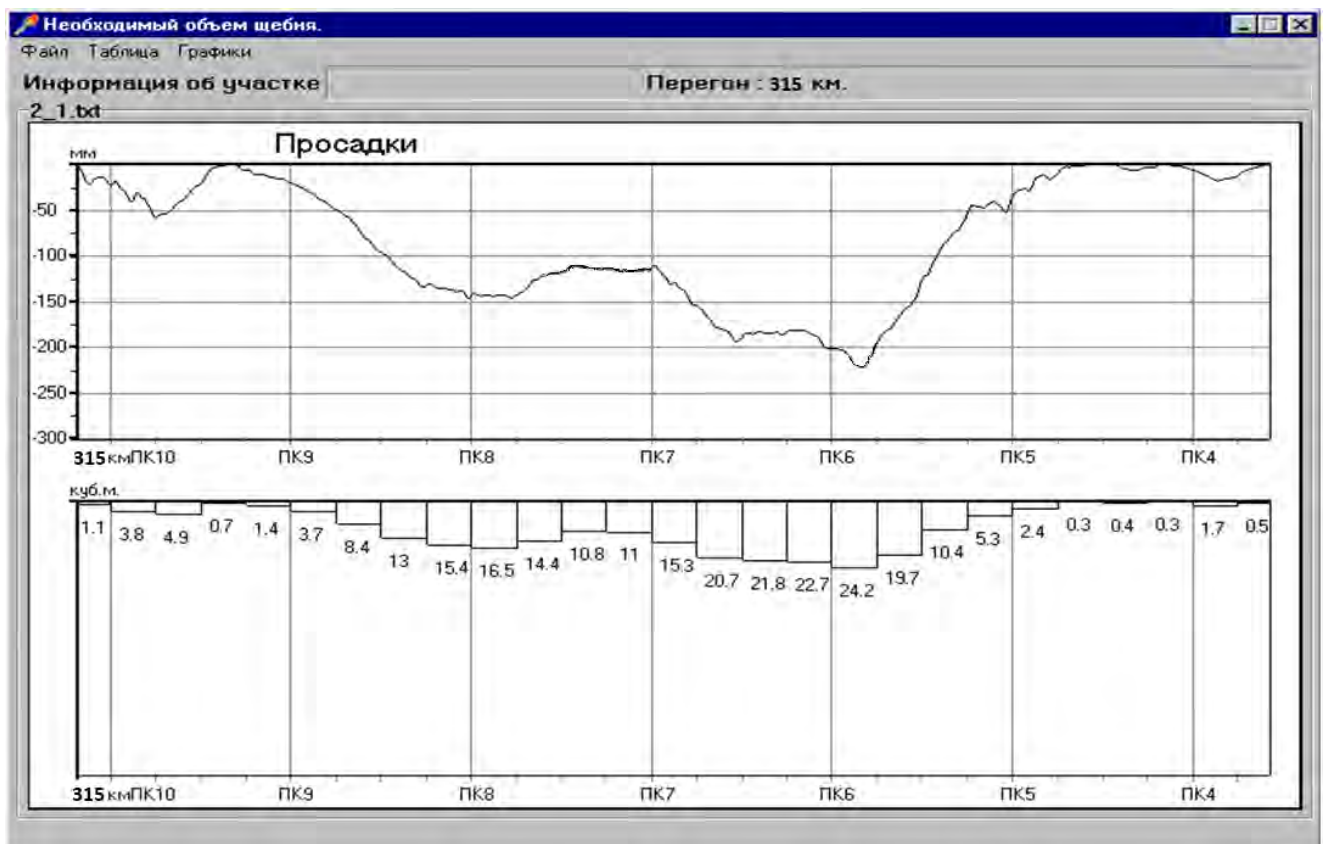


Рисунок 4.9 Результаты работы машины ВПР-02М с хоппер-дозатором ВПМ 770 по реализации комплексной технологии текущего содержания пути (участок №1)

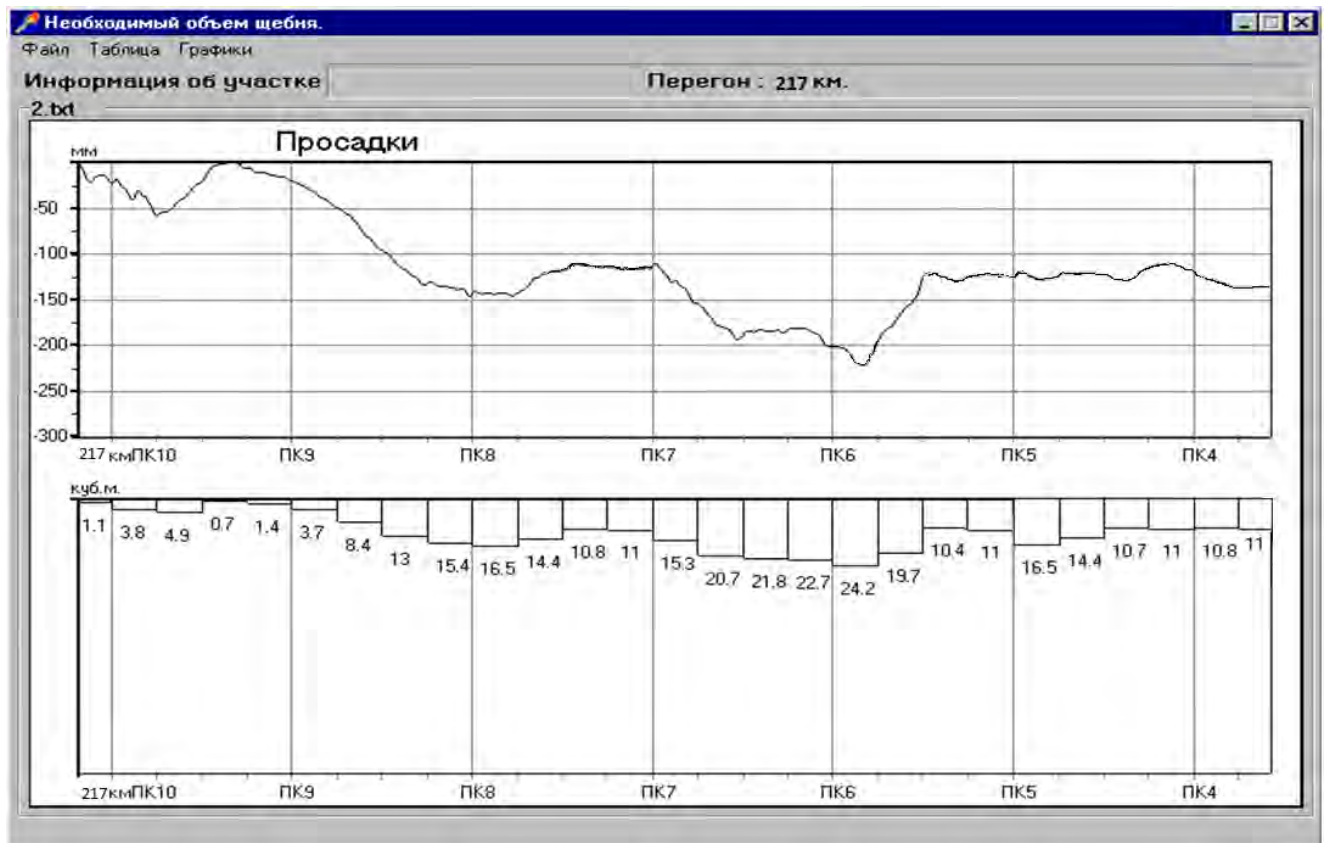


Рисунок 4.10 Результаты работы машины ВПР-02М с хоппер-дозатором ВПМ 770 по реализации комплексной технологии текущего содержания пути (участок №2)

Из рисунков 4.9 и 4.10. видно, что при использовании хоппер-дозаторов моделей ЦНИИ ДВЗ или 55-76 необходимо было бы засыпать участок пути ровным слоем по максимальной величине просадки в 242 мм, в то время как ВПМ-770 обеспечивает точечную подсыпку балласта по разработанному алгоритму, согласно расчету величин подъемов и сдвижек пути.

Аналогичным образом проводились исследования на других участках, в результате определена средняя величина объема балласта на 1 км пути при использовании хоппер-дозатора ВПМ-770 в сравнении хоппер-дозаторами моделей ЦНИИ ДВЗ и 55-76. Получено, что на 1 км пути в среднем достаточно выгрузить хоппер-дозатором ВПМ-770 314 м³ балласта, а хоппер-дозаторами моделей ЦНИИ ДВЗ и 55-76 более 500 м³. Таким образом, экономия щебня составляет более 60% и при этом, нет необходимости в уборке лишнего балласта.

Таким образом, проведенные исследования позволили подтвердить эффективность созданных технических средств, в первую очередь хоппер-дозаторов нового поколения, работоспособность методов и моделей по повышению информативности оценки состояния пути.

По расчетам по приведенным выше формулам требуемый объем щебня для устранения, обнаруженных на этом участке неровностей рельсовой колеи составляет порядка 250 м. Однако максимальная просадка на этом участке пути соответствует 210 мм. Поэтому при выгрузке балласта хоппер-дозаторами ЦНИИ ДВЗ М необходимо высыпать слой не менее 75 мм на всем км. пути, ибо хоппер-дозатор ЦНИИ ДВЗ М выгрузку не прерывает и требуется выгрузка балласта на всем км пути с последующим распределением.

Таким образом возможен эффект от применения хоппер-дозатора ВПМ 770 экономя щебень порядка 25 %, не считая потерь от перераспределения щебня.

4.7. Выводы по главе 4

В результате проведенных исследований:

- впервые разработаны технические требования к модернизации технических средств автоматизированной выгрузки и укладки балласта в путь в системе технического обслуживания железнодорожного пути и технического обеспечения АСУ ТП ТО;

- проведена классификация способов синхронизации управления выгрузкой балласта из хоппер-дозатора и обоснован наиболее эффективный для технологии технического обслуживания пути способ;

- разработана система синхронизации автоматическим управлением выгрузкой и укладкой балласта хоппер-дозаторами ВПМ 770 с рабочими органами машины типа ВПР;

- впервые разработана технология и технические требования дистанционного управления крышками с разработкой алгоритма открытия и закрытия крышек в местах выявленных локальных дефектов пути (выплесков) и расчета и выгрузки требуемого по технологии работ объема подсыпки балласта с обеспечением синхронизации их открытия и закрытия;

- разработаны технические требования к конструкции системы управления разгрузочно-дозирующим механизмом;

- разработана конструкторская документация на систему дистанционного управления пневмоприводом хоппер-дозатора ВПМ 770 в виде извещения к проекту 770.00.000, оформлены и получены патенты на изобретение и полезную модель.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила технической эксплуатации железных дорог Приказ Министерства транспорта Российской Федерации № 286 от 21.12.2010 г. с изменениями Приказ № 349 от 05.10.2018 г; //приказом Минтранса России от 5 октября 2018 года [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://rg.ru/2018/12/14/mintrans-prikaz-349-site-dok.html>
2. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14 ноября 2016 г. № 2288р. – Москва, 2012. – 235 с.
3. Технические условия на работы по ремонту и планово-предупредительной выправке пути/ ОАО «РЖД». – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. –183 с;
4. Исаев К.С. Машинизация текущего содержания пути / К. С. Исаев, В. Ф. Федулов, Ю. М. Щекотков; Под ред. К. С. Исаева. - М. : Транспорт, 1981. - 279 с
5. Гуденко Н.Н., Фомин В.В. Механизация и автоматизация путевых работ за рубежом.- М.: Транспорт, 1975, с. 231
6. Каменский В.Б. Совершенствование системы ведения путевого хозяйства в современных условиях железных дорог: автореф. дис. ... докт.тех.наук: 05.22.06/Каменский Владимир Борисович.- М., 2005. С. 48.
7. Певзнер, В.О. О системе технического обслуживания железнодорожного пути / Певзнер В.О./// Путь и путевое хозяйство. – 2006. № 5. С.18-19
8. Филиппов, В.М. Управление состоянием технических средств /В.М. Филиппов// Железнодорожный транспорт. – 1986. -№10. - С.40.
9. Абдурашитов, А.Ю. Разработка нормативов содержания путевой инфраструктуры на основе новой классификации железнодорожных линий/ А.Ю. Абдурашитов, В.П. Сычев// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство.-2016-№ 9.-С. 11.
10. Прохоров, В.М. Применение показателей интенсивности расстройств рельсовой колеи при организации технического обслуживания пути: автореф. дис. канд.тех.наук:05.22.06/ Прохоров Владимир Михайлович. – М., 2003. – 26с.

11. Певзнер В.О. Уточнение оценки фактического состояния при планировании выправочных работ/Решение задач взаимодействия подвижного состава и пути реального очертания. /В.О. Певзнер//Сб. науч. тр. ВНИИЖТ - 1985. - № 685. - С.25-33.
12. Каменский В.Б. Содержание железнодорожного пути в кривых / В. Б. Каменский, Э. Я. Шац.// - М. : Транспорт, 1987. – 187 с.
13. Крейнис, З. Л. Техническое обслуживание и ремонт железнодорожного пути [Текст] : Москва : ФГОУ "Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте", 2012. - 568 с.
14. Сычев, В.П. Контроль качества содержания пути с помощью ЭВМ/ В.П. Сычев// Вестник ВНИИЖТ- 1982. - № 6. - С.47.
15. Певзнер В.О. Научные основы системы управления состоянием пути// серия Сер. Труды ученых АО "ВНИИЖТ":монография – М.:ООО "РАС" – 2018 - 272 с.
16. Путевые машины / В.В. Попович, С.А. Соломонов, и др. М.: Транспорт, 1977. - 392 с.
17. Сычёв, В. П. Специальный подвижной состав: учебное пособие для студентов, обучающихся по специальностям 271501.65 "Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей", 190109.65 "Наземные транспортно-технологические средства", 190300.65 "Подвижной состав железных дорог" ВО / В. П. Сычёв. - Москва: Учеб.-метод. центр по образованию на ж.-д. трансп., 2015. - 119
18. Кошкин Ю.А., Сычев П.В. Анализ парка вагонов хозяйства пути с целью обеспечения выполнения плановых заданий по ремонтам железнодорожного пути/Ю.А. Кошкин, П.В. Сычев//Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2009. -№ 2. - С. 22-25.
19. Машины и механизмы для путевого хозяйства: [Учебник для техникумов ж.-д. транспорта] / М. А. Плохоцкий, С. А. Соломонов, А. Ф. Толмазов, В. П. Хабаров. - Москва : Транспорт, 1970. - 358 с.
20. Железнодорожный транспорт : Энциклопедия / Гл. ред. Н. С. Конарев. - М. : Большая рос. энцикл., 1994. - 559 с.

21. Игнатенков Г.И. Создание комплекса специализированных вагонов на основе метода адаптивного конструирования// Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, Санкт Петербург, 2000 г.
22. Патент №2100511 - Хоппер-дозатор// Арбузов А.Я., Игнатенков Г.И., Самохин С.А., Слесарев С.И., 05.01.1993, патентообладатель МП ВАЭЖСС
23. Сычев, В.П. Хоппер-дозаторы /В. П. Сычев. - Москва: Агентство интеллектуальной собственности на транспорте, 2011. - 126 с.
24. Сычев В.П. Модельный ряд хоппер-дозаторов нового поколения/В.П. Сычев// Путь и путевое хозяйство. - 2007. - № 7. - С. 22-25.
25. Сычев В.П. Хоппер-дозаторы нового поколения /В.П. Сычев//Транспортное строительство. – 2003 - № 4. Стр.18-21.
26. Сычев П.В., Кузнецова Н.В., Самойлов А.А. Совершенствование конструкции путевых машин для работы с балластом. /П.В. Сычев, Н.В. Кузнецова, А.А. Самойлов// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2016. - № 9. - С. 274-279.
27. Ананьев В.П., Сычев В.П., Фисун В.А. Технология применения путевых машин в системе ремонтов и технического обслуживания железнодорожного пути// депонированная рукопись ВИНТИ № 415-В2007 11.04.2007
28. Абдурашитов А. Ю. Реконструкция и ремонт железнодорожного пути: учебное пособие для студентов старших курсов по направлению подготовки 271501.65 "Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей"/ Абдурашитов А. Ю., Самохин С. А., Сычев В. П. - Москва: Агентство интеллектуальной собственности на транспорте, 2014. - 136 с.
29. Бойко Н.Ф., Сычев П.В. Оценка надежности путевых машин по результатам эксплуатационных наблюдений. /Н.Ф. Бойко, П.В. Сычев - Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах: сборник трудов. - М.: РАС – 2017 – 150 с.
30. Певзнер В.О., Зензинов Б.Н., Клементьев К.В. О необходимости дополнения норматива отвода ширины колеи/В.О. Певзнер// Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник

ВНИИЖТ).- 2017. - №76(1). – С.45-50

31. Абдурашитов А.Ю. Современные тенденции содержания путевой инфраструктуры/А.Ю. Абдурашитов// Железнодорожный транспорт. - 2017. - №2. - С.65-69
32. Коган А.Я., Петуховский С.В., Сычев В.П., Холин А.Л. Технология выправки и текущего содержания пути/ А.Я. Коган//Путь и путевое хозяйство. – 2001. - № 11. - С.22-23
33. Информационные технологии на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов ж.-д тр-та /Э.К.Лецкий, В.И. Панкратов, В.В. Яковлев и др.; Под ред. Э.К. Лецкого, Э.С. Поддавашкина, В.В. Яковлева. – М.: УМК МПС России, 2001. –668 с.
34. Комплексная автоматизированная система управления железнодорожным транспортом (под. ред. А.П.Петрова), -М.:Транспорт, 1977. - 600с.
35. Концепция информатизации железнодорожного транспорта России М. 1996. - 51 с.
36. Зябиров Х.Ш., Слободенюк Н.Ф. "Сириус". Единая сетевая интегрированная система/Х.Ш. Зябиров, Н.Ф. Слободенюк. Железнодорожный транспорт - 2003. - №8 - с. 7-20
37. Петров А.П., Буянов В.А., Угрюмов Г.А. Автоматизация и микропроцессорная вычислительная техника в эксплуатационной работе железных дорог/А.П. Петров, В.А. Буянов, Г.А. Угрюмов - М.: Транспорт 1987 - 245 с.
38. Тулупов Л.П. АСУЖТ: единство организационной структуры и экономического управления./Л.П. Тулупов// Железнодорожный транспорт - 1989. - №8.- С. 16-21
39. Вопросы автоматизированного управления ремонтами железнодорожного пути: Сб.науч.тр./ ВНИИЖТ. -М.: Транспорт, 1980. -Вып. 621. -110 с.
40. Буянов В.А., Ратин Г.С. Автоматизированные информационные системы на железнодорожном транспорте/В.А. Буянов, Г.С. Ратин - М.: Транспорт 1984. -

329 с.

41. Автоматизированная система контроля расходов по содержанию пути // ЭИ/ЦНИИТЭИ. Ж.-д. транспорт за рубежом. Серия IV. Путь и путевое хозяйство -1981.-Вып.5. -С.79-81.
42. Филиппов В.М., Архангельский С.В., Гунин В.А. Об одной реализации автоматизированной диагностической системы назначения ремонтов пути Тезисы межвуз.н.-т. конференции /В.М. Филиппов, С.В. Архангельский, В.А. Гунин Н.:НИИЖТ. -1982. -С. 96.
43. Сычев В.П. Автоматизация контроля и информации в хозяйстве пути /В.П.Сычев// Железнодорожный транспорт- 1986. № 10 С.36-40.
44. Гунин В.А., Каменский В.Б., Бугаенко В.М., Симаков О.Б., Седелкин Ю.А. Особенности методики автоматической оценки состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительных вагонов типа КВЛ-П /Информационные технологии в транспортных системах и управлении предприятиями/В.А. Гунин, В.Б. Каменский, В.М. Бугаенко, О.Б. Симаков, Ю.А. Седелкин -. М.: Тр. -2000. - С. 48-71.
45. Зензинов Б.Н., Сычев В.П., Щекотков Ю.М. Информационно-измерительный вычислительный комплекс. В сб. Автоматизированные системы испытаний железнодорожного транспорта. межвузовский сб. научн. /Б.Н. Зензинов, В.П. Сычев, Ю.М. Щекотков – М.: изд. МИИТ – 1986.
46. Мишин В.В., Маркин СВ., Подкопаев В.С., Вороненков СВ. Автоматизированная система планирования выправки пути/В.В. Мишин, С.В. Маркин, В.С. Подкопаев, С.В. Вороненкова//Путь и путевое хозяйство. – 2000. - № 7.- С. 21-22.
47. Розенберг Е.Н., Уманский В.И., Дзюба Ю.В. От систем автоматики до интеллектуальных систем управления/Е.Н. Розенберг, В.И. Уманский, Ю.В. Дзюба//Автоматика, связь, информатика. - 2017. - № 11. - С. 7-11.
48. Шварцфельд В.С., Соколов А.В. Автоматизированная обработка данных инструментальной съемки станций и перегонов/В.С. Шварцфельд, А.В. Соколов// В сборнике: Проблемы развития сети железных дорог Межвузовский сборник

- научных трудов. Под редакцией В.С. Шварцфельда. – Хабаровск - 2006. - С. 128-132.
49. Сычев В.П., Виноградов В.В., Быков Ю.А., Коваленко Н.И./В.П. Сычев, В.В. Виноградов, Ю.А. Быков//Автоматизированная технология текущего содержания железнодорожного пути - Вестник МГСУ. - 2016. - № 3. - С. 68-78.
50. Разработка системы информационно-телекоммуникационного обеспечения для технологической платформы «Высокоскоростной интеллектуальный железнодорожный транспорт»//отчет о НИР / Круглов В.М. № 07.514.11.4095 от 17.10.2011 (Министерство образования и науки РФ)
51. Розенберг И.Н. Интеллектуальное управление/И.Н. Розенберг// Современные технологии управления. - 2017. - № 4 (76). - С. 45-50.
52. ГОСТ 34.003 – 90 Автоматизированные системы. Термины и определения. // В сб. Информационная технология. Комплекс стандартов и руководящих документов на автоматизированные системы. –М.: Издательство стандартов, 1991. – С.105-127
53. ГОСТ 15971-90. Системы обработки информации. Термины и определения. –М.: Издательство стандартов, 1991. – 12с.
54. Эсвельд К., Кюи Г. Новая система автоматической выправки пути./К. Эсвельд, Г. Кюи - Железные дороги мира - 1982, № 3, с. 55-62.
55. Бредюк В.Б. Навигатор/В.Б. Бредюк// - Путь и путевое хозяйство.- 1999. - № 6 - С.35-36.
56. Сычев В.П., Козелков А.Л. О микропроцессорной системе выправки и рихтовки. /В.П. Сычев, А.Л. Козелков//Путь и путевое хозяйство. - 2007. -№7. - С. 32.
57. Солонов Г.В. Механизация выправки плана и продольного профиля железнодорожного пути. Тр. ВНИИЖТ, вып. 374/Г.В. Солонов - М.: «Транспорт», 1969.
58. Коган А.Я., Ершова К.Б., Петуховский В.В. и др. Актуальные проблемы выправки и приемки пути после ремонта /А.Я. Коган, К.Б. Ершова, В.В. Петуховский// Путь и путевое хозяйство. - 2007. - №5. - С.7-9.

59. Бучкин, В.А., Ленченкова Е.П., Рыжик Е.А Сравнительный анализ программных комплексов /В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова, Е.А. Рыжик: - М.: Мир транспорта. - 2013.
60. Лебедев А.А. Расчет на ЭЦВМ выправки кривых в плане с применением линейного программирования. /А.А. Лебедев// Вестник ВНИИЖТа. – 1969 - №6. С. 18-22.
61. Анисимов В.А., Малых К.А. Концепция системы автоматизированного проектирования железных дорог на основе использования трехмерных моделей рельефа/В.А. Анисимов, К.А. Малых// Проектирование развития региональной сети железных дорог. - 2014. - № 2. - С. 44-51.
62. Абрамов А.Б., Ададуров С.Е., Иконников Е.А., Миронов В.С., Раков В.В., Розенберг Е.Н., Розенберг И.Н. Мобильный комплекс для диагностирования железнодорожного пути// патент на изобретение RUS 2442713 23.09.2010
63. Локтев А.А., Сычев В.П., Локтев Д.А., Дмитриев В.Г. Автоматизированная система выявления дефектов колес подвижного состава на основе оценки ударного неосесимметричного воздействия колеса на рельс при моделировании верхнего строения пути ортотропной пластиной/А.А. Локтев, В.П. Сычев, Д.А. Локтев, В.Г. Дмитриев//Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2017. - № 4. - С. 59-70.
64. Розенберг И.Н. Интеллектуальные транспортные системы как системы управления/И.Н. Розенберг//Славянский форум. - 2016. - № 4 . - С. 204-211.
65. Розенберг И.Н., Лупян Е.А., Железнов М.М., Василейский А.С. Возможности использования спутниковых технологий для мониторинга железнодорожной инфраструктуры/И.Н. Розенберг, Е.А. Лупян, М.М. Железнов// В книге: Ренессанс железных дорог Лapidус Б.М., Фортов В.Е., Колесников В.И., Гапанович В.А., Морозов В.Н., Лёвин Б.А., Корчагин А.Д., Соловьев В.П., Анисин А.В., Давыдов И.А., Надежин С.С., Певзнер В.О., Железнов М.М., Третьяков В.В., Третьяков И.В., Верескун В.Д., Явна В.А., Кругликов А.А., Титов Е.Ю., Розенберг И.Н. и др. фундаментальные научные исследования и прорывные инновации. коллективная монография членов и научных партнеров

Объединенного ученого совета ОАО "РЖД" ; редактор Б.М. Лapidус. Ногинск, 2015. С. 97-112.

66. Уманский В.И. Автоматизация управления технологическими процессами железнодорожного транспорта на базе интеграции методов высокоточного спутникового позиционирования инерциальной навигации: автореф. дис. ... док. тех. наук: /В.И. Уманский. – М., 2012

67. Дулин С.К., Розенберг И.Н., Уманский В.И. Автоматизация обработки информации для обнаружения аномалий формы рельсовых нитей/С.К. Дулин, И.Н. Розенберг, В.И. Уманский// Системы и средства информатики. - 2012. - № 2. - С. 58-78.

68. Шварцфельд В.С., Залевский Е.С. Совершенствование методов контроля параметров продольного профиля железнодорожного пути/В.С. Шварцфельд, Е.С. Залевский// Проектирование развития региональной сети железных дорог. - 2016. - № 4. - С. 96-102.

69. Сычев В.П. Об автоматизированной системе технического обслуживания железнодорожного пути /В.П. Сычев // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 2012.- № 3. - С.49-52

70. Сычев П.В., Дудник В.В., Агеев Д.С. Автоматизированная система определения механических напряжений в рельсах на основе акустического метода/П.В. Сычев, В.В. Дудник, Д.С. Агеев// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство- 2018. - № 12. - С. 48-51.

71. Лебедев А.А. Щекотков Ю.М. Машинный расчет железнодорожных кривых в плане. /А.А. Лебедев, Ю.М. Щекотков//Вестник ВНИИЖТа. – 1970. - № 5. – С. 59-62.

72. Певзнер В.О., Ромен Ю.С. Проблемы контроля состояния пути на современном этапе/В.О. Певзнер, Ромен Ю.С.//Железнодорожный транспорт. – 1994 - № 2. - С. 34-36.

73. Филиппов В.М. Оценка состояния пути путеизмерительными вагонами, оборудованными БАС /В.М. Филиппова// Путь и путевое хозяйство. – 1998 - №11. - С 4-6.
74. Пименов А.И., Пикалев А.С. Технология производства, реконструкции и ремонта пути абсолютным методом с применением глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS на Западно-Сибирской ж.д./А.И. Пименов, А.С. Пикалев// В сб. «Внедрение передовых конструкций и современных технологий в путевое хозяйство» по итогам 6 научно- практической конференции. М.: РОАТ (МИИТ) - 2013. - №6. - С.103-110.
75. Вагон - путеобследовательская станция ЦНИИ-4МД. Специальное программно-математическое обеспечение верхнего уровня. Руководство пользователя ПЭВМ-2. (версия 1.6.) ФШМК 00003-01 34-02 "ПИК ПРОГРЕСС", Москва, 2002;
76. Зензинов Б.Н., Сычев П.В., Трушина Ю.Р. Экспериментальная проверка моделей определения закономерностей появления отступлений в содержании рельсовой колеи в условиях неполной информации ///Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. 2018. Т. 13.(13). С. 67-76
77. Круглов В.М., Пусков В.И., Тригубович Г.М., Бокарев С.А., Крицкий М.Я., Щербаков В.В. Опыт создания и использования комплексной системы технологий мониторинга текущего состояния железнодорожного пути и инженерных сооружений/В.М. Круглов, В.И. Пусков, Г.М.Тригубович, С.А. Бочкарев, М.Я. Крицкий, В.В. Щербаков// Современные технологии строительства, ремонта и эксплуатации путевого хозяйства Западно-Сибирской железной дороги под редакцией В.И. Старостенко. - 2001. - С. 44-63.
78. Технические указания по определению и использованию характеристик устройства и состояния пути, получаемых вагонами – путеобследовательскими станциям системы ЦНИИ-4 (ЦПТ-55/22, утв. 31.08. 2000 г.), МПС России, Москва, 2000 г.;
79. Руководство по эксплуатации вагона-путеобследовательской станции ЦНИИ-4МД. – М.: - ПИК ПРОГРЕСС – 2002.

80. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов (с Дополнениями и изменениями), утв. Департаментом пути и сооружений МПС России 14 октября 1997 г. ЦП-515.
81. Туровский, Илья Яковлевич Расчет выправки железнодорожных кривых /И.Я. Туровский.- Москва : Транспорт, 1972. - 214 с..
82. Бредюк В.Б., Проценко А.И. Расчет выправки кривых в плане при текущем содержании пути методом сглаживания натуральных стрел./В.Б. Бредюк, А.И. Проценко//Тр.НИИЖТа. – 1972. - № 135 - С. 97-104.
83. Лебедев А. А. Матричные методы в расчетах выправки железнодорожного пути. /А.А. Лебедев//Вестник ВНИИЖТа – 1981 - № 5 – С. 40-45.
84. Мишин В.В., Зензинов Б.Н. Определение параметров кривых вагоном ЦНИИ-4. /В.В. Мишин, Б.Н. Зензинов//Путь и путевое хозяйство. – 2001 - № 6.- С. 5-8.
85. Бучкин В.А., Ленченкова Е.П. Единая пространственная модель плана железной дороги для проектирования, технического обслуживания и ремонтов пути/В.А. Бучкин, Е.П. Ленченкова// Путь и путевое хозяйство. - 2018. - № 9. - С. 24-27.
86. Лебедев А. А., Кучеренко В. П. Обобщенная теория машинной выправки железнодорожного пути. /А.А.Лебедев, В.П. Кучеренко//Научн. журн.: Вестник ВНИИЖТ. – 1993.- №6.- С. 28-33.
87. Шахунянц Г.М. Железнодорожный путь: Учебник для вузов ж.-д. трансп./Г.М. Шахунянц. - М.: Транспорт- 1987.- 479 с.
88. Турбин И. В. Практические расчеты при проектировании трассы железных дорог. /И.В. Турбин. – М.: Транспорт. – 1987. - 199 с.
89. Сычев В.П. Для автоматизации текущего содержания пути/В.П. Сычев// Путь и путевое хозяйство. – 2008. - №2 - С. 9-10.
90. Зензинов Б.Н., Трушина Ю.Р. Устройство и содержание участков пути на линии Санкт-Петербург-Хельсинки/Б.Н. Зензинов, Ю.Р. Трушина//Путь и путевое хозяйство. - 2011. - № 7. - С. 21-23.

91. Сычев В.П., Михович М.В. Патент 2196860 РФ. Путевая машина. Б.И. № 2 от 20.01.2003.
92. Мишин В.В. Новый подход к планированию выправочных работ /В.В. Мишин//Путь и путевое хозяйство. -2004. - № 4. – С.16-18.
93. Ершова К.Б., Петуховский С.В., Холин А.Е. Способ выправки железнодорожного пути, устройство для выправки железнодорожного пути и машина для выправки железнодорожного пути// патент на изобретение RUS2230848 31.07.2001
94. Петуховский С.В. Расчет кривизны рельсовой нити по стрелам несимметричной хорды/С.В. Петуховский// Известия Петербургского университета путей сообщения - 2018. - №1 - С.82-89
95. Петуховский С.В. Оптимизация сдвигов при рихтовке железнодорожного пути: дис. ...канд. .тех.наук 05.22.06 /С.В. Петуховский – Москва- 2003 г.
96. S. Barber, P. Flynn. Rail Engineering International, 2008, No 3, p. 7 – 12.
97. P. Kirkland. Permanent Way Institution, 2010, No2, p. 79–81, 83; материалы компании Harsco Rail (www.harscorail.com).
98. Материалы институтов IFS и IRT Высшей технической школы RWTH в Ахене ([http://www.irt.rwth-aachen.de/uploads/media/FlexCargoRail BS. pdf](http://www.irt.rwth-aachen.de/uploads/media/FlexCargoRail_BS.pdf)); M. Baier et al. ZEVrail, 2009, No1/2, S. 51–58. Вагоны с дистанционным управлением
99. Путь и путевое хозяйство железных дорог США. Справочник: Пер с англ. М.: Транспорт, 1987. 216 с. 101.
100. Wang, S. Causes of crack in ballastless track and control measure [Text] / S. Wang, R. Yang // Railwayconstraction . – China, 2007. – No 9. – P. 76 – 79.
101. Федулов В.Ф., Стельмашов В.И., Башкатова А.В. Дополнительные объемы работ и трудовых затрат на текущее содержание пути при увеличении скорости движения грузовых поездов.//Сб.научн.тр.
- 102.Тихомиров В.И., Петропавловская Г.В. К вопросу прогнозирования сроков назначения ремонтов пути //Сб. научн.тр./ВЗИИТ. -М.: 1979. -Стр.5-12.
103. Исследования накоплений расстройств рельсовой колеи железнодорожного пути / под ред. О.П. Ершкова М.: Труды ВНИИЖТа, вып. 628, 1980, 104 с.

104. А.А. Сеньковский Интенсивность накопления деформаций и совершенствование системы диагностики железнодорожного пути Автореферат на соискание ученой степени кандидата технических наук Москва, 2000 г.
105. Ершков О.П., Ильяшенко А.А., Ткачев Е.Д., Шинкарев Б. С. Анализ накопления остаточных деформаций рельсовых нитей в профиле и плане/О.П. Ершков, А.А. Ильяшенко, Е.Д. Ткачев, Б.С. Шинкарев //Сб.научн.тр./ ВНИИЖТ. - М.: Транспорт, 1980. -Вып.628. -С.50-57.
106. Явна, В.А. Оценка динамического воздействия подвижного состава на объекты железнодорожной инфраструктуры / В.А. Явна, А.А. Кругликов, З.Б. Хакиев [и др.] // Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – 2014. – № 2 (26). – С. 33–35.
107. Вериго М.Ф., Коган А.Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. /М.Ф. Вериго, А.Я. Коган. - М: Транспорт. - 1986 -559 с.
108. Крейнис З.Л. Методы оценки состояния пути/З.Л. Крейнис //Ж.д. транспорт, Сер. Путь путевое хозяйство: ЭИ/ ЦНИИ- 1990.- №4. С.17-29.
109. Левинзон М.А., Пешков П.Г. Об оценке деформативности основания пути. /М.А. Левинзон, П.Г. Пешков//. Динамические качества современного подвижного состава и особенности его воздействия на путь. - 1997 - С.63-67.
110. Ершков О.П. За новую оценку состояния пути. /О.П. Ершков//Путь и путевое хозяйство.-1993.-№10. -С. 22-25.
111. ЛысюкВ.С. Расчетное прогнозирование надежности ж.-д. пути. /С.В. Лысюк//Сб.научн.тр. Решение задач взаимодействия подвижного состава и пути. – 1993. - С.3-24.
111. Певзнер В.О.,Карцев В.Я. Методы оценки геометрии колеи./В.О. Певзнер, В.Я. Карцев// Путь и путевое хозяйство - 2003. - №5.- С. 14-16
- 112.Мишин В.В., Зензинов Б.Н., Певзнер В.О., Трушина Ю.Р. Комплексный показатель состояния геометрии пути/В.В. Мишин, Б.Н. Зензинов, В.О. Певзнер//Путь и путевое хозяйство. – 1999 - № 11. - С. 25-26.

113. Сычев В.П. Методы оценивания железнодорожного пути характеристиками случайных процессов/В.П. Сычев//Наука и техника транспорта. - 2007. - № 3. - С. 84-88.
114. Симонюк Иван Андреевич. Прогнозирование интенсивности накопления остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути для среднесрочного планирования путевых работ: дис. ... канд. тех. наук: 05.22.06 / Симонюк Иван Андреевич. - Санкт-Петербург, 2014.- 147 с.
115. Сычев В.П. Прогнозирование состояния рельсовой колеи при планировании работ по текущему содержанию пути/В.П. Сычев//Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. - 1982. - № 1.- С. 41.
116. Локтев А.А., Сычёв П.В. Прогнозирование развития отступлений от норм содержания рельсовой колеи до неисправности, влияющей на перевозочный процесс/А.А. Локтев, П.В. Сычев// Наука и техника транспорта. - 2018. - № 4.- С.17-26
117. Абдурашитов А.Ю., Сычев П.В. Прогнозирование ресурса верхнего строения пути в процессе эксплуатации/А.Ю. Абдурашитов, П.В. Сычев// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2017. - № 11.- С. 62-67.
118. Loktev A., Sychev V., Gridasova E., Stepanov R. Mathematical modeling of railway track structure under changing rigidity parameters//Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. -Vol. 1. Theoretical and Applied Mathematics.-2017.-P. 291-30
119. Ашпиз, Е.С., Замуховский А.В. Обоснование нормативов деформативности подрельсового и подшпального оснований / Е.С. Ашпиз, А.В. Замуховский. – М.:Мир транспорта. - 2002. - С.112-119
120. Ашпиз Е.С. Разработка системы интеллектуального содержания и ремонта пути для опытного полигона Рыбное- Челябинск/Е.С. Ашпиз//Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД.- 2012. - № 5. - С. 21-27.

121. Луцкий С.Я., Шепитько Т.В., Черкасов А.М. Технологический мониторинг сооружения земляного полотна на высокотемпературной мерзлоте/С.Я. Луцкий, Т.В. Шепитько, А.М. Черкасов// в сборнике Второй Международный симпозиум земляного полотна в холодных регионах //материалы симпозиума. под ред. А.Л. Исакова и Ц.К. Лю. - 2015. - С. 41-48.
122. Li, D. Long–Term Performance of Slab Track Designed for Shared Passenger and Freight Operations and Tested under Heavy Freight Train [Text] / D. Li, S. Dick, T. Sussmann , L. Maal // 11 th WCCR (World Congress on Railway Research) Milan–Italy 29 th May – 2 nd Jun. – 2016. – 6 p.
123. Wei, J., Ban X. Analysis on the effect of cracks of CRTS II Ballastless track structure system induced by temperature [Text] / J. Wei, X. Ban // Journal of Wuhan University of Tecnology. – China, 2012.No34(10). – P. 80 – 85.
124. Шац Э.Я. Математическая модель оптимального распределения объемов капитального ремонта пути по участкам дороги /Э.Я. Шац// Вестник ВНИИЖТа - 1980 - №6. - С.49-50.
125. Варызгин, Е.С. Исследование неравномерности остаточных осадок щебеночного слоя /Е.С. Варызгин// Вестник ВНИИЖТ. – 1968. – №5. – С. 43–46.
126. Вериго, М.Ф. Основы методики статистической оценки прочности пути с учетом грузонапряженности / М.Ф. Вериго, В.С. Лысюк // Труды ЦНИИ МПС. – М.: Транспорт, 1972. – No 466. – С. 51–67.
- 127.Певзнер В.О., Мишин В.В. Стратегическое управление содержанием пути/В.О. Певзнер, В.В. Мишин//Путь и путевое хозяйство.- 2007. - № 3. - С.16-18.
- 128.Певзнер В.О., Дворников А.В. Методы совершенствования оценки состояния пути/В.О.Певзнер, А.В. Дворников//Путь и путевое хозяйство. - 2007. - №6. - С.8-9
129. Абдурашитов А.Ю., Сычев В.П. Разработка нормативов содержания путевой инфраструктуры на основе новой классификации железнодорожных линий/А.Ю. Абдурашитов, В.П. Сычев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2016. - № 9 . - С. 11—19.

130. Крейнис З.Л., Зеленая Л.В. Корреляционный анализ очертаний рельсовых нитей на прямых участках железнодорожного пути/З.Л. Крейнис, Л.В. Зеленая//Вестник ВНИИЖТа. – 1975 - № 5 - с. 40-44.
131. Малинский С.В., Певзнер В.О. Исследование спектральных свойств вертикальных неровностей железнодорожного пути/Вопросы взаимодействия пути и подвижного состава в условиях интенсификации работы железнодорожного транспорта/С.В. Малинский, В.О. Певзнер// Межвуз. сб. науч. тр. ДИИТ. – 1990. - № 278/31.- С. 15-20.
132. Певзнер В.О., Лецкий Э.К., Козеренко Е.В., Варфоломеев В.А. Статистические показатели состояния пути/В.О.Певзнер, Э.К. Лецкий, Е.В. Козеренко, В.А. Варфоломеев//Вестник ВНИИЖТ. - 1984.- № 2. С. 41-45.
133. Грязев В.П., Старовойтова Т.А., Сычев В.П. Решение на ЭВМ задачи статистического анализа состояния пути по показаниям вагона-путеизмерителя. Сб. Вычислительная техника на железнодорожном транспорте. ЛИИЖТ им. В.Н. Образцова/В.П. Грязев, Т.А. Старовойтова, В.П. Сычев. Л.,1980. Деп. В ЦНИИТЭИ МПС. №1225
134. Корн Т., Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) /Т. Корн, Г. Корн Пер. с англ.: Москва, Наука. – 1974. с 832.
135. Лукашин Ю. П. Адаптивные методы краткосрочного прогнозирования временных рядов. — М.: Финансы и статистика, 2003. — 416 с.
136. Loktev A., Sychev V., Gridasova E., Stepanov R. Mathematical modeling of railway track structure under changing rigidity parameters//Nonlinearity. Problems, Solutions and Applications. -Vol. 1. Theoretical and Applied Mathematics.-2017.-P. 291-307
137. D. P. Vetrov, D. A. Kropotov and A. A. Osokin Automatic determination of the number of components in the EM algorithm of restoration of a mixture of normal distributions, 2009.
138. Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и остродефектных рельсов: инструкция; утв. Распоряжением ОАО «РЖД» от 23.10.2014 № 2499р (в ред. от 10.10.2017)..

139. Лищинский Л.Ю. Структурный и параметрический синтез гибких производственных систем/Л.Ю. Лищинский - М.: Машиностроение, 1990. - 312 с.
140. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений/Ю.В. Линник - М.: Физматгиз, 1962 - 349 с.
141. Подход к неавтономному выделению нечётких моделей Takagi-Sugeno. Пламен П.Ангелов, Димитар П. Филев. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B: Cybernetics, Vol.34, No. 1, February 2004, pp. 484-498
142. Дудник В.В., Сычев П.В. Оценка применимости методов восстановления плотности распределения и опорных векторов в автоматизированной системе оценки состояния железнодорожного пути/В.В. Дудник, П.В. Сычев //Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2018.- №12. - С. 163-166
143. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем/К. Капур, Л. Ламберсон.-М., Мир, 1980 - 604 с.
144. Абдурашитов А.Ю., Сычев П.В. Оценка остаточного ресурса объектов инфраструктуры на основе анализа динамики изменения их технического состояния в процессе эксплуатации/А.Ю. Абдурашитов, П.В. Сычев; В сборнике: Особенности системы ведения рельсового хозяйства на российских железных дорогах сборник трудов ученых АО "ВНИИЖТ" (АО "Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта"). Москва, 2017. -С. 60-67.
145. Абдурашитов Ю.А., Сычев В.П., Абдурашитов А.Ю. Оценка влияния воздействия подвижного состава с различной нагрузкой на ось на железнодорожный путь с различной толщиной балластного слоя и элементами верхнего строения пути на основе моделирования/Ю.А. Абдурашитов, В.П. Сычев, А.Ю. Абдурашитов// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2018.- № 12.- С. 58-64.
146. Смоляк С.А., Титаренко Б.П. Устойчивые методы оценивания: (Статистическая обработка неоднородных совокупностей)/С.А. Смоляк, Б.П. Титаренко - М.: Статистика, 1980.-208 с.

147. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах/Г. Хан, С.Шапиро; Пер. с англ. Е.Г. Коваленко.- М.: Мир, 1969 - 395 с.
148. Абдурашитов А.Ю., Сычев П.В. Прогнозирование ресурса верхнего строения пути в процессе эксплуатации/А.Ю. Абдурашитов, П.В. Сычев // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2017.- № 11.- С. 62-67.
149. Четыркин Е.М., Калихман И.Л. Вероятность и статистика/Е.М. Четыркин, И.Л. Калихман - М.: Финансы и статистика, 1982. - с 319.
150. Чуев Ю.В., Михайлов Ю.Б., Кузьмин В.И. Прогнозирование количественных характеристик процессов./Ю.В. Чуев, Ю.Б.Михайлов, В.И. Кузьмин – М.: Советское радио, 1975. – 400 с
151. Бережнов В.И., Горский Л.К., Короленок В.К. Алгоритмы получения последовательностей псевдослучайных чисел с различными законами распределения/В.И. Бережнов, Л.К. Горский, В.К. Короленок/Алгоритмы и программы случайного поиска. Рига. Зинатне. - 1969. - С. 335-339.
152. Зензинов Б.Н., Трушина Ю.Р. Основные отличия новой инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения от инструкции цп-515/Б.Н. Зензинов, Трушина Ю.Р.// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2013.- № 6.- С. 47-51.
153. Тихонов В.И.,Хименко В.И.Проблема пересечений уровней случайными процессами.Радиофизические приложения/В.И. Тихонов, В.И. Хименко//Радиотехника и электроника. - 1998. - №43. - С.501-523.
154. Хименко В. И. Характеристики типа «превышение уровней» для случайных точечных процессов/Хименко В.И.//Радиотехника и электроника - 2000. - №45.- С.436-443.
155. Абдурашитов А.Ю., Сычев В.П., Абдурашитов Ю.А. Выбор моделей напряженно деформируемого состояния железнодорожных рельсов при различных вариантах их закаливании/А.Ю. Абдурашитов, В.П. Сычев, Ю.А.

Абдурашитов//Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2016. - № 10. - С. 64-79.

156. Сычев В.П. Обоснование моделей планирования путевых работ по показаниям вагона путеизмерителя/В.П. Сычев// Вестник Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 1984. - №8.- С.45

157. Локтев А.А., Сычев П.В. Прогнозирование развития отступлений от норм содержания рельсовой колеи до неисправности, влияющей на перевозочный процесс/А.А. Локтев, П.В. Сычев// Наука и техника транспорта. – 2018- №4 - С.17-26

158. Андреев А.В., Бельтюков В.П., Сенникова А.А., Симонюк И.А. Совершенствование методики прогнозирования развития остаточных деформаций верхнего строения железнодорожного пути/А.В. Андреев, В.П. Бельтюков, А.А. Сенников, И.А. Симонюк // Изв. ПГУПС.- 2014.- №4 (41).- С. 16–21.

159. Бельтюков В.П. Оптимизация среднесрочных перспективных планов ремонтов железнодорожного пути/В.П. Бельтюков// Транспорт РФ. - 2011. - № 3 (34).- С. 71–74.

160. Сычева А.В., Сычев В.П., Бучкин В.А., Быков Ю.А. Моделирование работы железнодорожного пути как системы квазиупругих ортотропных слоев/А.В. Сычева, В.П. Сычев, В.А. Бучкин, Ю.А. Быков// Вестник МГСУ.- 2016.- № 3. -С. 37-46.

161. Мазайс Я.Р., Трибис Г.В. Экстраполяционные алгоритмы для прогнозирования и диагностики технического состояния машин/Я.Р.Мазайс, Г.В. Трибис// Точность и надежность механических систем. Параметрические методы диагностики. – Рига. – 1988 - С. 72-79;

162. Гавриленков А.В. Методы теории приближения функций и теория вероятностей в проектировании реконструкции плана железных дорог/А.В. Гавриленков// Труды МИИТа – 1962. № 158, - с. 133-143.

163. Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента: (справочное пособие) / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971 192 с.

164. Гнеденко А.Н. О применении нормального распределения при обработке данных в машиностроении / А.Н. Гнеденко//Вестник машиностроения – 1969 - N2.
165. Сычев П.В. Диагностика специального подвижного состава на основе применения закона распределения экстремальных значений/П.В. Сычев// Путь и путевое хозяйство. - 2018. - №5.- С.27-30
166. Коган А.Я., Левинзон М.А., Малинский С.В., Певзнер В.О. Спектральный анализ неровностей пути и напряженно-деформационное состояние его элементов/А.Я. Коган, М.А. Левинзон, С.В. Малинский//Вестник ВНИИЖТ - 1991. - . № 1. - С.39-43.
167. Аронов И.З., Бурдасов Е.И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний/И.З.Аронов, Е.И.Бурдасов//. - М.: Изд.стандартов, 1987 - 184с.
168. Анализ надежности технических систем по цензурированным выборкам /В.М.Скранник, А.Е.Назин, Ю.Г.Приходько, Ю.Н. Благовещенский - М.: Радио и связь, 1988 - 184 с.
169. 2. Loktev A.A., Sychev V.P. Ashpiz E.S, Lustkii S.Ya. Modelling of the Dynamic Contact between a Wheel of a Moving Railway Vehicle and Rails with Evaluation of Defects Emerging upon Their Interaction. Part 2. Contact Problem in the Presence of Defects // Applied Mathematical Sciences, Vol. 11, 2017, no. 10, 481 – 488
170. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка./Д.В. Гаскаров, В.И. Шаповалов// -М.: Статистика, 1978 - 258 с.
171. Куллдорф Г. Введение в теорию оценивания по группированным и частично группированным выборкам / Г. Куллдорф. - М. : Наука, 1966. - 176 с. 212.
172. ГОСТ 27.504-84 Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по цензурированным выборкам. -М.; Стандарты, 1984 - 41 с.
173. РД 50-639-87. Методические указания. Надежность в технике. Расчет показателей надежности. Общие положения. – М.: Издательство стандартов, 1987 – 45 с.

174. Parzen E. On the estimation of a probability density function and mode // *Annals of Mathematical Statistics*. — 1962. — Vol. 33. — Pp. 1065–1076.
175. Jordan M. I., Xu L. Convergence results for the EM algorithm to mixtures of experts architectures: Tech. Rep. A.I. Memo No. 1458: MIT, Cambridge, MA, 1993.
176. Шлезингер М., Главач В. Десять лекций по статистическому и структурному распознаванию. — Киев: Наукова думка, 2004. — 554 с.
177. Епанечников В. А. Непараметрическая оценка многомерной плотности вероятности // *Теория вероятностей и её применения*. — 1969. — No 1. — С. 156 – 161.
178. ГОСТ 27.502-83. Надежность в технике. Система сбора и обработки информации. Планирование наблюдений.- М.: Издательство стандартов, 1983 – 26 с.
179. Сычев П.В. Алгоритмы классификации методов восстановления плотности распределения отступлений от норм содержания рельсовой колеи в системе технического обслуживания железнодорожного пути// в сб. Наука и образование транспорту: материалы XI Международной научно-практической конференции (2018, Самара). Международная научно-практическая конференция «Наука и образование транспорту», 2018 г. Том 2 / редкол.: Д.В. Железнов [и др.] – Самара: СамГУПС, 2018. – С. 170-173
180. Конаков В.П., Певзнер В.О. Комплексная оценка пути и сооружений//Путь и путевое хозяйство. 2007.№12. С. 5-7
181. Loktev A, Sychev V., Gluzberg B. and Gridasova E. Modeling the dynamic behavior of railway track taking into account the occurrence of defects in the system wheel-rail // *MATEC Web of Conferences* 117, 00108 (2017). XXVI R-S-P Seminar 2017, Theoretical Foundation of Civil Engineering – P. 1-6
182. Зензинов Б.Н., Сычев П.В., Трушина Ю.Р. Экспериментальная проверка моделей определения закономерностей появления отступлений в содержании рельсовой колеи в условиях не полной информации/Б.Н. Зензинов, П.В. Сычев, Ю.Р. Трушина//Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2018.- № 3. С. 66-77.

183. Сычев П.В., Кошелев Р.Ю., Сорокин Г.И., Сычев В.П. Прогнозирование остаточного ресурса специального подвижного состава на основе цензурированных выборок/П.В. Сычев, Р.Ю. Кошелев, Г.И.Сорокин, В. П Сычев// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство - 2008. - № 2. - С. 34
184. Хинчин, А. Я. Работы по математической теории массового обслуживания / А. Я. Хинчин. – М. : Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963. – 236
185. Локтев А.А., Сычева А.В., Запольнова Е.В., Сычев В.П., Дмитриев В. Исследование особенностей динамической реакции верхнего строения железнодорожного пути от подвижного состава на основе модели трансверсально-изотропной пластины на деформируемом основании/А.А.Локтев, А.В. Сычева, Е.В. Запольнова//Проблемы машиностроения и автоматизации.- 2018. - № 2. - С. 55-65.
186. Соболевский А. Н. Теория вероятностей и основы математической статистики для физиков/А.Н. Соболевский — М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007.
187. Абдурашитов Ю.А., Сычев В.П., Абдурашитов А.Ю. Оценка влияния воздействия подвижного состава с различной нагрузкой на ось на железнодорожный путь с различной толщиной балластного слоя и элементами верхнего строения пути на основе моделирования/Ю.А. Абдурашитов, В.П. Сычев, А.Ю. Абдурашитов// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство.- 2018.- № 12. - С. 58-64.
188. Сычев П.В. Повышение информативности диагностики СПС/П.В. Сычев// Путь и путевое хозяйство - 2015. - №1.- С.28-30;
189. Балух, Хенрик. Диагностика верхнего строения пути / Хенрик Балух; Пер. с польского И. В. Шварца. - М. : Транспорт, 1981.
190. Локтев, А.А. Методика определения внешних дефектов сооружения путем анализа серии его изображений в системе мониторинга/А.А. Локтев, В.Ф. Бахтин, И.Ю. Черников, Д.А. Локтев//Вестник МГСУ. -2015. -№3. -С. 7-16.

191. Veerender R.B., Acharya K.L.N., Srinivas J., Mohan D. Depth Estimation Using Blur Estimation in Video/R.B. Veerender, K.L.N. Acharya, J.Srinivas, D.Mohan//International Journal of Electronics and Computer Science Engineering – 2013. - № 4. - P. 2350-2354.
192. Сычев, В.П. Моделирование системы мониторинга железнодорожного пути для повышения информативности оценки его содержания/В.П. Сычев, А.А. Локтев, Д.А. Локтев, К.А. Изотов//В книге: Мобильный бизнес: перспективы развития и реализации систем радиосвязи в России и за рубежом сборник материалов (тезисов) XXXVIII международной конференции РАЕН. -2016. -С. 11-13.
193. Локтев, А.А. Автоматизированная система выявления дефектов колес подвижного состава на основе оценки ударного неосесимметричного воздействия колеса на рельс при моделировании верхнего строения пути ортотропной пластиной/А.А. Локтев, В.П. Сычев, Д.А. Локтев, В.Г. Дмитриев//Проблемы машиностроения и автоматизации. -2017. -№4. -С. 59-70.
194. Локтев А.А., Локтев Д.А. Метод определения расстояния до объекта путем анализа размытия его изображения/ А.А. Локтев, Д.А. Локтев//Вестник МГСУ. – 2015 - № 6 - С. 140-151.
195. Elder J.H., Zucker S.W. Local scale control for edge detection and blur estimation/ J.H. Elder//IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence. - 1998. - No. 7. Pp. 120-127.
196. Jones, M., Viola, P. (2001) Robust Real-Time Face Detection. URL: International Journal of Computer Vision. – 2004 - 57(2), 137-154 – Режим доступа: <http://www.vision.caltech.edu/html-files/EE148-2005-Spring/pprs/viola04ijcv.pdf>
197. Организация механизированного текущего содержания пути //Сб. научн. тр./ВНИИЖТ. -М.: Транспорт, 1966. -Вып.303. -135с.
198. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути - Москва: ИНФРА-М, 2017.
199. Броневиц А.Г., Розенберг И.Н.Применение моделей неточных вероятностей в математической теории важности критериев/А.Г. Броневиц// Автоматика и

телемеханика.- 2017. - № 8. - С. 127-144.

200. Розенберг И.Н. Управление в условиях неопределенности/ И.Н. Розенберг //Современные технологии управления.- 2017. - № 7.- С. 1.

201. Сычев П.В., Кузнецова Л.А., Джанполодова Л.А. и др. «Привод перемещения крышки люка грузового вагона, Патент № 124901 опубликовано 20.02.2013, бюл. № 5

202. Сычев П.В., Михович М.В., Сычев В.П. Крышка разгрузочного люка вагона -хопера и вагон хоппер, Патент № 129470, опубликовано 27.06.2013, бюл. № 18

203. Сычев В.П., Шаринов И.Л., Кочнов А.Д., Самохин С.А. Прочность хоппер-дозаторов./В.П. Сычев// Путь и путевое хозяйство.- 1999.- № 7 - С. 14-16.

204. Гидропривод стационарных и мобильных объектов: (конспект лекций) / О. Ф. Никитин, В. В. Феденков ; Московский гос. технический ун-т им. Н. Э. Баумана. - Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.

205. Следящие приводы: В 2 кн. / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Б. К. Чемоданова. - Москва : Энергия, 1976

206. Технический регламент ТС «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011), утвержден Решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 г. № 710;

207. Феденков В.В., Сычев В.П. Обоснование выбора схем гидропривода для синхронизации работы машин и механизмов при ремонтах железнодорожного пути/В.В.Феденков// Вестник ВНИИЖТ.- 2012 - № 6 - С.50-55.

208. Ададуров С.Е., Долганюк С.И., Замышляев А.М., Ильичёв М.В., Розенберг Е.Н., Розенберг И.Н., Савицкий А.Г., Тамаркин В.М., Уманский В.И. Пульт дистанционного управления маневровым локомотивом//патент на полезную модель RUS 102572 29.09.2010

209. Розенберг И.Н. Дистанционное управление подвижными объектами/И.Н. Розенберг//Славянский форум.- 2016.- № 3 (13).- С. 229-235.

210. Данилов К.В., Сычев В.П. Об автоматизации управления выгрузкой балластных материалов/К.В. Данилов//Путь и путевое хозяйство.- 2014.- № 9.- С. 24-27.

211. Сычев В.П. Гордеев Л.А. Дистанционное управление разгрузочными устройствами вагонов в сб. /В.П. Сычев//Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство: 6-я международная научно-практическая конференция. Сборник материалов. Москва, МГУПС –МИИТ – 2013.-№ 6 – С.122-126;
212. Ikemori Masai, Itagaki Yoshishka. Same statistical characteristics of track irregularities/Masai Ikemori// Quart.Repts Railway Thech. Res. Inst. – 1976-№17.
213. Явна В.А., Кругликов А.А., Хакиев З.Б., Шаповалов В.Л., Окост М.В., Морозов А.В. Оценка динамического воздействия подвижного состава на объекты железнодорожной инфраструктуры/В.А. Явна// Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. - 2014. - № 2 (26). - С. 33-35.
214. Сычев П.В., Кузнецова Л.А., Джанполадова Л.А. и др. Съёмное оборудование железнодорожной платформы для перевозки длиномерных материалов, Патент № 128576, опубликовано 27.05.2013, бюл. № 15
215. Сычев П.В., Иванников К.Н., Грачев Л.А. и др. Рама железнодорожного грузового транспортного средства, Патент № 138730 опубликован 20.03.2014 в бюл. № 8
216. Сычев П.В., Кузнецова Л.А., Михович М.В. и др. Способ модернизации хоппер-дозатора, Патент, заявка № 2526781 опубликовано 27.08.2014, бюл. № 24
217. Сычев П.В., Веселов А.М., Михович М.В. и др. Способ реконструкции железнодорожного вагона при проведении ремонта и кузов железнодорожного вагона, патент № 2577960, 24.11.2014, опубликовано 20.03.2016 г. Бюл. № 8.
218. Сычев П.В., Михович М.В., Сычев В.П. Железнодорожный вагон, контейнер, устройство направленной выгрузки материалы из бункера (варианты), патент №105870; 04.04.2011, опубликовано 27.06.2011, Бюл. № 18
219. Патент РФ № 2643322. 29.07.2016 г. «Рама вагона- платформы и вагон-платформа» Сычев В.П., Михович М.В., Сычев П.В., Косарев А.В., Баранов И.В., Б.И. № 4 от 31.01.2018
220. Овчинников Д.В., Покацкий В.А., Абдурашитов А.Ю., Сычев П.В. Верификация математических моделей и проведение расчетов предельного

состояния эксплуатационного ресурса по комплексному показателю долговечности рельсов с учетом кодов дефектов 21.1, 21.2, 53.1,69/Д.В. Овчинников//Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство.-2018. -№ 13.- С. 18-32.

221. Сычев П.В., Моричев Д.А., Узянов А.А., Гаврилюк Д.Я., Михович М.В., Ильичев М.П., Сычев В.П. Модальное построение подвижного состава для транспортирования грузов специального назначения/П.В. Сычев// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. -2018. Т- № 12.- С. 65-73.

222. Сычев П.В., Кузнецова Н.В., Самойлов А.А. Совершенствование конструкции путевых машин для работы с балластом/П.В. Сычев//Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2016. - № 9 (9).- С. 274-279.

223. Сычев П.В. Мониторинг ресурса специального подвижного состава хозяйства пути в системе технического обслуживания железнодорожного пути/П.В. Сычев// Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. - 2014.-. № 7 (7).- С. 161-167.

224. Howard B. Wilson·Robert W. Scharstein. Computing elliptic membrane high frequencies by Mathieu and Galerkin methods // J Eng Math (2007) 57:41–55.

225. В. А. Troesch and H. R. Troesch. Eigenfrequencies of an Elliptic Membrane // Mathematics of computation, volume 27, number 124, October 1973, pp. 755-765.

226. Agrawal, G. P. Nonlinear fiber optics / G.P. Agrawal. – Boston: Academic Press. – 2009. – 466 p.

227. Loktev A.A., Loktev D.A. Transverse impact of a ball on a sphere with allowance for waves in the target // Technical Physics Letters. 2008. Т. 34. № 11. С. 960-963.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Исходные данные и результаты расчетов по экспериментальным исследованиям оценки изменения закономерностей состояния железнодорожного пути на основе адаптивных моделей

Таблица П.1. Средняя балльная оценка выбранных участков пути на 10 км

дата	№ участков			
	1	2	3	4
дек.14	44	98	40	40
январ.15	43	89	44	37
февр.15	39	67	37	30
март.15	41	76	43	40
апр.15	49	89	51	50
май.15	38	72	50	43
июнь.15	39	60	39	43
июль.15	38	57	37	39
авг.15	32	55	38	40
сент.15	45	56	39	44
окт.15	52	63	45	50
нояб.15	51	62	46	51
дек.15	46	76	50	49
январ.16	47	70	47	37
февр.16	36	67	52	65
март.16	67	59	60	61
апр.16	43	61	54	65
май.16	39	45	61	58
июнь.16	41	44	56	39
июль.16	34	32	48	37
авг.16	39	41	56	55
сент.16	30	45	51	48

окт.16	41	39	55	56
нояб.16	40	37	44	39
дек.16	39	41	50	38
январ.17	46	92	38	28
февр.17	45	89	44	38
март.17	39	80	36	31
апр.17	60	89	47	40
май.17	54	78	40	35
июнь.17	50	77	41	35
июль.17	45	49	35	30
авг.17	41	46	36	33
сент.17	56	53	37	31
окт.17	65	87	34	32
нояб.17	54	67	30	30
дек.17	49	61	31	28
январ.18	51	72	36	34

Таблица П.2. - Динамика отступлений на 10 км пути на участках 1 и 2

Период	№ участков		№ участков	
	1	2	1	2
	Перекосы		Просадки	
декабрь	32,0	52,0	45,0	32,0
январь	31,0	45,0	39,0	34,0
февраль	34,0	50,0	47,0	40,0
зима 2014-2015	97,0	147,0	131,0	106,0
среднее за зиму	32,3	49,0	43,7	35,3
март	30,0	33,0	24,0	32,0
апрель	32,0	34,0	23,0	30,0
май	24,0	29,0	12,0	20,0

Весна 15	86,0	96,0	59,0	82,0
среднее	28,7	32,0	19,7	27,3
июнь	22,0	20,0	24,0	24,0
июль	20,0	17,0	18,0	20,0
август	19,0	18,0	20,0	17,0
Лето 15	61,0	55,0	62,0	61,0
среднее	20,3	18,3	20,7	20,3
сентябрь	28,0	22,0	17,0	16,0
октябрь	24,0	20,0	18,0	18,0
ноябрь	27,0	24,0	20,0	19,0
Осень 15	79,0	66,0	55,0	53,0
среднее	26,3	22,0	18,3	17,7
декабрь	42,0	53,0	31,0	66,0
январь	40,0	55,0	32,0	59,0
февраль	44,0	50,0	27,0	61,0
зима 15-16	126,0	158,0	90,0	186,0
среднее	42,0	52,7	30,0	62,0
март	44,0	55,0	29,0	65,0
апрель	41,0	58,0	30,0	60,0
май	42,0	57,0	28,0	62,0
весна 16	127,0	170,0	87,0	187,0
среднее	42,3	56,7	29,0	62,3
июнь	25,0	45,0	26,0	56,0
июль	19,0	40,0	20,0	41,0
август	20,0	34,0	15,0	30,0
лето 16	64,0	119,0	61,0	127,0
среднее	21,3	39,7	20,3	42,3
сентябрь	21,0	20,0	17,0	31,0
октябрь	24,0	24,0	18,0	30,0

ноябрь	19,0	22,0	19,0	30,0
Осень 16	64,0	66,0	54,0	91,0
среднее	21,3	22,0	18,0	30,3
декабрь	15,0	25,0	18,0	34,0
январь	15,0	27,0	15,0	36,0
февраль	16,0	24,0	17,0	40,0
Зима 16 - 17	46,0	76,0	50,0	110,0
среднее	15,3	25,3	16,7	36,7
март	29,0	29,0	17,0	44,0
апрель	25,0	32,0	18,0	40,0
май	25,0	28,0	18,0	37,0
Весна 17	79,0	89,0	53,0	121,0
среднее	26,3	29,7	17,7	40,3
июнь	27,0	20,0	19,0	43,0
июль	30,0	19,0	21,0	40,0
август	25,0	19,0	21,0	35,0
Лето 17	82,0	58,0	61,0	118,0
среднее	27,3	19,3	20,3	39,3
сентябрь	40,0	21,0	20,0	41,0
октябрь	35,0	28,0	24,0	44,0
ноябрь	29,0	18,0	32,0	35,0
осень 17	104,0	67,0	76,0	120,0
среднее	34,7	22,3	25,3	40,0
	Рихтовка		По ширине колеи	
	1	2	1	2
декабрь	35,0	65,0	16,0	30,0
январь	35,0	64,0	15,0	38,0
февраль	32,0	66,0	10,0	33,0
Зима 14 - 15	102,0	195,0	41,0	101,0

среднее	34,0	65,0	13,7	33,7
март	34,0	54,0	12,0	23,0
апрель	36,0	55,0	18,0	26,0
май	37,0	56,0	15,0	24,0
Весна 15	107,0	165,0	45,0	73,0
среднее	35,7	55,0	15,0	24,3
июнь	34,0	30,0	20,0	21,0
июль	35,0	34,0	17,0	23,0
август	37,0	29,0	21,0	21,0
Лето 15	106,0	93,0	58,0	65,0
среднее	35,3	31,0	19,3	21,7
сентябрь	40,0	34,0	20,0	31,0
октябрь	37,0	37,0	21,0	34,0
ноябрь	45,0	35,0	23,0	32,0
Осень 15	122,0	106,0	64,0	97,0
декабрь	43,0	54,0	30,0	68,0
январь	42,0	52,0	32,0	67,0
февраль	44,0	53,0	31,0	67,0
Зима 15 - 16	129,0	159,0	93,0	202,0
среднее	43,0	53,0	31,0	67,3
март	45,0	54,0	29,0	65,0
апрель	48,0	60,0	28,0	68,0
май	41,0	57,0	28,0	59,0
Весна 16	134,0	171,0	85,0	192,0
среднее	44,7	57,0	28,3	64,0
июнь	22,0	50,0	25,0	48,0
июль	21,0	40,0	12,0	35,0
август	23,0	43,0	13,0	32,0
Лето 16	66,0	133,0	50,0	115,0

среднее	22,0	44,3	16,7	38,3
сентябрь	20,0	20,0	17,0	33,0
октябрь	18,0	22,0	22,0	30,0
ноябрь	20,0	19,0	19,0	27,0
Осень 16	58,0	61,0	58,0	90,0
среднее	19,3	20,3	19,3	30,0
декабрь	17,0	25,0	15,0	44,0
январь	15,0	26,0	17,0	49,0
февраль	15,0	25,0	16,0	48,0
Зима 16 - 17	47,0	76,0	48,0	141,0
среднее	15,7	25,3	16,0	47,0
март	25,0	30,0	17,0	39,0
апрель	30,0	34,0	19,0	41,0
май	19,0	32,0	15,0	39,0
Весна 17	74,0	96,0	51,0	119,0
среднее	24,7	32,0	17,0	39,7
июнь	25,0	18,0	19,0	50,0
июль	25,0	20,0	20,0	53,0
август	26,0	18,0	20,0	51,0
Лето 17	76,0	56,0	59,0	154,0
среднее	25,3	18,7	19,7	51,3
сентябрь	30,0	21,0	24,0	48,0
октябрь	32,0	30,0	27,0	61,0
ноябрь	26,0	23,0	19,0	58,0
осень 17	88,0	74,0	70,0	167,0
среднее	29,3	24,7	23,3	55,7

Таблица П.3 - Динамика отступлений на 10 км пути участков 3 и 4

дата	№ участков		№ участков	
	3	4	3	4
	Перекосы		просадки	
декабрь	30,0	49,0	50,0	34,0
январь	31,0	45,0	39,0	34,0
февраль	34,0	47,0	47,0	41,0
зима 2014-2015	95,0	141,0	136,0	109,0
среднее за зиму	31,7	47,0	45,3	36,3
март	29,0	33,0	25,0	50,0
апрель	32,0	34,0	19,0	47,0
май	24,0	29,0	12,0	38,0
Весна 15	85,0	96,0	56,0	135,0
среднее	28,3	32,0	18,7	45,0
июнь	19,0	20,0	24,0	24,0
июль	20,0	17,0	18,0	20,0
август	21,0	18,0	22,0	17,0
Лето 15	60,0	55,0	64,0	61,0
среднее	20,0	18,3	21,3	20,3
сентябрь	29,0	22,0	19,0	16,0
октябрь	24,0	20,0	18,0	19,0
ноябрь	28,0	25,0	20,0	19,0
Осень 15	81,0	67,0	57,0	54,0
среднее	27,0	22,3	19,0	18,0
декабрь	40,0	53,0	31,0	66,0
январь	40,0	55,0	33,0	59,0
февраль	44,0	50,0	27,0	67,0
зима 15-16	124,0	158,0	91,0	192,0
среднее	41,3	52,7	30,3	64,0

март	49,0	55,0	34,0	65,0
апрель	41,0	58,0	30,0	59,0
май	42,0	57,0	28,0	62,0
весна 16	132,0	170,0	92,0	186,0
среднее	44,0	56,7	30,7	62,0
июнь	27,0	45,0	26,0	55,0
июль	19,0	40,0	20,0	41,0
август	20,0	31,0	15,0	38,0
лето 16	66,0	116,0	61,0	134,0
среднее	22,0	38,7	20,3	44,7
сентябрь	29,0	30,0	17,0	31,0
октябрь	24,0	26,0	18,0	38,0
ноябрь	17,0	22,0	19,0	30,0
Осень 16	70,0	78,0	54,0	99,0
среднее	23,3	26,0	18,0	33,0
декабрь	18,0	23,0	29,0	30,0
январь	15,0	27,0	18,0	36,0
февраль	14,0	24,0	17,0	40,0
Зима 16 - 17	47,0	74,0	64,0	106,0
среднее	15,7	24,7	21,3	35,3
март	30,0	29,0	17,0	50,0
апрель	25,0	38,0	18,0	40,0
май	27,0	28,0	19,0	41,0
Весна 17	82,0	95,0	54,0	131,0
среднее	27,3	31,7	18,0	43,7
июнь	28,0	22,0	19,0	43,0
июль	30,0	19,0	22,0	40,0
август	25,0	19,0	21,0	35,0
Лето 17	83,0	60,0	62,0	118,0

среднее	27,7	20,0	20,7	39,3
Сентябрь	27	20	27	40
Октябрь	25	17	19	42
ноябрь	28	17	20	32
Осень17	80	54	66	114
среднее	26,7	18,0	22,0	38,0
	Рихтовка		По ширине колеи	
	3	4	3	4
декабрь	36,0	70,0	21,0	30,0
январь	49,0	64,0	15,0	37,0
февраль	39,0	66,0	23,0	32,0
Зима 14 - 15	124,0	200,0	59,0	99,0
среднее	41,3	66,7	19,7	33,0
март	40,0	57,0	10,0	17,0
апрель	36,0	55,0	38,0	26,0
май	37,0	56,0	27,0	24,0
Весна 15	113,0	168,0	75,0	67,0
среднее	37,7	56,0	25,0	22,3
июнь	40,0	30,0	20,0	26,0
июль	35,0	23,0	15,0	23,0
август	37,0	29,0	21,0	20,0
Лето 15	112,0	82,0	56,0	69,0
среднее	37,3	27,3	18,7	23,0
сентябрь	43,0	34,0	27,0	31,0
октябрь	37,0	37,0	26,0	40,0
ноябрь	45,0	35,0	23,0	32,0
Осень 15	125,0	106,0	76,0	103,0
декабрь	43,0	54,0	30,0	68,0
январь	42,0	52,0	32,0	67,0

февраль	44,0	53,0	31,0	67,0
Зима 15 - 16	129,0	159,0	93,0	202,0
среднее	43,0	53,0	31,0	67,3
март	46,0	69,0	29,0	65,0
апрель	48,0	63,0	31,0	70,0
май	41,0	57,0	28,0	59,0
Весна 16	135,0	189,0	88,0	194,0
среднее	45,0	63,0	29,3	64,7
июнь	22,0	50,0	25,0	48,0
июль	21,0	40,0	12,0	35,0
август	23,0	43,0	13,0	32,0
Лето 16	66,0	133,0	50,0	115,0
среднее	22,0	44,3	16,7	38,3
сентябрь	23,0	17,0	24,0	33,0
октябрь	17,0	25,0	32,0	30,0
ноябрь	20,0	19,0	19,0	21,0
Осень 16	60,0	61,0	75,0	84,0
среднее	20,0	20,3	25,0	28,0
декабрь	15,0	25,0	15,0	44,0
январь	26,0	17,0	31,0	31,0
февраль	15,0	25,0	16,0	48,0
Зима 16 - 17	56,0	67,0	62,0	123,0
среднее	18,7	22,3	20,7	41,0
март	35,0	32,0	21,0	34,0
апрель	30,0	36,0	19,0	41,0
май	19,0	32,0	17,0	39,0
Весна 17	84,0	100,0	57,0	114,0
среднее	28,0	33,3	19,0	38,0
июнь	40,0	21,0	15,0	39,0

июль	25,0	20,0	20,0	53,0
август	26,0	17,0	30,0	51,0
Лето 17	91,0	58,0	65,0	143,0
среднее	30,3	19,3	21,7	47,7
сентябрь	16	8	10	30
октябрь	18	20	19	60
ноябрь	23	25	29	49
осень 17	57	53	58	139
среднее	19,0	17,7	19,3	46,3

Таблица П.4. Динамика среднеквадратичных отклонений (СКО) на участке
испытаний

Период	№ участков		№ участков	
	1	2	1	2
	Просадки		перекосы	
декабрь 2014	2,25	1,7	3,73	2,5
январь 2015	2,24	1,73	3,69	2,48
февраль 2015	2,26	1,69	3,71	2,51
март 2015	2,25	1,7	3,73	2,52
апрель 2015	2,27	1,72	3,74	2,54
май 2015	2,27	1,72	3,72	2,55
июнь 2015	2,26	1,71	3,73	2,52
июль 2015	2,25	1,73	3,74	2,5
август 2015	2,26	1,72	3,73	2,54
сентябрь 2015	2,28	1,71	3,72	2,54
октябрь 2015	2,29	1,72	3,76	2,56
ноябрь 2015	2,27	1,72	3,74	2,56
декабрь 2015	2,26	1,73	3,75	2,53
январь 2016	2,28	1,74	3,73	2,54
февраль 2016	2,26	1,73	3,72	2,54

март 2016	2,29	1,75	3,77	2,55
апрель 2016	2,31	1,74	3,75	2,52
май 2016	2,28	1,73	3,73	2,56
июнь 2016	2,27	1,73	3,72	2,55
июль 2016	2,26	1,74	3,74	2,55
август 2016	2,26	1,75	3,71	2,53
сентябрь 2016	2,27	1,74	3,75	2,57
октябрь 2016	2, 28	1,75	3,76	2,58
ноябрь 2016	2,25	1,74	3,74	2,54
декабрь 2016	2,25	1,73	3,73	2,56
январь 2017	2,27	1,76	3,75	2,54
февраль 2017	2,26	1,74	3,75	2,56
март 2017	2,28	1,75	3,76	2,58
апрель 2017	2,29	1,76	3,76	2,54
май 2017	2,25	1,73	3,73	2,54
июнь 2017	2,24	1,74	3,72	2,56
июль 2017	2,25	1,73	3,73	2,55
август 2017	2,26	1,72	3, 69	2,54
сентябрь 2017	2,28	1,74	3,74	2,56
октябрь 2017	2,3	1,75	3,77	2,57
ноябрь 2017	2,31	1,74	3,75	2,56
	1	2	1	2
	Рихтовка		ширина колеи	
декабрь 2014	2, 20	1,38	2,35	1,93
январь 2015	2,19	1,39	2,31	1,94
февраль 2015	2,21	1,39	2,33	1,9
март 2015	2,23	1,39	2,34	1,95
апрель 2015	2,22	1,42	2,37	1,95
май 2015	2,21	1,40	2,33	1,94

июнь 2015	2,21	1,39	2,34	1,96
июль 2015	2,2	1,39	2,34	1,94
август 2015	2,22	1,38	2,36	1,93
сентябрь 2015	2,21	1,40	2,35	1,97
октябрь 2015	2,21	1,41	2,38	1,97
ноябрь 2015	2,22	1,41	2, 37	1,93
декабрь 2015	2,22	1,39	2,36	1,94
январь 2016	2,21	1,40	2,35	1,92
февраль 2016	2,22	1,40	2,37	1,94
апрель 2016	2,23	1,44	2,37	1,97
май 2016	2,21	1,41	2, 37	1,96
июнь 2016	2,21	1,40	2,36	1,98
июль 2016	2,23	1,39	2,38	1,92
август 2016	2,23	1,40	2,36	1,93
сентябрь 2016	2,25	1,41	2,39	1,97
октябрь 2016	2,23	1,44	2,39	1,96
ноябрь 2016	2,24	1,42	2,36	1,97
декабрь 2016	2,24	1,41	2,37	1,94
январь 2017	2,24	1,42	2,36	1,95
февраль 2017	2,23	1,43	2,35	1,96
март 2017	2,28	1,44	2,38	1,99
апрель 2017	2,27	1,47	2,38	1,98
май 2017	2,25	1,45	2,36	1,95
июнь 2017	2,26	1,46	2,35	1,95
июль 2017	2,26	1,43	2,34	1,96
август 2017	2,25	1,43	2,34	1,92
сентябрь 2017	2,26	1,42	2,35	1,93
октябрь 2017	2,26	1,46	2,37	1,98
ноябрь 2017	2,25	1,44	2,35	1,95

Таблица П.5. Динамика индекса неровности геометрии колеи Со

дата	№ участков	
	1	2
декабрь 2014	1,67	1,16
январь 2015	1,7	1,17
февраль 2015	1, 68	1,2
март 2015	1,69	1,19
апрель 2015	1,76	1,18
май 2015	1,74	1,18
июнь 2015	1,77	1,19
июль 2015	1,68	1,2
август 2015	1,78	1,2
сентябрь 2015	1,74	1,22
октябрь 2015	1,75	1,21
ноябрь 2015	1,79	1,22
декабрь 2015	1,8	1,23
январь 2016	1,71	1,23
февраль 2016	1,69	1,24
март 2016	1,73	1,25
апрель 2016	1,76	1,24
май 2016	1,73	1,27
июнь 2016	1,78	1,25
июль 2016	1,79	1,26
август 2016	1,81	1,27
сентябрь 2016	1,82	1,28
октябрь 2016	1,76	1,28
ноябрь 2016	1,78	1,27
декабрь 2016	1,73	1,29
январь 2017	1,74	1,28
февраль 2017	1,78	1,29

март 2017	1,78	1,31
апрель 2017	1,79	1,32
май 2017	1,8	1,31
июнь 2017	1,76	1,3
июль 2017	1,75	1,35
август 2017	1,75	1,34
сентябрь 2017	1,77	1,34
октябрь 2017	1,79	1,36
ноябрь 2017	1,78	1,35

Таблица П.6 Показатели регрессионной статистики математических моделей прогнозирования закономерностей появления неисправностей рельсовой колеи

<i>Регрессионная статистика</i>	<i>перекосов с балльной оценкой участка</i>	<i>Ширины колеи и балльной оценки</i>
Множественный R	0,357923612	0,32080617
R-квадрат	0,128109312	0,102916599
Нормированный R-квадрат	0,102465469	0,076531793
Стандартная ошибка	8,051561154	8,167055121
Наблюдения	36	36

Таблица П.7. Дисперсионный анализ перекосов с балльной оценкой

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i> ^{Значимость F}
Регрессия	1	323,860	323,860	4,990,032086
Остаток	34	2204,139	64,8276	
Итого	35	2528		

	<i>Коэффициенты</i>	<i>Стандартная ошибка</i>	<i>t-статистика</i>	<i>P-Значение</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхние 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y-пересечение	34,55847	4,71734976	7,32582	1,73	24,97167	44,145	24,9716	44,1452
Переменная X 1	0,358516	0,16040243	2,23510	0,03	0,032540	0,6844	0,03254	0,68449

Таблица П.8 Дисперсионный анализ ширины колеи с балльной оценкой

	<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Значимо сть F</i>
Регресси я	1	260,1731	260,173	3,9006	0,05643
Остаток	34	2267,826	66,7007		
Итого	35	2528			

	<i>Коэффи циенты</i>	<i>Стандартна я ошибка</i>	<i>t- статис тика</i>	<i>P- значен ие</i>	<i>Нижние 95%</i>	<i>Верхни е 95%</i>	<i>Нижние 95,0%</i>	<i>Верхние 95,0%</i>
Y- пересече ние	35,05133	5,05523	6,93366	5,4259	24,7778	45,3248	24,77786	45,32481
Перемен ная X 1	0,479434	0,24275	1,9749	0,0564	-0,0138	0,9727	-0,01389	0,972766

Таблица П.9 Оценка вероятности прогноза для перекосов

ВЫВОД ОСТАТКА

ВЫВОД
ВЕРОЯТНОСТИ

<i>Наблюдение</i>	<i>Предсказанное Y</i>	<i>Остатки</i>	<i>Персентиль</i>	<i>Y</i>
1	46,03102296	-2,031022964	1,388888889	30
2	45,67250598	-2,672505981	4,166666667	32
3	46,74805693	-7,748056931	6,944444444	34
4	45,313989	-4,313988998	9,722222222	36
5	46,03102296	2,968977036	12,5	38
6	43,1628871	-5,162887098	15,27777778	38
7	42,44585313	-3,445853132	18,05555556	39
8	41,72881917	-3,728819165	20,83333333	39
9	41,37030218	-9,370302182	23,61111111	39
10	44,59695503	0,403044969	26,38888889	39
11	43,1628871	8,837112902	29,16666667	39
12	44,23843805	6,761561952	31,94444444	39

13	49,6161928	-3,616192797	34,72222222	40
14	48,89915883	-1,89915883	37,5	41
15	50,33322676	-14,33322676	40,27777778	41
16	50,33322676	16,66677324	43,05555556	41
17	49,25767581	-6,257675813	45,83333333	41
18	49,6161928	-10,6161928	48,61111111	43
19	43,52140408	-2,521404081	51,38888889	43
20	41,37030218	-7,370302182	54,16666667	44
21	41,72881917	-2,728819165	56,94444444	45
22	42,08733615	-12,08733615	59,72222222	45
23	43,1628871	-2,162887098	62,5	45
24	41,37030218	-1,370302182	65,27777778	46
25	39,93623425	-0,936234249	68,05555556	46
26	39,93623425	6,063765751	70,83333333	47
27	40,29475123	4,705248768	73,61111111	49
28	44,95547201	-5,955472014	76,38888889	50
29	43,52140408	16,47859592	79,16666667	51
30	43,52140408	10,47859592	81,94444444	52
31	44,23843805	5,761561952	84,72222222	54
32	45,313989	-0,313988998	87,5	54
33	43,52140408	-2,521404081	90,27777778	56
34	48,89915883	7,10084117	93,05555556	60
35	47,10657391	17,89342609	95,83333333	65
36	44,95547201	9,044527986	98,61111111	67

Таблица П.10 Оценка вероятности прогноза по ширине колеи

ВЫВОД ОСТАТКА			ВЫВОД ВЕРОЯТНОСТИ	
<i>Наблюдение</i>	<i>Предсказанное Y</i>	<i>Остатки</i>	<i>Персентиль</i>	<i>Y</i>
1	46,03102296	-2,031022964	1,388888889	30
2	45,67250598	-2,672505981	4,166666667	32
3	46,74805693	-7,748056931	6,944444444	34
4	45,313989	-4,313988998	9,722222222	36
5	46,03102296	2,968977036	12,5	38
6	43,1628871	-5,162887098	15,27777778	38
7	42,44585313	-3,445853132	18,05555556	39
8	41,72881917	-3,728819165	20,83333333	39
9	41,37030218	-9,370302182	23,61111111	39
10	44,59695503	0,403044969	26,38888889	39
11	43,1628871	8,837112902	29,16666667	39
12	44,23843805	6,761561952	31,94444444	39
13	49,6161928	-3,616192797	34,72222222	40
14	48,89915883	-1,89915883	37,5	41
15	50,33322676	-14,33322676	40,27777778	41
16	50,33322676	16,66677324	43,05555556	41
17	49,25767581	-6,257675813	45,83333333	41
18	49,6161928	-10,6161928	48,61111111	43
19	43,52140408	-2,521404081	51,38888889	43
20	41,37030218	-7,370302182	54,16666667	44
21	41,72881917	-2,728819165	56,94444444	45
22	42,08733615	-12,08733615	59,72222222	45
23	43,1628871	-2,162887098	62,5	45
24	41,37030218	-1,370302182	65,27777778	46
25	39,93623425	-0,936234249	68,05555556	46
26	39,93623425	6,063765751	70,83333333	47
27	40,29475123	4,705248768	73,61111111	49
28	44,95547201	-5,955472014	76,38888889	50
29	43,52140408	16,47859592	79,16666667	51
30	43,52140408	10,47859592	81,94444444	52
31	44,23843805	5,761561952	84,72222222	54
32	45,313989	-0,313988998	87,5	54
33	43,52140408	-2,521404081	90,27777778	56
34	48,89915883	7,10084117	93,05555556	60
35	47,10657391	17,89342609	95,83333333	65

Таблица П.11 - Величины пороговых значений СКО параметров пути

Установленная скорость, (км/ч)	СКО просадок (мм)	СКО перекосов (мм)	θ
200	1,25	1,20	0,57
180	1,45	1,30	0,62
160	1,65	1,40	0,67
140	1,85	1,60	0,81
120 (базовая)	2,00	2,05	1,00
100	2,40	2,45	1,23
80	3,00	2,90	1,48
60	3,85	3,30	1,72
40	4,90	4,10	2,11
15	6,00	5,20	2,61

Таблица П.12 Анализ изменения характеристик кривых в процессе эксплуатации

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Km	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86	86
m	821	825	827	835	812	816	817	824	819	826	814	819
Lk	151	148	159	151	148	149	144	139	139	152	163	163
L1	110	103	99	97	104	99	98	95	107	91	98	84
L2	97	112	105	88	109	109	118	115	109	110	100	103
dL	4	10	9	8	5	7	6	9	7	11	7	5
mxL	8	17	15	20	10	15	12	15	13	23	15	17
R	1075	1050	1055	1055	1050	1045	1040	1050	1045	1060	1040	1055
mKr	48	48	48	48	47	47	48	48	47	47	47	47
sKr	0.8	0.9	1	0.7	0.8	1	0.9	0.9	0.9	1.4	1.4	1.6
mH	83	88	86	85	89	88	90	90	90	92	93	92
sH	1.8	1.5	1.5	1.8	1.9	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3	3	3.1
mWd	7.5	8.6	8.9	10.6	11.3	11.2	11.4	11.9	13.2	10.2	10.7	11.2

sWd	1.6	1.8	1.9	1.9	1.6	1.7	1.9	1.8	1.7	2.2	2.2	2.5
Шир	11.1	12.7	13.2	14.9	14.9	15.1	15.7	16.0	17.1	15.2	15.7	16.9
mxWd	12	13	14	14	15	15	15	16	16	14	15	16
mIz	3.6	4.6	4.2	4	5.6	6.6	7.7	7.3	7.1	7.2	7.3	8
sIz	0.7	0.8	0.8	0.9	0.9	1	1	1	1	1.1	1.1	1.1
Износ	5.2	6.4	6.0	6.0	7.6	8.9	10	9.6	9.4	9.7	9.8	10.5
mxIz	5	6	6	6	7	9	10	9	9	9	10	10
mAn	0.56	0.54	0.54	0.55	0.52	0.53	0.52	0.53	0.51	0.5	0.5	0.5
mxAn	0.58	0.56	0.56	0.58	0.54	0.56	0.55	0.56	0.55	0.54	0.55	0.53
mAg	0.05	0.09	0.08	0.06	0.08	0.08	-0.1	0.09	0.12	0.12	0.13	0.12
gr1	0.92	0.9	0.9	0.88	0.85	0.87	0.88	0.88	0.9	0.89	0.91	0.91
gr2	0.85	0.92	0.94	0.87	0.83	0.82	0.86	0.9	0.95	0.93	0.94	0.95
Fi	0.17	0.17	0.17	0.2	0.18	0.18	0.18	0.19	0.18	0.18	0.2	0.17
P	0.38	0.46	0.41	0.49	0.41	0.49	0.45	0.53	0.48	0.64	0.65	0.63
Vpz	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Vdp	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Vkr	125	130	130	125	130	130	130	130	130	130	130	130
Vpr	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
Тон	166	210	223	242	299	330	349	368	406	425	438	482

Таблица П.13. Прогноз значений амплитуд неровностей

№ участк а	β_0	β_1	Прогноз амплитуды просадок, мм	Замеренный значения амплитуды, мм	Ошибка прогноза, мм
1	4,03	1,24	18,8	18	0,8
2	10,9	1,17	25,0	26	1,0
3	5,97	0,96	16,5	15	1,5
4	4,7	0,609	12,08	11	1,08

5	3,2	0,754	12,5	11	1,5
6	11,3	1,01	23,4	25	1,6
7	7,1	1,42	24,04	25	0,96
8	6,9	0,722	15,6	14	1,6
9	8,9	1,21	23,4	24	0,6

Таблица П.14. Данные технического состояния участка пути по показаниям вагона-путеизмерителя

Проходы вагона путеизмерителя	1	2	3	4	5	6
Количество отступлений, N_i	64	9	8	27	11	9
Количество отступлений, вызвавших ограничение скорости n_i	18	9	4	8	4	2

Таблица П.15 Оценки значений функции распределения $\hat{F}(t)$ ресурса участка железнодорожного пути по показаниям вагона путеизмерителя

Продолжительность эксплуатации, лет	1	2	3	4	5	6
Значения $\hat{F}(t)$, рассчитанные методом Джонсона	0,0032	0,0097	0,1002	0,6806	0,9063	0,9708
Значения $\hat{F}(t)$, рассчитанные через интенсивность отказов по формулам (2.32), (2.33)	0,0181	0,0689	0,0999	0,5379	0,7877	0,9219

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Патенты на изобретения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 138730

РАМА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ГРУЗОВОГО
ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью "Инновационно-внедренческий центр
ВАГОНПУТЬМАШ" (ООО "ИВЦ ВАГОНПУТЬМАШ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013134700

Приоритет полезной модели 24 июля 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 21 февраля 2014 г.

Срок действия патента истекает 24 июля 2023 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



Авторы: Сычев В.П., Михович М.В., Сычев П.В., Иванников К.Н., Грачев Л.А.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 105870

**ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ВАГОН, КОНТЕЙНЕР,
УСТРОЙСТВО ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ ВЫГРУЗКИ
МАТЕРИАЛА ИЗ БУНКЕРА (ВАРИАНТЫ)**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью
"Инновационно-внедренческий центр ВАГОНПУТЬМАШ" (ООО "ИВЦ
ВАГОНПУТЬМАШ") (RU)*

Автор(ы): *Сычев Вячеслав Петрович (RU), Михович Михаил Владимирович
(RU), Сычев Петр Вячеславович (RU)*

Заявка № 2011108405

Приоритет полезной модели 04 марта 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 27 июня 2011 г.

Срок действия патента истекает 04 марта 2021 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2577960

СПОСОБ РЕКОНСТРУКЦИИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО
ВАГОНА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТА И КУЗОВ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ВАГОНА

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью Группа компаний ВАГОНПУТЬМАШ
(RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2014146939

Приоритет изобретения 24 ноября 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 18 февраля 2016 г.

Срок действия патента истекает 24 ноября 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2526781

СПОСОБ МОДЕРНИЗАЦИИ ВАГОНА-ХОППЕРА

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "Инновационно-внедренческий центр ВАГОНПУТЬМАШ" (ООО ИВЦ ВАГОНПУТЬМАШ) (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012148739

Приоритет изобретения **16 ноября 2012 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **02 июля 2014 г.**

Срок действия патента истекает **16 ноября 2032 г.**

И.о. руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Авторы: Сычев П.В., Михович М.В., Сычев В.П., Кузнецова Л.А.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2643322

Рама вагона-платформы и вагон-платформа

Патентообладатель: *Автономная некоммерческая организация
"Центр научных исследований, подготовки кадров, проблем
управления и инновационно-технического развития
транспортной инфраструктуры (Институт проблем
управления транспортной инфраструктуры) (RU)*

Авторы: *Сычев Вячеслав Петрович (RU), Михович Михаил
Владимирович (RU), Сычев Петр Вячеславович (RU), Косарев
Александр Валерьевич (RU), Баранов Иван Валерьевич (RU)*

Заявка № 2016131401

Приоритет изобретения 29 июля 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 31 января 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 29 июля 2036 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 129470

**КРЫШКА РАЗГРУЗОЧНОГО ЛЮКА ВАГОНА-ХОППЕРА
И ВАГОН-ХОППЕР**

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью "Инновационно-внедренческий центр
ВАГОНПУТЬМАШ" (ООО "ИВЦ ВАГОНПУТЬМАШ") (RU)*

Автор(ы): *Сычев Вячеслав Петрович (RU), Михович Михаил
Владимирович (RU), Сычев Петр Вячеславович (RU)*

Заявка № 2013105200

Приоритет полезной модели **07 февраля 2013 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **27 июня 2013 г.**

Срок действия патента истекает **07 февраля 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



Авторы: Сычев В.П., Михович М.В., Сычев П.В.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 124901

ПРИВОД ПЕРЕМЕЩЕНИЯ КРЫШКИ ЛЮКА ГРУЗОВОГО
ВАГОНА

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной
ответственностью "Инновационно-внедренческий центр
ВАГОНПУТЬМАШ" (ООО "ИВЦ ВАГОНПУТЬМАШ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2012134801

Приоритет полезной модели 15 августа 2012 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 20 февраля 2013 г.

Срок действия патента истекает 15 августа 2022 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2550645

РЕЛЬСОВОЕ СКРЕПЛЕНИЕ

Патентообладатель(ли): *Общество с ограниченной ответственностью "Агентство интеллектуальной собственности на транспорте" (ООО "АИСнТ") (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013158551

Приоритет изобретения 30 декабря 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 10 апреля 2015 г.

Срок действия патента истекает 30 декабря 2033 г.

Врио руководителя Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



ПРИЛОЖЕНИЕ В Справки о внедрении

УТВЕРЖДАЮ

И.о. исполнительного директора
АО «Ярославский ВРЗ «Ремпутьмаш»

А.А. Узянов

2019 г.

**СПРАВКА****о внедрении результатов диссертационной работы****Сычева Петра Вячеславовича на тему:****Совершенствование системы технического обслуживания железнодорожного
пути на основе моделирования закономерностей его изменения и
автоматизации процессов производства**

АО «Ярославский ВРЗ «Ремпутьмаш» подтверждает, что на основе исследований диссертации Сычева П.В. внесены изменения в конструкторскую и технологическую документацию серийно выпускаемых хоппер-дозаторов модели ВПМ-770, обеспечившие улучшение технических характеристик ВПМ-770. Предложенная в диссертации Сычева П.В. конструкция крышек позволяет улучшить технологию технического обслуживания пути, а способ модернизации ВПМ-770, предложенный Сычевым П.В. коренным образом меняет технологию технического обслуживания пути. Внедренные результаты работы имеют мировую новизну и запатентованы автором.

Результаты внедрения подтверждены извещениями об изменении конструкции серийно выпускаемых хоппер-дозаторов модели ВПМ-770 (№770-200.18, №770-202.18) и согласованы ОАО «РЖД».

Главный инженер

Д.А. Моричев



**Саморегулируемая организация
Союз Участников Железнодорожного Рынка**

Россия, 624021, Свердловская область, г. Сысерть, ул. Челюскинцев, 16 стр.1

Тел. (343) 345-95-69, факс: (343) 747-98-32

E-mail: NP-PPGT@mail.ru

Сайт: www.sujr.ru

СРО СУЖДР ИНН 6652029719, КПП 668501001, ОКПО 63946623,
(ОКВЭД 2001) 74.1; 22.1; 74.3.

12 марта 2019 года

По месту требования.

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы

Сычева Петра Вячеславовича на тему:

Совершенствование системы технического обслуживания железнодорожного
пути на основе моделирования закономерностей его изменения и автоматизации
процессов производства

Настоящим подтверждается, что результаты диссертационной работы были
доложены автором и рассмотрены 29 января 2019 года на вебсеминаре членов
СРО СУЖДР с участием ученых и специалистов РУТ (МИИТ).

Результаты исследований по анализу закономерностей изменения состояния
пути, выполненные диссертационной работе для магистральных железных дорог,
одобренны предприятиями членами СРО СУЖДР и использованы при разработке
нормативно-технической документации для путей необщего пользования.

Генеральный директор
СРО СУЖДР



С.Н. Агеев