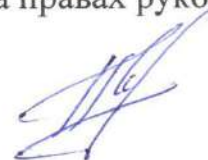


Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет транспорта»
РУТ (МИИТ)

На правах рукописи



Погосян Давид Арменович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ
ПОДРЕЛЬСОВОГО ОСНОВАНИЯ ПУТИ МЕТРОПОЛИТЕНА НА
ОСНОВЕ АНАЛИЗА ГЕОМЕТРИИ РЕЛЬСОВОЙ КОЛЕИ**

2.9.2. – Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Замуховский Александр Владимирович

Москва - 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ	6
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	11
1.1 Основные особенности эксплуатации пути метрополитена	16
1.2 Конструкции пути метрополитенов	19
1.2.1 Деревянные шпалы в путевом бетоне, рельсовое скрепление типа «метро» - типовая конструкция пути	20
1.2.2 Деревянные шпалы в путевом бетоне, рельсовое скрепление типа КДП-65/50	27
1.2.3 Путь низкой вибрации LVT (low vibration track)	31
1.2.4 Виброгасящая конструкция пути типа ВГС5-65	35
1.2.5 Эластичное крепление рельсов на материалах Sika	36
1.2.6 Система встроенного (сплошное опирание) рельса	38
1.2.7 Конструкция масса-пружина	39
1.3 Выводы к главе 1	41
2. ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННОЙ ЗАДАЧИ	43
2.1 Выбор исходных данных	50
2.2 Оптимизация и обоснование методики для определения показателей надежности верхнего строения пути метрополитена	54
2.2.1 Разделение полигона дистанции пути метрополитена на однородные участки для статистического расчета	54
2.2.2 Пропущенный тоннаж исследуемых конструкций	59
2.2.3 Безотказность верхнего строения пути	61
2.2.3.1 Средняя наработка на отказ	61
2.2.3.2 Интенсивность отказов верхнего строения пути	65
2.2.3.3 Параметр потока отказов	65

2.2.3.4 Вероятность безотказной работы верхнего строения пути	66
2.2.3.5 Вероятность отказа верхнего строения пути	66
2.2.4 Ремонтопригодность верхнего строения пути	66
2.2.4.1 Ремонтопригодность верхнего строения пути исходя из фактических возможностей путевых бригад	66
2.2.4.2 Необходимое среднее время до восстановления	71
2.2.5 Расчет показателей долговечности верхнего строения пути	71
2.2.5.1 Средний срок службы верхнего строения пути	72
2.2.6 Расчет комплексных показателей готовности верхнего строения пути	73
2.2.6.1 Коэффициент готовности верхнего строения пути	73
2.2.6.2 Коэффициент оперативной готовности верхнего строения пути	73
2.2.6.3 Коэффициент технической готовности верхнего строения пути	74
2.2.7 Расчет показателей функциональной безопасности верхнего строения пути	75
2.2.7.1 Средняя наработка до опасного отказа верхнего строения пути	75
2.2.7.2 Интенсивность опасных отказов верхнего строения пути	76
2.2.7.3 Вероятность безопасной работы верхнего строения пути	77
2.2.7.4 Вероятность опасного отказа верхнего строения пути	77
2.2.7.5 Время возврата к безопасному состоянию верхнего строения пути	78
2.3 Расчет удельных показателей надежности конструкций верхнего строения пути метрополитена	79
2.3.1 Нарботка на отказ по времени 1 погонного километра пути	79
2.3.2 Необходимое время для ремонта 1 погонного километра пути	80

2.3.3 Коэффициент готовности 1 погонного километра пути	80
2.3.4 Коэффициент оперативной готовности 1 погонного километра верхнего строения пути	81
2.3.5 Коэффициент технической готовности 1 погонного километра верхнего строения пути	81
2.4 Выводы к главе 2	82
3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ МЕТРОПОЛИТЕНА	83
3.1 Параметры исследуемых участков	83
3.2 Расчет и анализ показателей надежности конструкций пути метрополитена	87
3.2.1 Определение показателей надежности типовой конструкции пути метрополитена	87
3.2.1.1 Анализ полученных показателей надежности типовой конструкции пути	94
3.2.2 Определение показателей надежности конструкции пути метрополитена типа КДП-65	100
3.2.2.1 Анализ полученных показателей надежности конструкции типа КДП-65	105
3.2.3 Определение показателей надежности конструкции пути метрополитена типа LVT-M	109
3.2.3.1 Анализ полученных показателей надежности конструкции типа LVT-M	114
3.2.4 Определение показателей надежности конструкции пути метрополитена типа ВГС5-65	117
3.2.4.1 Анализ полученных показателей надежности конструкции типа ВГС5-65	121
3.3 Общий анализ полученных показателей надежности конструкций верхнего строения пути метрополитена	125

3.4 Выводы к главе 3	132
4. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ МЕТРОПОЛИТЕНА	135
4.1 Определение участков пути для проведения первоочередного адресного (локального) ремонта либо модернизации	136
4.1.1 Организационно-технические решения при проведении адресных (локальных) ремонтных работ	149
4.2 Повышение надежности пути с помощью перераспределения трудовых ресурсов эксплуатационных подразделений	153
4.3. Выводы к главе 4	161
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	163
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	166
ПРИЛОЖЕНИЯ	178
Приложение А – Ведомость проезда средства диагностики пути типа «линейное видео»	178
Приложение Б – Сводная ведомость формы ПУ-32 проезда вагона- путеизмерителя «Синергия 1» по Люблинско-Дмитровской линии Московского метрополитена	179
Приложение В – Графические диаграммы параметров геометрии рельсовой колеи	185
Приложение Г – Анализ центра диагностики и мониторинга Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» за май и июнь 2020 года	201
Приложение Д – Письма в ГУП «Московский метрополитен» о предоставлении данных	205
Приложение Е – Протокол совещания начальника Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» № П-01-03/37 от 31.03.21 г.	207

ВВЕДЕНИЕ

Проблема выбора оптимальной конструкции железнодорожного пути метрополитена, с точки зрения надежности, возникла в результате активной эксплуатации безбалластного пути при наличии ограничивающих текущее содержание факторов и при постоянном росте интенсивности движения поездов. Исследованию подходов к решению данной проблемы посвящена представляемая диссертация.

Актуальность темы исследования. Метрополитен является самым нагруженным видом общественного транспорта в большинстве городов, где он присутствует. С момента открытия первой ветки метро в городе Москве наблюдается стабильный рост пассажирооборота. В последнее десятилетие грузонапряженность линий «Московского метрополитена» уверенно растет в среднем на 5% в год вследствие удобства и популярности данного вида транспорта у населения мегаполиса. В условиях интенсивного воздействия подвижного состава на железнодорожный путь метрополитена, ограниченности времени на его техническое обслуживание, а также экономической нецелесообразности полного длительного закрытия перегона для выполнения капитальных работ, основным техническим показателем конструкций железнодорожного пути метрополитена является эксплуатационная надежность, которая во многом зависит от состояния геометрии рельсовой колеи (далее – ГРК).

В связи с этим, актуальными являются исследования, направленные на определение наиболее оптимальных конструкций железнодорожного пути, отвечающих требованиям метрополитенов касательно обеспечения высокого уровня безопасности движения поездов и малым трудозатратам при текущем содержании.

Пропущенный тоннаж, текущее состояние ГРК и интенсивность воздействия на железнодорожный путь метрополитена обуславливают

необходимость создания методики оценки состояния пути, которая позволит определить участки для первоочередного адресного (локального) ремонта в ночные технологические «окна».

Ввиду эксплуатации разных конструкций железнодорожного пути метрополитена в отличающихся друг от друга условиях, с целью повышения надежности пути, актуально решение задачи корректного распределения контингента работников эксплуатационных дистанций в зависимости от состояния ГРК на обслуживаемых участках.

Степень разработанности темы. Одно из наиболее подробных описаний проблем конструкций верхнего строения пути метрополитена выполнил Кравченко Н. Д. в своих работах [1 – 4].

Проблемы надежности верхнего строения пути метрополитена исследовали также Замуховский А. В. [5 – 9] и Клинов С. И. [10 – 13].

Решая проблемы виброзащиты зданий и сооружений вблизи линий метрополитена затронули проблемы конструкций пути в своих работах Наумов Б. В. [14, 15], Курбацкий Е. Н. [16 – 18], Карпущенко Н. И. [19].

Статистическим методам определения параметров надежности конструкций пути на магистральных железных дорогах посвящены работы Замышляева А. М. [20 – 24], Розенберга Е. Н. [22 – 27], Розенберга И. Н. [22, 23], Шубинского И. Б. [24].

Следует отметить фундаментальные работы ученых-тоннельщиков, которые в своих трудах затронули некоторые темы путевой инфраструктуры метрополитенов: Лиманов Ю. А. [25], Жильцов В. Н. [26], Волков В. П. [27], Храпов В. Г. [27, 28].

Необходимо упомянуть ученых, установивших научные основы путевого хозяйства, Шахунянц Г. М. [29], Яковлева Т. Г. [30, 32], Ашпиз Е. С. [31], Виноградов В. В. [32], Коган А. Я. [33], Вериго М. Ф. [33].

Цель исследования заключается в разработке методики для определения параметров эксплуатационной надежности разных конструкций железнодорожного пути метрополитена и методов ее повышения на основе

данных о состоянии геометрии рельсовой колеи.

Объектом исследования является железнодорожный путь метрополитена.

Предмет исследования – эксплуатационная надежность железнодорожного пути метрополитена.

Методы исследования. Исследования эмпирического характера главным образом заключаются в наблюдении за работой конструкций железнодорожного пути в разных условиях эксплуатации Московского метрополитена непосредственно при текущем содержании, накоплении и отборе фактов и установлению связей между ними, а также, посредством анализа данных, полученных от сертифицированных средств диагностики пути.

Теоретические исследования заключаются в применении положений математической статистики и теории надежности для вычисления показателей надежности конструкций железнодорожного пути метрополитена и их дальнейшего сравнения.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработан научно-обоснованный подход к определению показателей эксплуатационной надежности железнодорожного пути метрополитена на основе данных о состоянии ГРК, полученных с помощью сертифицированных мобильных средств диагностики пути;

2. На основе научного статистического подхода определены показатели надежности основных конструкций железнодорожного пути Московского метрополитена на основе данных о состоянии ГРК;

3. Разработан метод выявления и ранжирования участков пути метрополитена для адресного (локального) ремонта на основе анализа состояния ГРК;

4. Решена задача корректного распределения контингента работников эксплуатационных дистанций в зависимости от состояния ГРК на обсуживаемых участках пути.

Теоретическая и практическая значимость работы. Определенные в исследовании параметры позволяют формализовать выбор конструкции пути по

наибольшим показателям надежности.

Разработанная методика определения участков пути для адресного (локального) ремонта позволяет компенсировать отсутствие капитальных ремонтных работ посредством оптимизации трудовых затрат на текущее содержание пути за счет выбора участков для первоочередного проведения ремонтных работ в период ночных технологических «окон», без длительного закрытия пути для движения поездов.

Разработанная методика управления контингентом работников эксплуатационных подразделений позволяет распределять работников между ними в зависимости от состояния геометрии рельсовой колеи на обслуживаемых участках пути.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод определения показателей эксплуатационной надежности конструкций железнодорожного пути метрополитена на основе данных о состоянии ГРК, полученных с помощью мобильных средств диагностики пути.

2. Показатели надежности основных конструкций железнодорожного пути Московского метрополитена: безотказность, ремонтпригодность, готовность и функциональная безопасность.

3. Метод выявления и ранжирования наиболее неблагоприятных участков на полигоне главных путей метрополитена для адресного (локального) ремонта в ночные технологические «окна» на основе данных о состоянии ГРК.

4. Способ корректного распределения контингента работников эксплуатационных подразделений в зависимости от состояния ГРК на обслуживаемых участках пути.

Степень достоверности и апробация результатов работы. Достоверность научных исследований и заключений основана на корректном использовании численных методов, базирующихся на теоретических подходах и принципах математической статистики, а также на систематизации и использовании статистических данных, полученных с использованием сертифицированных средств мобильной диагностики пути.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

– II Международная выставка-конференция «ИНТЕРМЕТРО» «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий: инфраструктура и подвижной состав метрополитена» (Москва, МИИТ, 2017 год);

– III Международная выставка-конференция «ИНТЕРМЕТРО» «Перспективы развития метрополитенов в условиях интенсивного внедрения новых технологий» (Москва, РУТ (МИИТ), 2019 год);

– XVI Международная научно-техническая конференция «Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути», посвященная памяти профессора Георгия Михайловича Шахунянца (Москва, РУТ (МИИТ), 2019 год).

Диссертационная работа на основе докладов была одобрена на заседании кафедры «Путь и путевое хозяйство», РУТ (МИИТ), 19.04.2021 г.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 7 печатных работах, в том числе 4 в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях из перечня ВАК России.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, четыре главы, выводы, заключение, библиографический список и приложения. Работа изложена на 208 страницах машинописного текста, в том числе 38 таблиц, 62 рисунка. Библиографический список насчитывает 105 наименований.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Первая линия метрополитена была построена в Лондоне в 1863 г. Она была длиной всего в 6 км. Поезд на паровой тяге из четырех вагонов преодолевал это расстояние за 33 минуты. Первая электрифицированная линия метро была открыта в 1890 г., так же в Лондоне. В России проект первого метрополитена для Москвы был предложен в 1875 г. инженером Василием Титовым, но был отвергнут в связи с экономической нецелесообразностью. В 1930-1931 годах, в результате разбора состояния транспортной инфраструктуры столицы и осознания необходимости нового вида пассажирского транспорта для обеспечения высокой мобильности населения, было принято решение о строительстве первой линии метрополитена [36, 37].

Первая линия метро в Москве с 13 станциями введена в эксплуатацию в 1935 г. Она шла от станции «Сокольники» до станции «Парк культуры» (ныне центральный участок Сокольнической линии). При этом на перегоне «Охотный Ряд» - «Библиотека имени Ленина» отвечался участок, шедший к станции «Смоленская» (ныне Филевская линия) [38 – 40]. На ней был уложен звеньевой путь на деревянных шпалах и щебеночном основании.

В настоящее время, метрополитен – единственный в своем роде вид транспорта для мегаполиса, обеспечивающий высокую потребную мобильность населения. При относительной малой пропускной способности (число транспортных единиц в одном направлении в 1 час) метрополитен обеспечивает самую высокую провозную способность (число пассажиров в час), и является важнейшей транспортной системой для города [41, 42].

Эффективность метрополитена, а также факт большего его предпочтения пассажирами как средства передвижения, являются причинами перегрузок в часы-пик (8:00 – 9:00 и 18:00 – 19:00) и уменьшения интервалов движения поездов (минимальный – 90 с) [14].

Эффективность и загруженность данного вида транспорта является также причиной интенсивного развития сети метрополитена и соединения станций метро с наземными системами железнодорожного сообщения (Московское центральное кольцо, Московские диаметры) [43, 44].

Анализ изменения нагрузки линий московского метро показывает рост грузонапряженности из года в год. С 1996 года на Люблинско-Дмитровской линии грузонапряженность увеличилась на 90%, на Таганско-Краснопресненской, с 1991 года - на 20%, на Серпуховско-Тимирязевской - на 80% (рисунок 1.1).

Самая нагруженная линия Московского метрополитена – Кольцевая. Значение ее грузонапряженности в 62-63 млн. т*км брутто/км год показывает близкий к максимальному показатель возможности линии метрополитена при минимальных интервалах движения поездов. Учитывая общий тренд увеличения нагрузки и возможности системы путевой автоблокировки, можно предположить, что грузонапряженность всех линий будет стремиться к максимальному значению, порядка 60 млн. т*км брутто/км год [25].

Вся инфраструктура метрополитена, в том числе железнодорожный путь, испытывают интенсивные нагрузки. Участки линий, построенные с 1960-1980 года, на которых уложена типовая конструкция пути для всех метрополитенов стран СНГ, имеют значительный пропущенный тоннаж. Некоторые перегоны метрополитена на сегодняшний день имеют наработку тоннажа 2,5-3 млрд. т брутто, при этом только для рельсов предусмотрена их периодическая замена по нормативной наработке, а все остальные элементы пути заменяют только при их отказе либо сверхнормативном износе. Данный факт обусловлен постоянным коротким интервалом времени на текущее содержание пути и особенностями замены элементов верхнего строения в стесненном габарите тоннеля [7, 42].

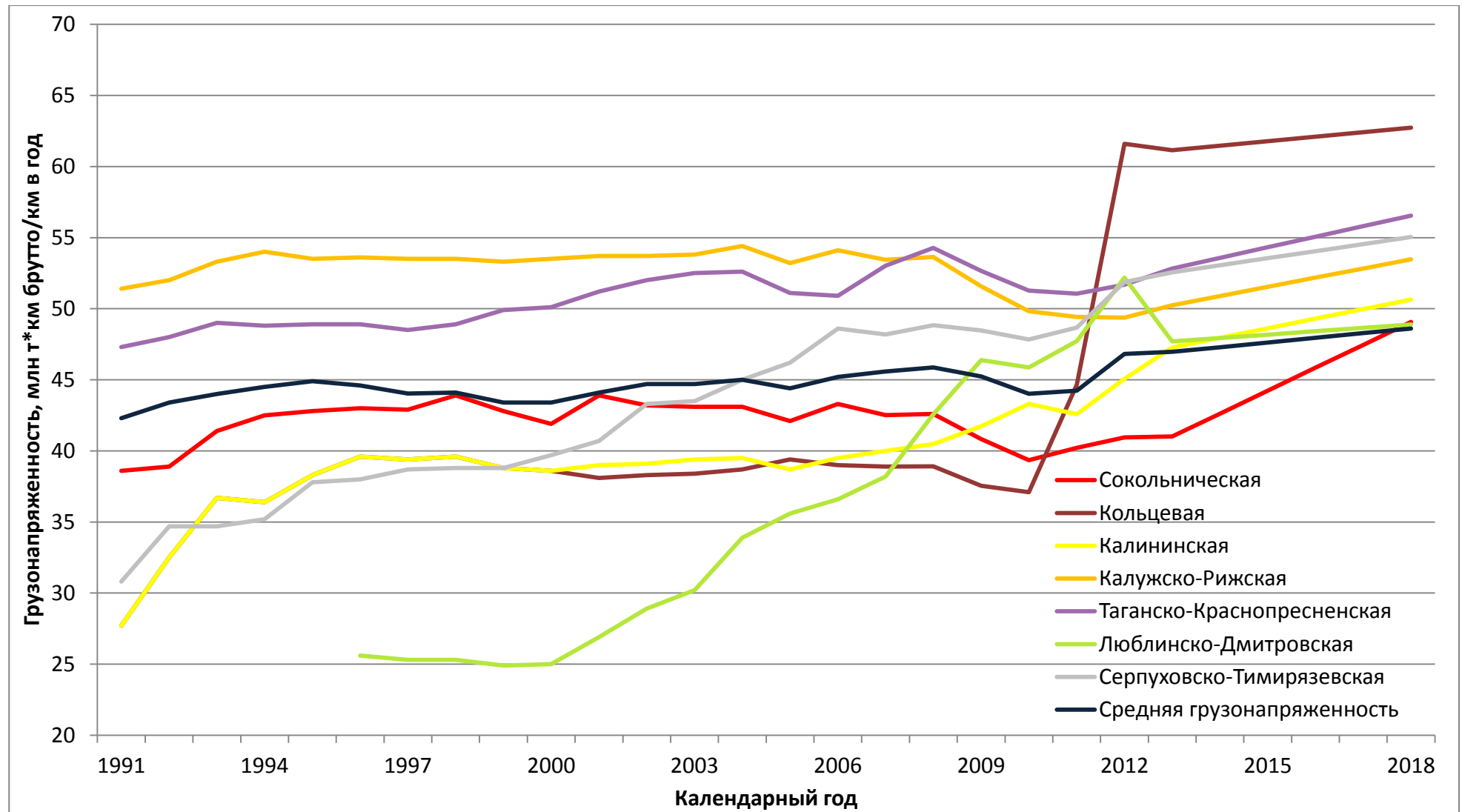


Рисунок 1.1 – График изменения грузонапряженности некоторых линий Московского метрополитена.

Службы ГУП «Московский метрополитен», в том числе Служба пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры, продолжают обеспечивать высокий уровень безопасности движения поездов при неизменном, и даже сокращающемся интервале времени на техническое обслуживание инфраструктуры [42]. Не исключена такая ситуация, когда состояние пути потребует повышенных трудовых и материальных затрат.

Анализу условий, в которых должна решаться задача по обеспечению надежности железнодорожного пути и тех решений, которые применяются сегодня в Московском метрополитене, и посвящена первая глава.

При подготовке данной работы автор опирался на ряд исследований российских и зарубежных ученых.

Главными организациями в СССР и России по вопросам железнодорожного пути метрополитена и его надежности были и являются АО «ВНИИЖТ» и РУТ (МИИТ). Именно в стенах данных институтов и при их непосредственном научном сопровождении были проведены эксперименты над различными типами конструкций верхнего строения пути, как в лаборатории, так и на перегонах метрополитена, которые сохраняют свою актуальность по сегодняшний день.

Переходя к персоналиям, необходимо отметить Н.Д. Кравченко, который вел аналитическую и экспериментальную работу с целью оптимизаций конструкций пути метрополитена с точки зрения надежности и выработки требований к вновь создаваемым конструкциям. Этому посвящены в частности, работы [1 - 4]. Под его руководством были разработаны и испытаны на полигонах лежневые конструкции, эксплуатирующиеся на Люблинско-Дмитровской линии Московского метрополитена в условиях высокой интенсивности движения поездов.

Существенный вклад в развитие конструкций безбалластного пути метрополитена внес С.И. Клинов. Он является одним из авторов множества патентов, относящихся к содержанию и строительству безбалластного пути [10 - 13].

Доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» А.В. Замуховский провел экспериментальные и теоретические исследования причин потери связи путевого бетона и дискретных композитных шпал-коротышей, разработал технологию укладки пути с композитными шпалами, обеспечивающую надежную и долговечную работу пути. Кроме того, активно оказывает научное сопровождение Московскому метрополитену в вопросах конструкций верхнего строения пути. Под его руководством проводятся актуальные экспериментальные исследования конструкций пути в условиях интенсивной эксплуатации (на перегоне метрополитена) [5 - 9, 45].

Большую работу по исследованию конструкций метрополитена провел Б.В. Наумов. Под его руководством разработаны промежуточные виброгасящие рельсовые скрепления типа ВГС, которые применяются в России и в других странах в целях снижения воздействия вибраций от движения поездов метрополитена на жилые территории [14].

Решением задачи виброзащиты зданий и сооружений вблизи линий метрополитена с помощью усовершенствования конструкций пути занимались Е.Н. Курбацкий [16 - 18], О.А. Ковальчук [46], А.М. Страхов [47], М.Б. Шуб [48], С.А. Костарев [49], Е.Ю. Титов [50], Н.А. Антонов [51], Д.К. Сизов [52], С.Г. Алимов [53], А.Н. Грановский [54], Ю.А. Колотовичев [55], Сан Лин Тун [56].

Также необходимо отметить ученых, которые создали и развили методы статистического анализа путевой инфраструктуры на магистральных железных дорогах. Большой вклад в создание и внедрение концепции УРРАН («Комплексное управление ресурсами, рисками, анализ надежности на всех этапах жизненного цикла»), на магистральных железных дорогах ОАО «РЖД» внесли В.А. Гапанович, А.М. Замышляев, Е.Н. Розенберг, И.Н. Розенберг, И.Б. Шубинский. Концепция УРРАН, положения из методических указаний которой применяются в данном исследовании, позволяет определять и контролировать основные показатели надежности на железнодорожном транспорте [20 – 24].

Методы статистического анализа путевой инфраструктуры концепции УРРАН основаны на положениях теории надежности. Актуальные труды о надежности машин, механизмов и технических систем принадлежат В.А. Акимову [57], А.Н. Чебоксарову [58], А.А. Кокушину [59], В.Р. Матвеевскому [60].

Большой вклад во внедрение информационных систем в структуру управления ОАО «РЖД» внес Н.В. Эрлих. Комплексная автоматизированная система учета, контроля устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАС АНТ) является одной из таких [61 – 64].

Значительный вклад в модернизацию конструкций железнодорожного пути метрополитена вносят и сами производители элементов данных конструкций, в том числе АО «РЖДстрой», группа компаний «АБВ», ООО НПП «АпАТэК», АО «БетЭлТранс», АО «Фирма Твема» и другие [65 – 69].

Благодаря работам отечественных и зарубежных специалистов созданы многочисленные варианты конструкций железнодорожного пути и разработаны методики и концепции, применение которых к полигону путей метрополитена даст возможность оценить их надежность и эффект от внедрения.

1.1 Основные особенности эксплуатации пути метрополитена

Эксплуатация пути Московского метрополитена происходит в сложных и специфических для железных дорог условиях. Значительных факторов, усложняющих эксплуатацию пути достаточно много.

Скорость движения поездов по главным путям, на большинстве линий метрополитена, постоянна – от 75 до 80 км/ч. В кривых участках возвышение наружного рельса позволяет двигаться поезду со скоростью 80 км/ч без негативного влияния на пассажиров. Скорость подвижного состава уменьшается только на предстанционных участках разгона и торможения и на участках стрелочных переводов, где присутствует ограничение скорости при движении по боковому и прямому пути. Скорость подвижного состава может изменяться

только распоряжением управления метрополитена, либо при обнаружении неисправностей пути, требующих ограничения скорости. Например, при обнаружении некоторых неисправностей геометрии рельсовой колеи IV и V степени скорость ограничивается до 25 км/ч, а в некоторых случаях, останавливается движение поездов до устранения неисправности. При обнаружении остродефектных рельсов и элементов стрелочных переводов (крестовин, контррельсов, остряков, рамных рельсов) движение останавливается, либо ограничивается до 5 км/ч до замены или дополнительного закрепления (рельсовыми струбцинами, крепежителями, накладками и т.п.) неисправного элемента пути [70 - 72].

Осевые нагрузки в метрополитене достаточно небольшие по сравнению с наземной сетью железных дорог. Так, например, осевая нагрузка поездов типа «Москва» в среднем, в порожнем состоянии, составляет 8,6 тс, а при наполненности вагона 5 чел./м², осевая нагрузка составит 11,8 тс [73]. Расчетная нагрузка на ось для расчета пути и тоннеля составляет 15 т/ось в соответствии с СП 120.13330.2012 [74].

Говоря о сравнительно низкой осевой нагрузке, не следует оставлять без внимания интенсивность движения поездов. Так, например, Таганско-Краснопресненская линия Московского метрополитена за сутки в будний день пропускает 550 пар поездов (более 1100 поездов по обоим главным путям), что составляет среднюю грузонапряженность 55 млн. т*км брутто/км в год (на момент сентября 2019 года) [42].

Одним из главных факторов является постоянное повышение грузонапряженности при неизменном интервале времени на текущее содержание пути. Как говорилось ранее, грузонапряженность некоторых линий увеличилась на 50% и более. Время на текущее содержание пути в Московском метрополитене предоставляется каждый день. Ночное технологическое «окно» которое длится от 02:45 до 05:00, во время которого, в обязательном порядке, снимают напряжение с контактного рельса для обеспечения безопасности рабочих в тоннеле [1, 14, 42].

Начиная с 2011 года применяется практика организации длительных

технологических «окон» продолжительностью в 53 часа. Такие «окна» планируют для проведения работ, требующих повышенных трудовых ресурсов. Например, сплошная смена рельсов и рельсовых скреплений, и замена станционных деревянных полушпал на Калужско-Рижской линии. На Филевской и Замоскворецкой линиях проводилась выправка пути в больших объемах. На Сокольнической и Люблинско-Дмитровской – сварка температурных рельсовых стыков алюминотермитным способом (устройство бесстыкового пути). Также производятся работы по очистке дренажных сооружений, устранению течей из тоннельной обделки, либо отделочные работы, не связанные с безопасностью движения. На такие «окна» привлекаются рабочие и руководители с разных эксплуатационных дистанций пути [42].

Возвращаясь к ежедневным ночным технологическим «окнам» следует отметить, что среднее время на выполнение путевых работ составляет – 2 часа 15 минут (02:45 – 05:00). За это время бригада монтеров пути должна подготовить инструмент и проследовать до места производства работ. В некоторых случаях, когда до места работ нужно следовать 1-1,5 км, полезное время на работу сокращается до 1,5 часа.

Сложность некоторых работ состоит в организации их в стесненных условиях тоннеля. Так, например, замена деревянных шпал, которые невозможно уложить в путевой бетон без поднятия одной из рельсовых нитей. Данный вид работ сопровождается раскреплением промежуточных скреплений и поднятием одной из рельсовых нитей на достаточную высоту (до 0,5 м) для укладки новой шпалы, что приводило неоднократно к выбросу поднятой рельсовой нити из-за наличия температурных напряжений.

Особенно затруднено проведение капитального ремонта пути. Сплошная замена шпал либо рельсовых подкладок в стесненных условиях и при сложностях доставки и вывоза материалов верхнего строения пути невозможна из-за длительной остановки движения. Это является основной причиной большой наработки пропущенного тоннажа верхним строением пути метрополитена. Вместо капитального ремонта проводится местами сплошная замена рельсовых

подкладок и устранение кустовой негодности шпал в ночные «окна». Соответственно, из-за короткого интервала ночного «окна» объем выполненных работ невелик. Например, всего в течение 2020 календарного года по главным путям Таганско-Краснопресненской линии планируется замена 1000 шпал, по Калужско-Рижской – 1200 шпал при среднем пропущенном тоннаже данными линиями более 2 млрд. т брутто [75].

Усложняет работы по текущему содержанию пути наличие контактного рельса, непосредственно связанного с верхним строением пути и ограничивающем пространство выполнения работ. Соответственно работы по текущему содержанию пути проводятся только при снятом высоком напряжении с контактного рельса. Допускается производить работы по устранению аварийного состояния пути (например, закрепление остродефектного рельса с помощью стыковых накладок и струбцин) при наличии напряжения на контактном рельсе работникам метрополитена, имеющим специальный допуск на работы под высоким напряжением [1, 14, 42, 72].

Перечисленные выше условия эксплуатации пути в метрополитене являются основанием для заключения о необходимости использования в качестве основного типа железнодорожного пути надежной и малообслуживаемой конструкции, имеющей максимальный межремонтный срок службы.

1.2 Конструкции пути метрополитенов

На момент декабря 2017 года в тоннелях полигонов эксплуатационных дистанций пути и искусственных сооружений Московского метрополитена, а всего их десять, можно наблюдать разные конструкции железнодорожного пути. Причем, некоторые из них имеют протяженность всего 25 метров, в Московском метрополитене, таких конструкций более четырех десятков [41].

Такое множество типов конструкций железнодорожного пути обусловлено разными техническими и экономическими причинами. В данном разделе автор

постарается описать данные конструкции, отметить достоинства и недостатки каждой из них.

1.2.1 Деревянные шпалы в путевом бетоне, рельсовое скрепление типа «метро» - типовая конструкция пути

Под «типовой конструкцией» в данной работе понимается одна из самых распространенных и длительно эксплуатируемых в метрополитенах России и стран СНГ (рисунок 1.4).

Конструкция эксплуатируется только с рельсами Р50, которые связывает между собой раздельное промежуточное скрепление типа «метро», представляющее собой подкладку, маятниковый штырь и шплинт. Подкладка закрепляется к шпале четырьмя, шестью либо восьмью путевыми шурупами. Закрепление четырьмя шурупами встречается чаще всего на прямых участках. Усиленное закрепление восьмью шурупами используется в круговых кривых радиусом 600 м и менее. Подкладки с шестью отверстиями используются только на ближайшей к контактному рельсу рельсовой нити в местах установки кронштейнов контактного рельса. Подкладка закрепляется на деревянной шпале, соответствующей ГОСТ 22830-77 [76], которая находится плотно прижатой в путевом бетоне класса В12,5 [26 – 28, 41].

На участках стрелочных переводов используется скрепление преимущественно в нераздельном исполнении. В настоящее время данный вид скреплений заменяется на раздельный, с упругими клеммами.

Из-за длительной эксплуатации в Московском метрополитене дефекты данной конструкции наиболее явно выражены. Рассматриваемые ниже дефекты имеют массовый характер, они наблюдаются на всем протяжении главных путей метрополитена, в месте эксплуатации данных конструкций. Учитывая, что дефектов достаточно много, рассмотрим, в первую очередь, самый распространенный из них.

Связь в конструкции деревянного подрельсового основания и путевого

бетона в условиях эксплуатации пути в тоннеле показала себя не надежно. Выбор путевого бетона, как безбалластного основания в тоннелях технически оправдан. Бетон прочен, мало подвержен воздействию воды, ему можно придавать нужную форму во время заливки для устройства труб, водоотводных канав, противоугонных прямков и т.д., обеспечивается неизменная эпюра шпал и возвышение рельсов в кривых. Однако долгая связь бетона и древесины невозможна в силу интенсивных динамических воздействий на верхнее строение пути подвижного состава и различий в физических и химических свойствах данных материалов. Со временем, совместно с отсоединением шпалы и бетона, испаряется влага из нее. Потеря влаги древесиной сопровождается изменением формы и сокращением в объеме. В результате между путевым бетоном и деревянной шпалой образуются зазоры (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Потеря связи деревянных шпал с путевым бетоном. Зазоры до 20 мм в зоне контакта.

При воздействии подвижного состава и неравномерной осадке тоннеля и

при наличии вертикального зазора между шпалой и бетоном, образуются отступления по текущему содержанию ГРК по профилю пути. Любое такое отступление – это место повышенного динамического воздействия подвижного состава на путь. Соответственно, в месте перекоса пути, при постоянном ударе постели шпалы о путевой бетон, деформируется сама шпала, разрушается постепенно бетон.

Кроме того, следует помнить о тоннелях с металлической (чугунной) обделкой, которая изменяет свои геометрические размеры с изменением температуры, то есть имеет свой коэффициент температурного линейного расширения, что также оказывает влияние на связь шпал и бетона. Данный дефект настолько распространен в метро, что получил свое собственное название - «отрясенные шпалы».

Кроме того, при эксплуатации деревянных шпал наблюдается их продольное растрескивание вдоль волокон древесины (рисунок 1.3). Трещины распространяются по всей длине шпалы и имеют ширину до 20 мм. Такие повреждения являются источником попадания внутрь древесины влаги и последующего гниения тела шпал. Так же трещины влияют на стабильность положения рельсовых нитей по плану и являются помехой в последующем механическом воздействии на шпалу (сверлении) при выполнении выправочных работ.

Дефектные шпалы, показанные на рисунке 1.3, выявляются натурным осмотром. Однако на Московском метрополитене широко применяется средство диагностики состояния верхнего строения пути как «линейное видео». Например, ведомость расшифровки проезда по 64 околотку Таганско-Краснопресненской линии (ПЧ-6), где преимущественно используется типовая конструкция пути, также подтверждает большое количество дефектных шпал на участке. Суммарное количество замечаний по коду 11 (дефектные шпалы) самое большее. Расшифровка и анализ проездов средства диагностики пути типа «линейное видео» представлены в приложении А, а также, в приложении Г рисунок ГЗ.



Рисунок 1.3 – Продольное растрескивание шпал. Трещины шириной до 1,8 см.

Рассматривая рельсовое крепление, следует упомянуть, что подкладки крепления типа «метро» (рисунок 1.4) не выполняют функцию прижатия рельса к подкладке клеммами, как при распространенном креплении КД, КБ и т.п. В результате, при осадке тоннеля, сушении шпалы, температурной работы обделки и других факторов, влияющих на вертикальный зазор, между рельсом и подкладкой образуется пространство. В результате рельс может провисать над 4 – 5 шпалами одновременно.

Для предотвращения угона пути данная конструкция применяется с клиновыми противоугонами Шестопалова [70, 77], которые устанавливаются на подошву рельса и опираются в деревянную шпалу. Используемые противоугоны довольно хрупкие и часто изламываются. Кроме того, факт упора противоугона в шпалу вдоль волокон древесины приводит к безвозвратной деформации подрельсового основания.

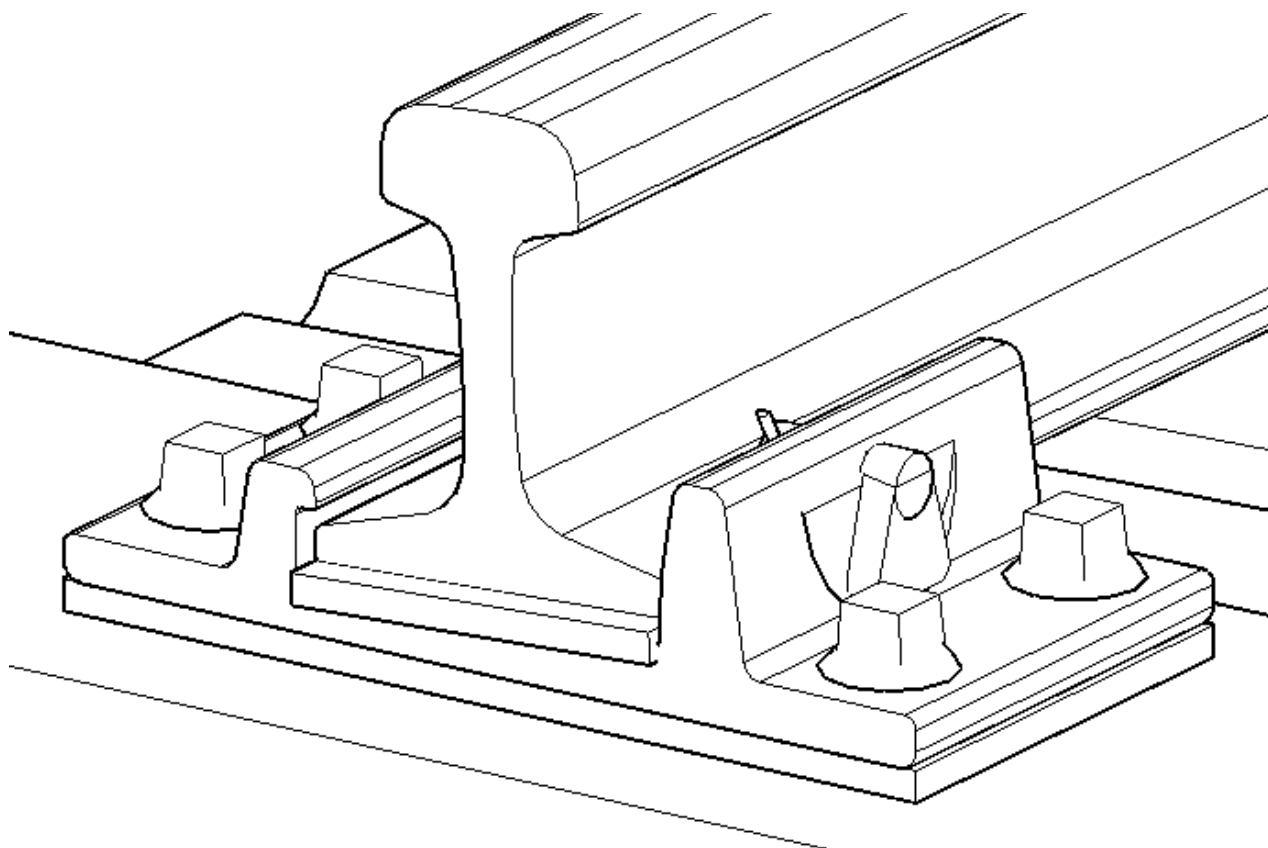


Рисунок 1.4 – Раздельное промежуточное скрепление типа «метро», рельс Р50.

Следует обратить особое внимание на фактор вертикальных колебаний рельса в подкладках типа «метро». В кривых радиусом 600 м и менее развивается износ высокой реборды подкладки на наружной и внутренней нити кривой. Колебания рельса вызывают дополнительные силы трения между рельсом и ребордой, в результате описываемый износ реборды достигает 10 мм (рисунок 1.5, 1.6). Данное явление приводит к уширению колеи в кривых при номинальном значении ширины колеи 1530 мм до 1544 мм (в зависимости от радиуса кривой), что приводит состояние пути при наличии даже одной такой неисправности к удовлетворительной балловой оценке (отклонение в ширине колеи более чем на 13 мм от номинального значения является отступлением V степени по текущему содержанию ГРК) [70, 71, 77].

Данный процесс не ограничивается износом реборды. Конструкция скрепления влияет на состояние путевых шурупов. В результате путевые шурупы либо изламываются, оставляя одну свою часть в шпале, либо сильно

изнашиваются в месте контакта подкладки и шурупа (рисунок 1.7).



Рисунок 1.5 – Износ 5 мм боковой реборды подкладки типа «метро».



Рисунок 1.6 – Износ 8 мм боковой реборды подкладки типа «метро» в зоне изолирующего рельсовые цепи стыка типа «АПТЭК».



Рисунок 1.7 – Путевые шурупы длиной 150 мм с повышенным износом (до 8 мм).

Коррозия резьбовой части шурупов.

Износ путевых шурупов происходит параллельно с износом шурупных отверстий в подкладках, которые приобретают овальную форму (рисунок 1.8).

Соответственно, уширение колеи от номинального до упомянутых значений, соответствующих V степени отступления по ГРК, с учетом износа элементов рельсовых креплений, недопустимо.

Очевидно, что со временем, при высокой интенсивности движения, величина данных износов увеличивается, влияя на балловую оценку пути и функциональность элементов верхнего строения, и, при неудовлетворительном уровне организации текущего содержания пути, может стать прямой угрозой безопасности движения поездов.



Рисунок 1.8 – Овалообразный износ отверстий в подкладках типа «метро»

Основные дефекты данной конструкции можно связать, во-первых, с отсутствием ограничения вертикальной степени свободы рельса (клемм), в результате чего узлы соприкосновения элементов креплений испытывают повышенный износ, во-вторых, с гниением, усушкой и деформацией деревянных шпал. Все описанные дефекты носят массовый характер и приводят к большому количеству отступлений по текущему содержанию ГРК, в том числе к отступлениям, требующим ограничения скорости движения поездов.

1.2.2 Деревянные шпалы в путевом бетоне, рельсовое крепление типа КДП-65/50

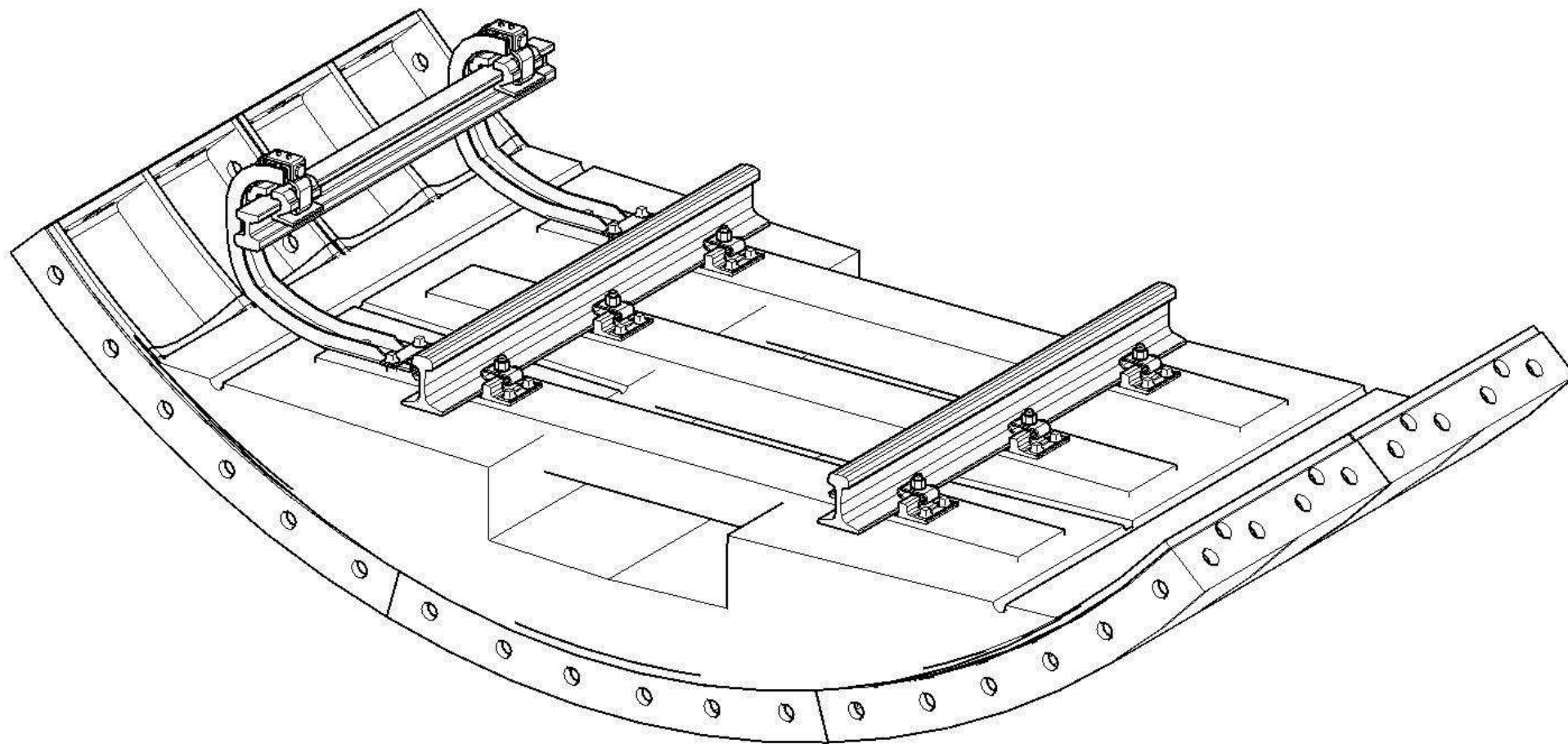


Рисунок 1.9 – Конструкция железнодорожного пути метрополитена: деревянные шпалы в путевом бетоне, рельсовое скрепление типа КДП-65, металлические кронштейны и узлы контактного рельса с фарфоровыми изоляторами. Обделка тоннеля – металлическая.

Конструкция, показанная на рисунке 1.9, является еще одной типовой конструкцией линий метрополитена. От рассмотренной ранее, отличается наличием рельсового скрепления, ограничивающего вертикальную степень свободы рельса упругими металлическими клеммами (рисунок 1.10).

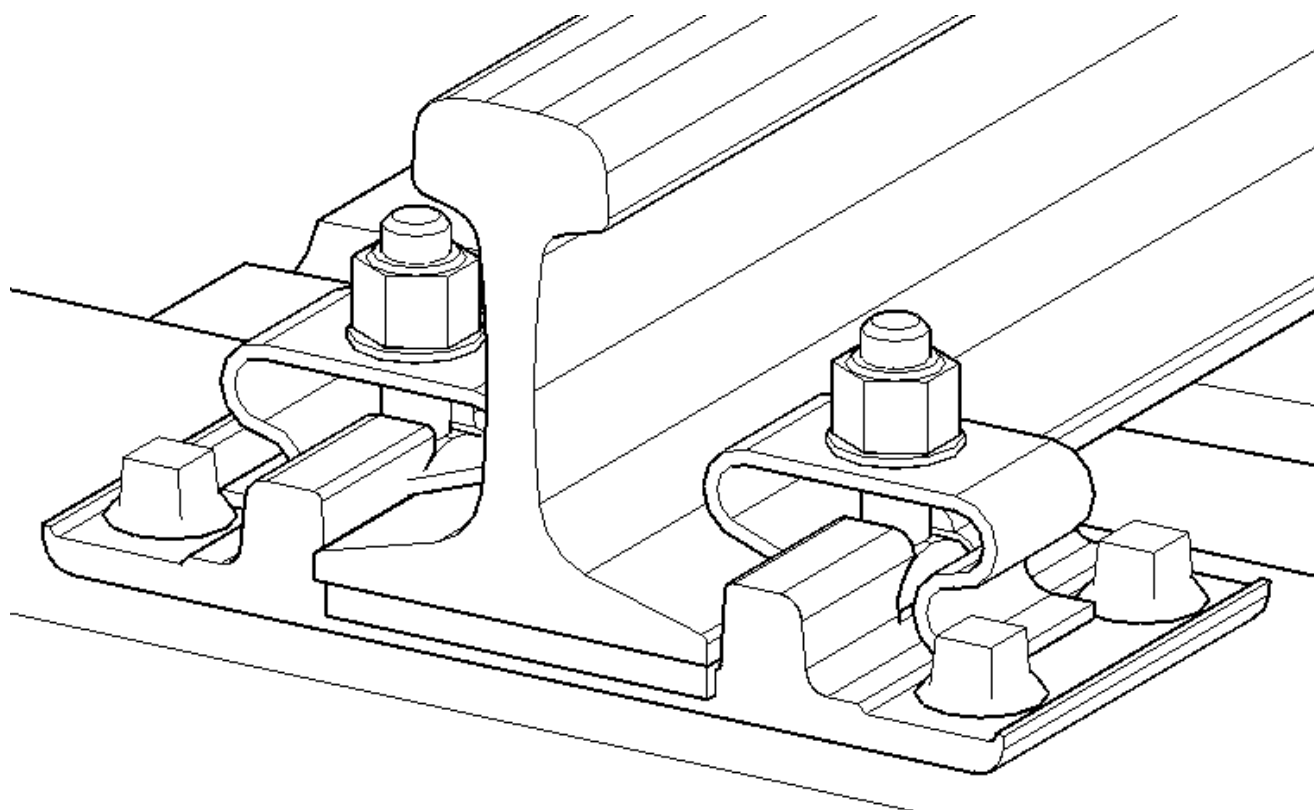


Рисунок 1.10 – Рельсовое скрепление КДП-65.

Стоит констатировать, что относительно конструкции со скреплениями типа «метро», путь на данной конструкции отличается низкой интенсивностью возникновения отступлений по ГРК.

В обеих рассмотренных конструкциях применяются деревянные шпалы. Следует повторить, что древесина обладает свойствами гниения, усушки, образования трещин. Кроме упомянутых в разделе 1.2.1 недостатков, при эксплуатации пути возникают дефекты, связанные с деревянным подрельсовым основанием, которые заключаются в нестабильности геометрии подвески контактного рельса (рисунок 1.11), который непосредственно прикреплен к подрельсовому основанию.

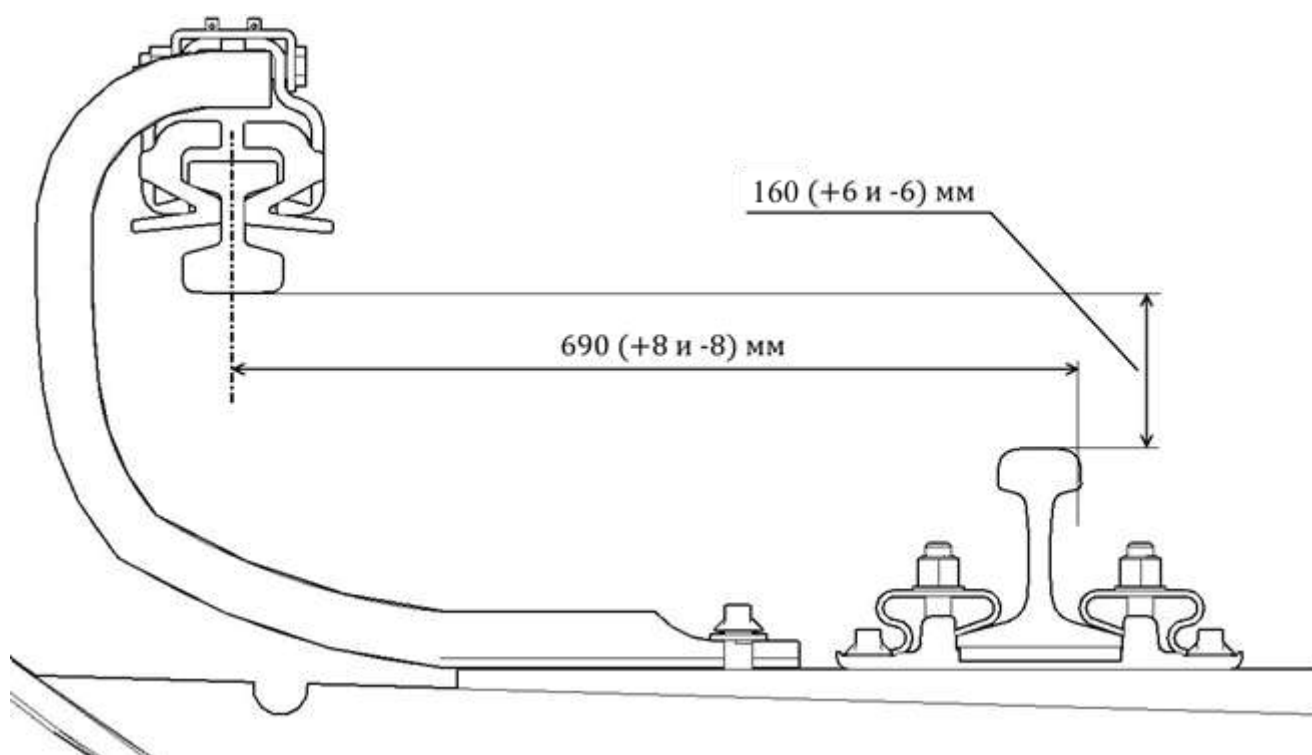


Рисунок 1.11 – Габариты подвески контактного рельса.

Контактный рельс, являясь частью конструкции пути, имеет свои ограничительные допуски и размеры относительно ближайшего ходового рельса, это значит, что в конструкциях с деревянными шпалами, выполняя работы по выправке пути, нужно параллельно соблюдать допуски по геометрии контактного рельса. На рисунке 1.11 показано расположение контактного рельса, размеры и допуски по его содержанию относительно ходового рельса [70, 77].

При относительном старении деревянных шпал путевые шурупы, закрепляющие кронштейн контактного рельса, имеют недостаточное сопротивление выдергиванию. В результате наблюдается перекос кронштейна контактного рельса, нарушается его геометрия расположения относительно ходового рельса.

Стоит отметить, что некоторые отступления по текущему содержанию ГРК являются причинами образования отступлений по геометрии контактного рельса. Наиболее явным решением данных проблем является установка контактного рельса непосредственно на путевой бетон, что применяется на более современных конструкциях пути.

1.2.3 Путь низкой вибрации LVT (low vibration track)

Модернизируя описанные выше конструкции, главной задачей инженеров являлось снижение генерируемых вибраций от движения поездов. Поэтому основной тенденцией к достижению определенного эффекта снижения вибраций являлось использование упругих элементов в конструкциях [1, 14, 78].

Конструкция пути низкой вибрации (LVT) была разработана Роджером Сонневилем, который работал над проектированием конструкций для безбалластного железнодорожного пути с 1960 г. Целью инженера и ученого было снижение вибраций, уменьшение затрат на текущее содержание и обеспечение долговечности пути. Рассматриваемая конструкция LVT (рисунок 1.12) была разработана не сразу, ей предшествовали другие конструкции, например STEDEF, представляющая из себя две полушпалы с аналогичными мерами виброзащиты как в LVT, но соединенные между собой металлической балкой углового профиля, как предполагалось, для обеспечения стабильности ширины колеи.

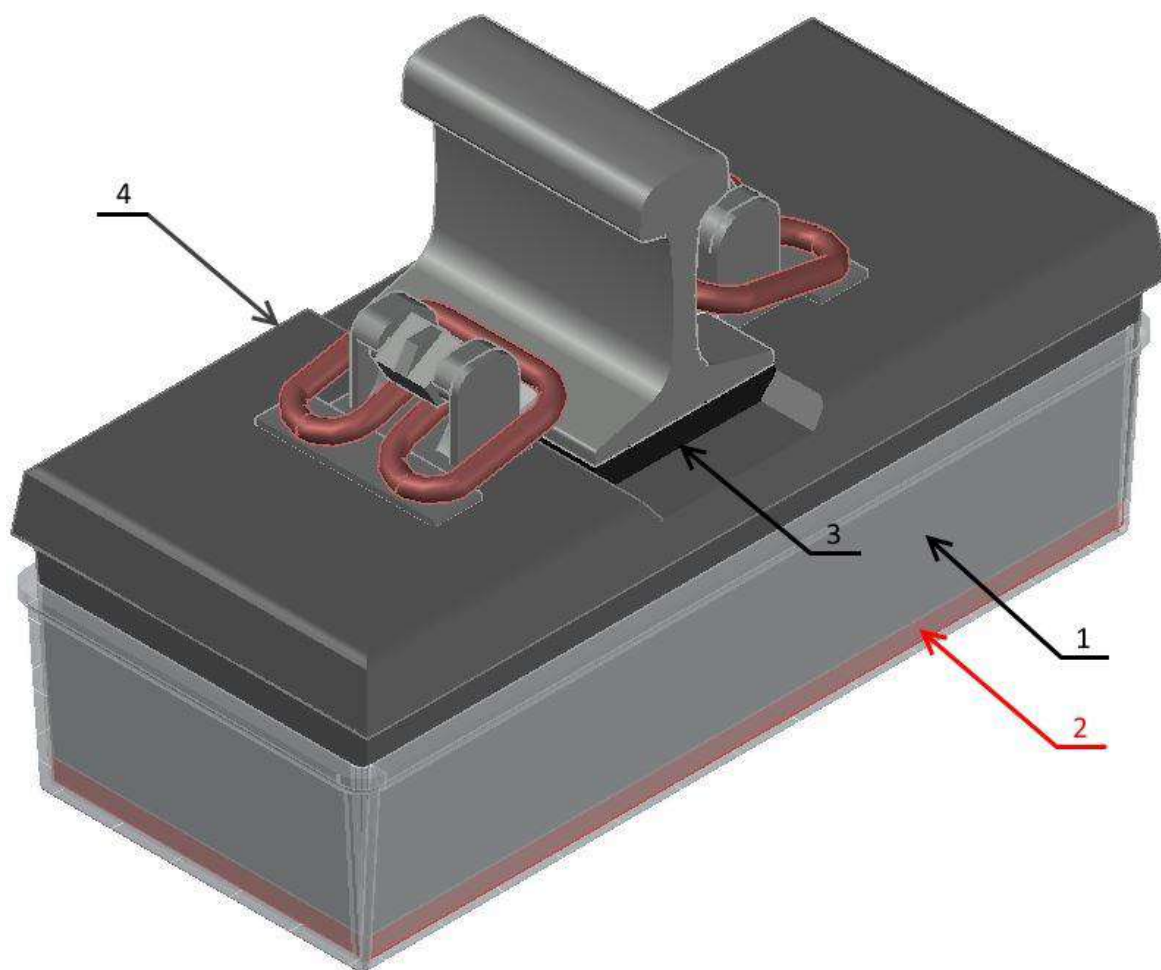


Рисунок 1.12 – Полушпала пути низкой вибрации LVT с рельсовым креплением типа APC-4. Обозначения: 1 – резиновый вибродемпфирующий упругий элемент; 2 – вибродемпфирующий элемент; 3 – подрельсовая прокладка; 4 – бетонный блок.

Конструкция LVT установлена в одних из самых длинных туннелях мира – Готардском базисном туннеле (Цюрих – Милан, максимальная скорость 250 км/ч) и туннеле под проливом Ла-Манш (подводный канал между Англией и Францией (Евротоннель), максимальная скорость 200 км/ч).

В Московском метрополитене данная конструкция установлена на определенных участках пути, например, на Люблинско-Дмитровской линии (участок главных путей от станции «Марьина роща» до «Селигерская»).

Конструкция представляет собой бетонное подрельсовое основание, опирающееся на упругий вибродемпфирующий элемент, который в свою очередь опирается на

резиновый чехол, обволакивающий полушпалок по всей площади контакта с бетонным основанием. Отсутствует химическая адгезия между бетонной полушпалой и резиной, однако резина имеет специальные выступы, которые обеспечивают сцепление.

Полушпала для метрополитена немногим отличается от используемых блоков на наземных железных дорогах. Конструкция применяется с рельсами Р50 и Р65, и отечественными анкерными рельсовыми скреплениями АРС-4. Есть некоторые модификации данной конструкции, отличающиеся шириной полушпалы, то есть главным образом, площадью ее опирания на вибродемпфирующий элемент и, как следствие, эффективностью виброзащиты [78].

Конструкция имеет весомую экономическую составляющую, требует высокой точности монтажа. При текущем содержании работы по регулировке положения рельса по плану и профилю пути являются трудоемкими.

Неисправность анкера в рельсовом скреплении устраняется только заменой всей полушпалы. Оставляет желать лучшего качество изготовления анкера рельсового скрепления и клемм, у которых часто наблюдается излом.

Работы по замене рельса также трудоемки. Требуют одиночного снятия и установки клемм.

Контактный рельс в данной конструкции установлен на путевой бетон и закреплен двумя жесткими клеммами, что обеспечивает стабильность его геометрии подвески и независимость от подрельсового основания.

Достаточно долгая эксплуатация данной конструкции в условиях Московского метрополитена показала ее недостатки. Влияние смазывающих материалов подвижного состава и стрелочных переводов приводит к деформации резиновой оболочки полушпалы. Наблюдается необратимая деформация упругой части конструкции – резиновой оболочки и подшпальной прокладки. В конструкции рельсового скрепления наблюдается износ регуляторов ширины колеи.

Недостаточная надежность связи путевого бетона и резиновой оболочки

полушпалы (рисунок 1.13) отмечается большинством специалистов, непосредственно ответственных за эксплуатацию данной конструкции.

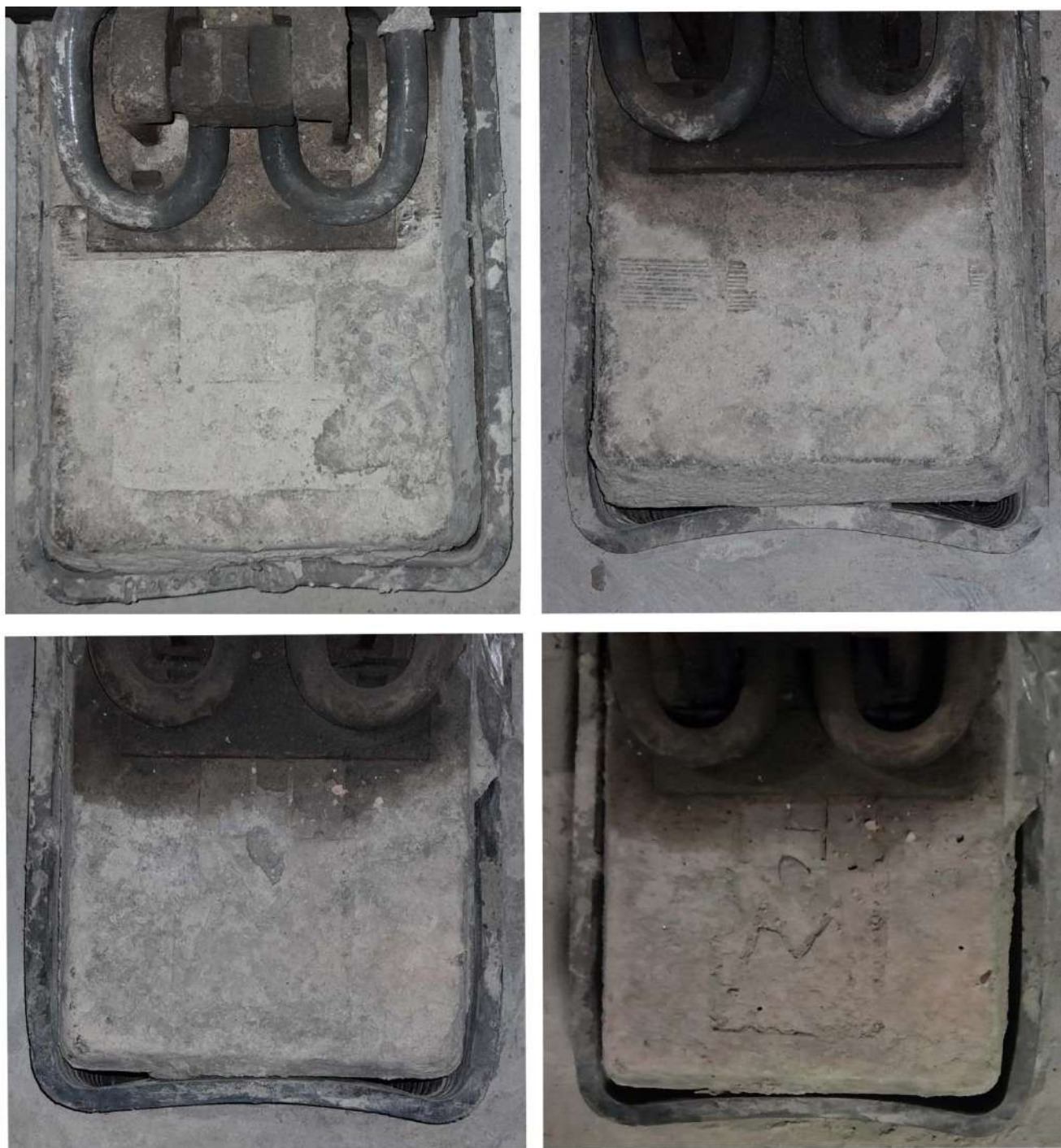


Рисунок 1.13 – Деформация резиновой оболочки LVT-M в месте контакта с путевым бетоном. Соединительная ветвь между Большой кольцевой и Серпуховско-Тимирязевской линией через станцию «Савеловская», ГУП «Московский метрополитен».

1.2.4 Виброгасящая конструкция пути типа ВГС5-65

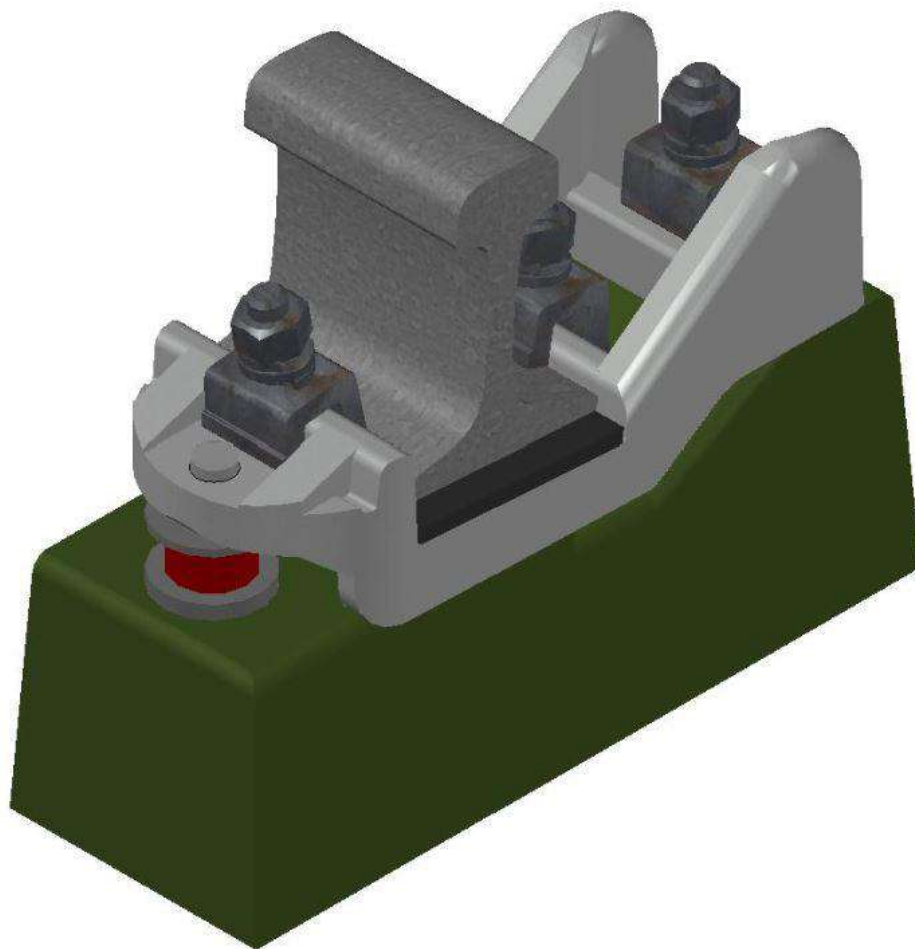


Рисунок 1.14 – Рельсовое крепление для метрополитена типа ВГС5-65, композитная полушпала.

Конструкция верхнего строения пути типа ВГС (рисунок 1.14) была разработана в соответствии со многими исследованиями в сфере защиты зданий и сооружений от вибрационного воздействия подвижного состава метрополитена. Одно из них, проведенное Кравченко Н.Д. [1], привело к результату, что более эффективным методом демпфирования нагрузок от подвижного состава является расположение упругого элемента рядом с рельсом, а сама конструкция была разработана Наумовым Б.В. и рядом других авторов [14]. Конструкция позволяет использовать для снижения колебаний не упругий материал в виде полиуретана или резины, а металлическую пружину за счет рычажного механизма опирания

рельсовой подкладки.

Конструкция показала свою отличительную надежность при применении на Московском метрополитене. Первая укладка конструкции выявила определенные проблемы в зоне контакта композитной полушпалы и путевого бетона. Данная связь вызывала разрушение путевого бетона из-за избыточной жесткости композитной полушпалы. Проблема была решена [5, 9] и дальнейшее применение конструкции, например, на Таганско-Краснопресненской и Люблинско-Дмитровской линиях, было успешным.

ВГС имеет свои модификации, отличающиеся жесткостью упругого элемента и типом рельсового скрепления [41, 66, 78]. Некоторые виды ВГС могут устанавливаться на деревянные шпалы и закрепляться с помощью путевых шурупов.

Интересное и эффективное инженерное решение широко используется в Московском метрополитене для снижения вибраций на участках пути, где это необходимо.

1.2.5 Эластичное крепление рельсов на материалах Sika

Технология эластичного крепления рельсов материалами Sika имеет успешный опыт применения в мире с 1974 г. в таких городах как: Прага, Нюрнберг, Краков, Лондон, Нью-Йорк, Гонконг и т.д. Также имеется опыт применения данной технологии в метрополитенах города Минска и Санкт-Петербурга. В Московском метрополитене она применена на одном из стрелочных переводов Сокольнической линии [41, 78, 80].

Sika Icosit - конструкция пути, основанная на работе полимерных (полиуретан) материалов. Особенностью данной конструкции является снижение вибраций, сохранение прежнего габарита приближения оборудования и возможность модернизации конструкций пути метрополитена.

На данный момент в отечественной практике нет случаев применения данной конструкции в качестве основной с момента приемки пути в

эксплуатацию. Однако, явной, положительной стороной конструкции является возможность модернизации старых конструкций (рисунок 1.15).

Полиуретановый слой под подкладкой является основным упругим элементом, воспринимающим нагрузку от подвижного состава и за счет своего внутреннего трения обеспечивает более равномерную передачу нагрузки от подвижного состава на тело тоннеля. Одновременно присутствует высокая адгезия полиуретана с подкладкой и ремонтным составом.

Деревянные шпалы со старыми скреплениями могут быть демонтированы, в данном случае обеспечивается беспрепятственная очистка и промывка путевого лотка.

Все используемые материалы быстротвердеющие. Требуется строгое соблюдение технологических регламентов на монтаж данной конструкции. Необходимо проводить работы при определенном интервале температуры и влажности воздуха. Постель подкладки для наибольшей адгезии с полиуретаном требует пескоструйной очистки [79].

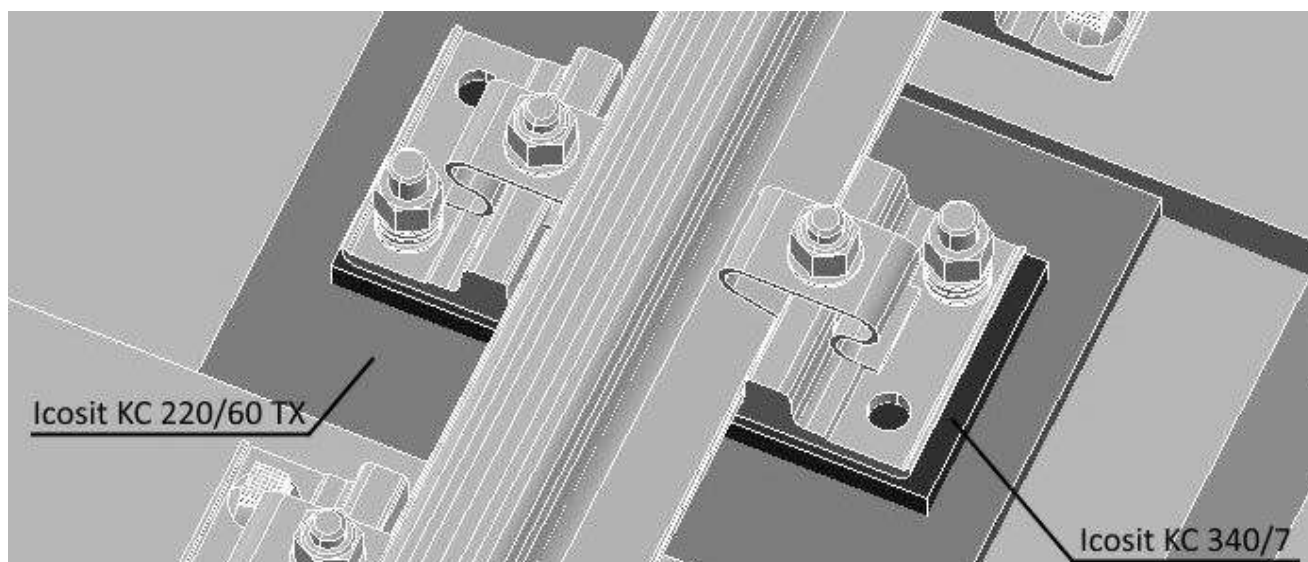


Рисунок 1.15 – Конструкция упругого крепления подкладок на путевой бетон через специальный полиуретановый состав Icosit KC 340/7.

При эксплуатации в условиях Московского метрополитена показала себя неоднозначно по критерию надежности. Наблюдался отрыв полиуретана во

внутренней структуре состава в зоне контррельсовых опор из-за наличия повышенной боковой силы, перпендикулярной оси пути и направленной в сторону крестовины стрелочного перевода. Данный единичный недостаток конструкции наблюдался из-за решения заливки полиуретана под всю контррельсовую подкладку. На одном из участков метрополитена города Санкт-Петербург данная конструкция эксплуатируется успешно.

1.2.6 Система встроенного (сплошное опирание) рельса

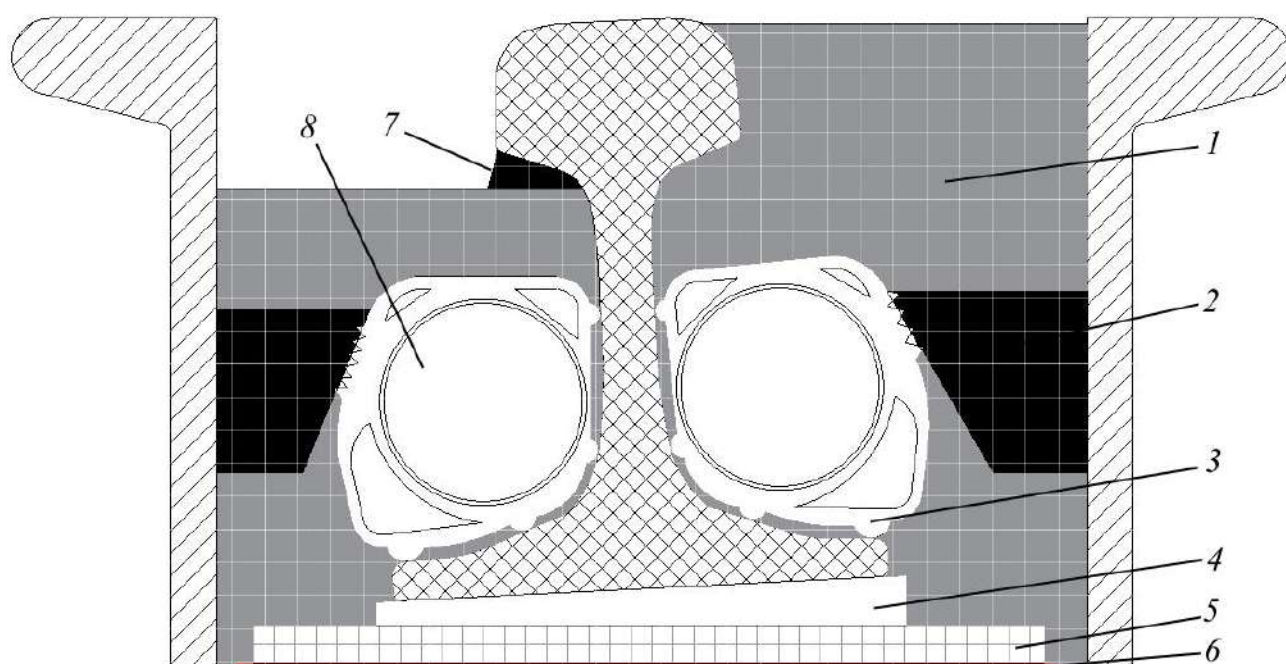


Рисунок 1.16 – Система встроенного рельса Edilon Sedra с рельсом типа UIC54: 1 – заливочная смесь Corkelast; 2 – клин из материала Corkelast; 3 – нейлоновый профиль; 4 – клиновидный резиновый элемент; 5 – эластомер Resilent Stripe 3000; 6 – клей (адгезионный материал) Ediseal; 7 – клиновидная пробка; 8 – сборные трубы из ПВХ.

Одной из зарубежных конструкций, в составе которой присутствуют полиуретановые упругие смеси, является Edilon Sedra.

Рельсы заключены внутри бетонных каналов и окружены эластичным

материалом Corkelast VA60M. Чтобы получить высокое сцепление между элементами конструкции, поверхности обрабатываются грунтовым составом Edilon 21. Рельс опирается на эластомер Resilent Stripe 3000. Данный эластомер расположен ленточно и закреплен на дне канала специальным клеем. На эластомер устанавливается клиновидная прокладка, обеспечивающая упругость и подуклонку рельса. Основание конструкции может состоять из набора резиновых прокладок толщиной от 1 до 5 мм для регулировки рельсов по уровню. По обе стороны шейки рельса устанавливаются трубы из ПВХ. Стабильность труб обеспечивают специальные нейлоновые профили (рисунок 1.16). Трубы снижают количество требуемого заливочного эластичного материала.

Преимуществом данной конструкции является: равноупругость пути, минимальное текущее содержание, стабильность ширины колеи, оптимальная электроизоляция. Кроме того, по сравнению с конструкциями пути, включающими отдельные подрельсовые опоры (шпалы), в данной конструкции проявляются более благоприятные напряжения в рельсах, что снижает интенсивность их износа и вероятность излома и образования других дефектов.

Конструкция имеет минимальную строительную высоту и не требует каких либо рельсовых креплений и подрельсовых опор, что благоприятно отражается на стоимости строительства. Однако следует обратить внимание на большой требуемый объем и высокую стоимость упругого заливочного материала.

Конструкция требует высокой точности выполнения монтажных работ. На путях отечественных метрополитенов не применялась [1, 40, 78, 81].

1.2.7 Конструкция масса-пружина

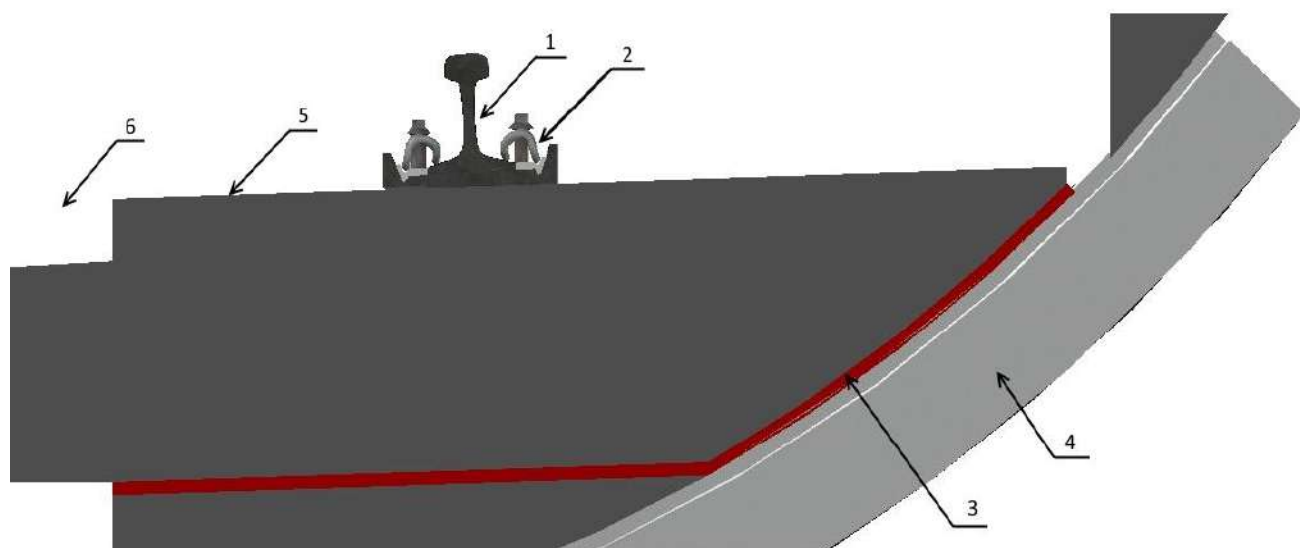


Рисунок 1.17 – Конструкция железнодорожного пути метрополитенов типа «масса-пружина» (полноплоскостная опора из эластомера): 1 – рельс типа Р65; 2 – рельсовое крепление типа DFF30; 3 – эластомер; 4 – тоннельная обделка; 5 – бетонное основание; 6 – дренажный лоток.

Конструкция масса-пружина похожа на некоторые конструкции Нью-Йоркского метрополитена, в которых в качестве упругого материала использовались цельные резиновые ковры [1]. В данной конструкции используется специальный эластомер, который может быть расположен как цельноплоскостно под конструкцией верхнего строения пути, так и ленточно и точно (рисунок 1.17).

Виброизоляция осуществляется с помощью динамической расстыковки верхнего строения пути от тела тоннеля, таким образом – сила, передаваемая на тело тоннеля меньше чем возбуждающая сила от подвижного состава. Достигается этот эффект за счет упругих и демпфирующих свойств эластомера. В основном производством и определением конкретных параметров эластомера для определенного участка пути занимается компания «Getzner», которая производит эластомеры для конструкции «масса-пружина» по линейкам «Sylomer» и «Sylodyn» [82].

1.3 Выводы по главе 1

На основе вышеизложенного обзора можно сделать следующие выводы:

1. Специфические условия эксплуатации пути Московского метрополитена усложняются недостатками конструкций железнодорожного пути, которые проявляются при увеличении наработки пропущенного тоннажа. Данная ситуация усложняется постоянным ростом грузонапряженности линий метро.

2. С увеличением грузонапряженности и интенсивности движения поездов время на текущее содержание пути остается неизменным – ночное технологическое окно, продолжительностью, в среднем, 2 часа 15 минут. Что является фактором, определяющим малообслуживаемость конструкции, как ее необходимой характеристикой.

3. Анализ конструкций железнодорожного пути в условиях эксплуатации Московского метрополитена показал их неоднозначное поведение с точки зрения надежности при высокой интенсивности движения поездов. Неоднозначно ведут себя как старые конструкции пути, так и относительно новые, современные.

4. Большинство исследуемых конструкций показывают сложность и высокую трудоемкость проведения определенных работ по текущему содержанию пути в период ночного технологического «окна».

5. Увеличивающаяся грузонапряженность, наряду с постоянным временем на текущее содержание пути, может привести к ситуации, в которой, трудовых и материальных ресурсов эксплуатационных дистанций будет не хватать для устранения увеличивающегося количества отступлений по ГРК. Факт того, что некоторые участки конструкций имеют наработку тоннажа в 3 млрд. т брутто указывает на необходимость проведения модернизации и ремонта первых линий метрополитена. В том числе, проведения первоочередного ремонта наиболее изношенных участков пути, с целью недопущения ухудшения его технического состояния.

6. Вышеперечисленные выводы подтверждают необходимость определения показателей надежности конструкций верхнего строения пути метрополитена и

сравнения их по данным показателям.

7. Дальнейшая эксплуатация конструкций железнодорожного пути с высокой наработкой тоннажа подразумевает использование нового методического инструмента для определения участков пути, нуждающихся в первоочередном ремонте, перераспределения трудовых и материальных ресурсов и оценке текущего содержания пути.

2 ВЫБОР И ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

В первой главе работы были описаны и проанализированы основные конструкции железнодорожного пути метрополитена, а именно, поведение конструкций в условиях интенсивной эксплуатации, дефекты элементов верхнего строения пути после наработки определенного тоннажа.

Следует отметить зависимость между количеством выходов из строя элементов верхнего строения пути и количеством отклонений по ГРК. Факты, подтверждающие данную зависимость, были приведены в первом разделе, но следует упомянуть их еще раз, с целью корректного выбора методики для решения поставленных задач в данном исследовании.

Например, износ реборд подкладок рельсового скрепления типа «метро» приводит к отступлениям ГРК в плане, а именно, возникновению отступлений типа «рихтовка» и «уширение» («сужение»). Старение, усушка и гниение шпал приводят как к отступлениям по профилю пути, вследствие изменения вертикальных размеров шпалы и возможности необратимо деформироваться, так и к отклонениям по плану – «рихтовка», «уширение (сужение)», в некоторых случаях и нарушение отвода ширины колеи («ОШК»). К данным отступлениям ведет также износ путевых шурупов и разработка шурупных отверстий в подкладках.

Аналогичные явления возникают при использовании подкладок типа КД с упругой клеммой. Различие лишь в интенсивности их возникновения из-за ограничения вертикальной свободы колебаний рельса упругими клеммами, и, как следствие, ограничение амплитуд и уменьшение силы трения между рельсом и ребордами подкладок.

Износ регуляторов ширины колеи и деформация прокладки и оболочки полушпалы LVT-M также являются причинами возникновения отступлений ГРК как по плану, так и по профилю пути.

Конструкция со скреплениями типа ВГС и композитной полушпалой

(ВГС5-65) имеет некоторые недостатки при взаимодействии с путевым бетоном и также проявляет определенные отклонения ГРК, которые описаны в работе [5].

Приведенные выше факты и наблюдения за состоянием пути метрополитена показывают связь между выходом из строя и износом элементов ВСП и возникновением отклонений ГРК.

Следует также рассмотреть варианты, при которых на количество регистрируемых отклонений ГРК будут влиять другие факторы.

Присутствует вероятность создания искусственных отклонений ГРК из-за проведения работ по выправке пути некомпетентным персоналом. Данный человеческий фактор редок ввиду наличия у Московского метрополитена учебно-производственного центра для обучения и повышения квалификации персонала и управленческого устройства предприятия, согласно внутренним инструкциям которого, выправкой пути может заниматься только опытный персонал Службы пути и искусственных сооружений (монтеры пути от 3-го разряда) [42, 72]. С возрастанием сложности работ повышается разряд монтера пути, ответственного за надлежащее производство путевых работ.

Соответственно наибольшая вероятность причин появления отклонений по текущему содержанию ГРК метрополитена приходится на неисправность и износ элементов верхнего строения пути.

Для оценки разных конструкций железнодорожного пути по критерию надежности необходима методика, которая позволит определить показатели надежности, опираясь на дефекты конструкций. Возникновение данных дефектов, как неисправностей железнодорожного пути Московского метрополитена, наиболее нагруженного из всех отечественных метрополитенов и большинства в мире, является дополнительным фактором актуализирующим данное исследование, так как определяются показатели надежности конструкций в условиях интенсивной эксплуатации.

Упоминая термин «надежность» к конструкциям верхнего строения пути метрополитена, следует отметить, что надежность согласно ГОСТ 27.002-15 [83], определяется показателями: безотказность, ремонтпригодность, долговечность и

готовность. Кроме того, упоминаемый государственный стандарт основан на фундаментальных положениях математической и статистической теории надежности [57 - 60].

Показатели надежности прямо связаны с безопасностью движения поездов и такими критериями, как стабильность ГРК, одиночный выход элементов верхнего строения пути, интенсивность возникновения отступлений по плану и профилю пути.

Определение показателей надежности конструкций пути основано на статистических расчетах. Одной из методологий, применяющейся для решения управленческих задач в ОАО «РЖД», эксплуатирующим магистральные железные дороги, является концепция УРРАН (Управление ресурсами, рисками и анализ надежности объектов железнодорожного транспорта на этапах жизненного цикла) [85]. Концепция УРРАН позволяет определять параметры объектов хозяйств инфраструктуры и подвижного состава в ОАО «РЖД», в которые входит надежность, безопасность, безопасность производственных процессов, воздействие на окружающую среду, долговечность и экономика [20 – 24].

Методология УРРАН основана на зарубежной RAMS (в переводе с английского языка: reliability – безотказность, availability – готовность, maintainability – ремонтпригодность, safety - безопасность), она достаточно гибка и применяется ко многим сферам транспорта и промышленности. В полной мере применить методологию RAMS при условиях Российских железных дорог оказалось невозможным. В результате глубокой переработки, дополнений и распространения на стоимость жизненного цикла была разработана концепция УРРАН [86].

Концепция УРРАН в большей степени основана на статистических расчетах и на нормативно-методической базе, которая охватывает большинство объектов инфраструктуры ОАО «РЖД», в том числе железнодорожный путь. Для определения показателей надежности и оценки различных рисков в путевом хозяйстве ОАО «РЖД» предназначены методики:

1. Методика расчета показателей надежности и безопасности

функционирования верхнего строения пути [87];

2. Методика оценки рисков функционирования верхнего строения железнодорожного пути [88].

Основой для дальнейших исследований принят математический аппарат методики расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути (пункт 1). Методика разработана согласно ГОСТ 27.002-15 [83], основана на положениях математической и статистической теории надежности, и, позволит определить ключевые показатели надежности верхнего строения пути метрополитена [20 – 24, 83].

Кроме того, из-за простоты используемого математического аппарата, данная методика может использовать практически любые исходные данные для расчета показателей надежности железнодорожного пути. В том числе, это количество отклонений по текущему содержанию ГРК и неисправных элементов верхнего строения пути.

Данная методика в рамках настоящего исследования позволит определить показатели безотказности, ремонтпригодности, долговечности, готовности и функциональной безопасности железнодорожного пути (таблицы 2.1- 2.5) [83, 89].

Показатель безотказности, в данной работе, применительно к верхнему строению пути, отражает свойство верхнего строения пути, его элементов и деталей непрерывно поддерживать размеры ГРК в допустимых интервалах в течение некоторой определенной наработки тоннажа в конкретных условиях эксплуатации. При этом наработкой для верхнего строения пути является пропущенный тоннаж, который определяется за рассматриваемый интервал наблюдения.

Номенклатура показателей безотказности приведена в таблице 2.1. Здесь и далее, в таблицах 2.1 по 2.5, указаны показатели, рассчитываемые в исследовании для конструкций пути метрополитена.

Таблица 2.1

Номенклатура показателей безотказности верхнего строения пути

Наименование показателя	Обозначение	Размерность
Средняя наработка на отказ	X_0	млн. т брутто (ч)
Интенсивность отказов	λ	1/ млн. т брутто
Параметр потока отказов пути	$\omega(x)$	1/ млн. т брутто
Вероятность безотказной работы	$P(x)$	безразмерный
Вероятность отказа	$Q(x)$	безразмерный

Ремонтопригодность верхнего строения пути – это его свойство, заключающееся в приспособленности к предупреждению, обнаружению причин возникновения отказов, повреждений, а также поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем проведения текущего обслуживания и ремонтов.

Ремонтопригодность верхнего строения пути характеризуется средним временем простоя (закрытия для движения) железнодорожного пути и средним временем его восстановления, а также средними наработками между планово-предупредительными техническими обслуживаниями и плановыми ремонтами (по их видам), продолжительностью и трудоемкостью этих планово-предупредительных технических обслуживаний и плановых ремонтов.

Номенклатура показателей ремонтопригодности для верхнего строения пути приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Номенклатура показателей ремонтпригодности верхнего строения пути

Наименование показателя	Обозначение	Размерность
Среднее время до восстановления	$T_{\text{в}}$	ч
Суммарная продолжительность технического обслуживания	$\tau_{\text{ТО}}^{\Sigma}$	ч

Долговечность верхнего строения пути – это его свойство сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонтов.

При этом в отличие от безотказности долговечность характеризует продолжительность работоспособного состояния объекта по суммарной наработке, прерываемой периодами до восстановления, планового технического обслуживания и ремонта.

Таблица 2.3

Номенклатура показателей долговечности верхнего строения пути

Наименование показателя	Обозначение	Размерность
Средний срок службы	$T_{\text{сл}}$	год (месяц)

Готовность верхнего строения пути – это его свойство выполнять заданные функции в произвольный момент времени при условии выполнения плановых технического обслуживания и ремонтов.

Номенклатура показателей готовности для верхнего строения пути в соответствии с [89] приведена в таблице 2.4.

Таблица 2.4

Номенклатура показателей готовности верхнего строения пути

Наименование показателя	Обозначение	Размерность
Коэффициент готовности	K_{Γ}	безразмерный
Коэффициент оперативной готовности	$K_{o.\Gamma}(\Delta t)$	безразмерный
Коэффициент технической готовности	$K_{т.\Gamma}$	безразмерный

Функциональная безопасность железнодорожного пути характеризует его способность обеспечивать бесперебойный пропуск поездов безопасно, то есть без возникновения опасных отказов (отступлений по текущему содержанию ГРК IV и V степеней).

Номенклатура показателей функциональной безопасности для верхнего строения пути в соответствии с [89] приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5

Номенклатура показателей функциональной безопасности верхнего строения пути

Наименование показателя	Обозначение	Размерность
Средняя наработка до опасного отказа	$X_{оп}$	млн. т брутто
Интенсивность опасных отказов	$\lambda_{оп}(x)$	1/млн. т брутто (1/ч)
Вероятность безопасной работы	$P_{б}(x)$	безразмерный
Вероятность опасного отказа	$Q_{оп}(x)$	безразмерный
Среднее время возврата к безопасному состоянию	$T_{вб}$	ч

Таким образом, данная методика позволяет определить основные показатели надежности верхнего строения пути, а дальнейший ее разбор и оптимизация под эксплуатационные условия метрополитена покажет гибкость ее математического аппарата.

2.1 Выбор исходных данных

Выбранная методика расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути основана на статистических расчетах. В качестве исходных данных расчетов методики на магистральных железных дорогах приняты единичные отказы верхнего строения пути согласно системе КАС АНТ [61].

Препятствием применения используемой в ОАО «РЖД» методики без адаптации является не использование Московским метрополитеном системы КАС АНТ, либо другой, идентичной ей системы, для регистрации отказов элементов верхнего строения пути [92].

Таким образом, встает вопрос об использовании нового типа данных, которые, в первую очередь достоверны и применимы к расчетам выбранной методики.

В рамках настоящего исследования принято решение об использовании в качестве исходных данных единичных отступлений от норм текущего содержания ГРК, регистрируемых мобильными средствами диагностики пути. Основными причинами данного выбора являются:

1. Постоянная периодичность проверки состояния путей (состояния ГРК) мобильными диагностическими комплексами.
2. Использование при проверке состояния пути последних версий программного обеспечения от ООО «Фирма ТВЕМА» [69].
3. Отсутствие человеческого фактора при учете отступлений ГРК.
4. Невозможность внесения изменений в данные с проезда вагона-путеизмерителя.
5. Точность и современные технологии определения состояния ГРК [90, 91].

Таким образом, обеспечивается достоверность данных, которые, впоследствии, будут обработаны, а дальнейшие расчеты будут полностью основаны на них.

В качестве единичного отказа приняты отступления ГРК II-V степеней, согласно сводным ведомостям формы ПУ-32 проездов путеизмерительного вагона. Здесь и далее применяемый термин «отказ» идентичен термину «отступление» и подразумевает под собой одно единичное отступление ГРК, определяемое утвержденными на метрополитене инструкциями и правилами [40, 46].

Подразделение отклонений значений ГРК от номинальных значений на степени предусмотрено для определения видов и сроков выполнения работ по устранению и предупреждению появления отступлений при обеспечении безопасности движения поездов. Разделение отступлений на степени производится в зависимости от очередности проведения путевых работ и обеспечения безопасности движения:

- первая (I) степень – допускаемые отклонения от номинальных значений в содержании ГРК, не требующие устранения;
- вторая (II) степень – отступления, устраняемые в плановом порядке;
- третья (III) степень – отступления, устраняемые в первоочередном порядке, в срок не более 3-х суток;
- отступления, требующие проведения неотложных работ, являются отступлениями четвертой (IV) степени и должны устраняться в суточный срок;
- пятая (V) степень – чрезвычайные неисправности при нарушении целостности элементов конструкции пути, требующие закрытия движения поездов и проведения незамедлительных работ.

В свою очередь, каждая степень и каждое отступление имеет свою балловую оценку, возрастающую пропорционально величине степени (таблица 2.6). Оценка километрового участка пути от «отлично» до «удовлетворительно» проводится по сумме штрафных баллов всех отступлений на участке. С помощью балловой оценки определяется качество текущего содержания пути в рамках околотка либо дистанции.

Таблица 2.6

Балловая оценка отступлений и их сочетаний по степеням

Степень отступления	Балловая* оценка
II	1
III	10
IV	100
Сочетания отступлений 3-й степени	100
V	500

* численные показатели, согласно [46], являются ориентировочными и могут быть уточнены в процессе опытной эксплуатации.

Параметры и обозначения отступлений от номинальных значений размеров ГРК, контролируемые и оцениваемые путеизмерителем, и отраженные на графических диаграммах («путевых лентах»):

- ширина колеи (СУЖ – сужения, УШ – уширения, ОШК – отводы ширины колеи);
- положение рельсовых нитей по уровню (П – перекосы, У – плавные отклонения уровня);
- просадки рельсовых нитей в вертикальной плоскости (Пр.п (л) – просадки по правой и левой рельсовым нитям);
- положение рельсовых нитей в плане (Р – рихтовка, Р.нр – рихтовка нерихтовочной нити);
- сочетания отступлений по рихтовке с перекосами и просадками и последовательные отступления по просадкам, рихтовке и перекосам (Р+П, Р.нр+П, Р+Пр.п (л), Р.нр+Пр.п (л) – сочетания отступлений в плане с перекосами и просадками; ПП, ПрПр – сочетания трех и более перекосов и просадок соответственно);
- параметры устройства кривых в плане и по возвышению наружного рельса (Укл – уклон отвода возвышения, Уск – непогашенное ускорение). Данные отступления не требуют планового или внеочередного устранения и скорее несут

информативный характер [71].

Источником данных является ГУП «Московский метрополитен» Служба пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры, откуда были запрошены и получены ведомости помесечных контрольных проездов путеизмерительного вагона «Синергия 1» за 2016-2018 годы включительно по Таганско-Краснопресненской (ПЧ-6) и по Люблинско-Дмитровской (ПЧ-7) линии. Пример сводной ведомости формы ПУ-32 контрольного проезда вагона-путеизмерителя «Синергия 1» представлен в приложении Б.

Выбор данных с контрольных проездов путеизмерителя также связан с отсутствием в них «бракованных» проездов, обусловленных неправильной настройкой путеизмерителя либо со сбоем измерительных средств. Если проезд определен как «бракованный», такой проезд корректируется либо обнуляется и проводится заново.

Выбор полигона железнодорожного пути Таганско-Краснопресненской линии в качестве объекта исследования обусловлен наличием на ней протяженного полигона типовой конструкции пути на ряду с современной ВГС5-65. А также, из-за наличия открытых и рамповых участков пути, которые являются объектом повышенного исследовательского интереса в связи с расположением на них переходных участков.

Выбор Люблинско-Дмитровской линии обусловлен использованием на ней конструкций типа КДП-65, LVT-M и ВГС5-65, которые имеют достаточную протяженность для проведения расчетов согласно применяемой методике.

Таким образом, имеющиеся данные:

1. Перекрывают достаточный промежуток времени (2 календарных года – 24 проезда путеизмерительного вагона);
2. Охватывают четыре основные конструкции метрополитена (типовая с промежуточным рельсовым скреплением типа «метро», типовая с промежуточным рельсовым скреплением КД, ВГС5-65 и LVT);
3. Достоверны и непосредственно отражают текущее состояние верхнего строения пути;

4. Связаны с выходом из строя элементов верхнего строения пути и их износом (кроме рельсов, так как износ рельсов задается в параметры проезда путеизмерителя).

2.2 Оптимизация и обоснование методики для определения показателей надежности верхнего строения пути метрополитена

В данном разделе автор отразит свою работу по оптимизации методики, предназначенной для статистических расчетов показателей надежности верхнего строения пути магистральных железных дорог, под условия эксплуатации пути метрополитена.

Как было сказано автором ранее, надежность согласно ГОСТ 27.002-15 [83], определяется показателями: безотказность, ремонтпригодность, долговечность и готовность. Выбранная для исследования верхнего строения пути методика расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути ОАО «РЖД» предназначена для расчета всех показателей надежности согласно ГОСТ 27.002-15, поэтому автор отдельно остановится на каждом показателе надежности, покажет, как он рассчитывается для метрополитена и отразит то, что необходимо изменить в составляющих расчетов.

Автором также будет раскрыт порядок применения основных положений методики к полигону путей метрополитена.

2.2.1 Разделение полигона дистанции пути метрополитена на однородные участки для статистического расчета

В рамках используемой методики, с целью обеспечения достоверности результатов расчета, на участке пути (полигоне обследования) выделяются группы однородных объектов (участков) – его части с одинаковыми конструкцией верхнего строения пути и эксплуатационными условиями, а также наработкой

тоннажа.

Разделение полигона дистанции пути метрополитена происходит по следующим критериям:

1. Расположение путей (подземное, наземное, надземное).

Главным отличием между разными расположениями пути метрополитена служит его нижнее строение пути. Верхнее строение пути в тоннеле метрополитена преимущественно расположено на путевом бетоне, в наземном расположении – на щебеночном основании, а на метромостах – как на щебеночном, так и на бетонном. В зависимости от расположения на путь воздействуют дополнительные природные факторы, которые оказывают влияние на состояние ГРК (например, пучины и выплески на щебеночном балласте открытого участка ст. «Выхино» – «Рязанский проспект»). Поэтому целесообразно деление полигона на однородные участки согласно их расположению.

2. Нарботка тоннажа с момента открытия линии метрополитена.

Нарботка тоннажа важный фактор – он отражает насколько долго и интенсивно эксплуатировался путь. Соответственно целесообразно деление участков пути по наработке тоннажа, таким образом можно будет сравнить как новые участки пути с низкой, так и старые с большей наработкой.

Следует рассмотреть вопрос того, с какого момента эксплуатации нужно рассчитывать наработку конструкций пути метрополитена. Например, некоторые конструкции пути Таганско-Краснопресненской линии эксплуатируются с 1966 года, и является фактом отсутствие капитального ремонта пути с момента открытия перегона. Это значит, что, несомненно, ремонты проводились, однако не была сменена рельсошпальная решетка полностью из-за причин, описанных в разделе 1.1 настоящей работы. Была проведена плановая сплошная смена рельсов в соответствии с их наработкой, однако, элементы рельсовых скреплений и шпалы заменялись по мере необходимости. В настоящее время на путях Таганско-Краснопресненской линии сохранились в большом количестве шпалы и рельсовые скрепления, эксплуатирующиеся с момента открытия перегона в 1966

году. Таким образом, пропущенный тоннаж верхнего строения пути метрополитена не может быть обнулен в определенный момент времени ввиду отсутствия капитального ремонта пути.

Учитывая факт, что данные по грузонапряженности линий, предоставленные ГУП «Московский метрополитен», содержат информацию с 1991 года, величины грузонапряженности за период с 1966 по 1991 год определены методом построения и продления до 1966 года линейной зависимости от срока эксплуатации пути с 1991 по 2019 год.

3. План пути (прямые участки, кривые).

План пути является одним из решающих факторов при делении полигона дистанции пути на однородные участки.

Во-первых, план пути подразумевает изменение возвышения наружной нити в кривой и ширины колеи в зависимости от радиуса кривой. А также, наличие отводов ширины колеи и возвышения рельсов [70, 77].

Во-вторых, в метрополитене при текущем содержании путей очевидна большая концентрированность отступлений по ГРК на кривых участках пути. Это связано в первую очередь наличием непогашенного ускорения и боковых сил, приложенных горизонтально на головку рельса, при прохождении подвижным составом кривого участка пути и возникновением дополнительных колебаний подвижного состава (виляние, галлопирование и т.д.) [29, 33]. Состояние ГРК в кривых участках можно сравнить с прямыми участками по графическим диаграммам проездов мобильных средств диагностики (путеизмерителей).

4. Тип конструкции верхнего строения пути.

Верхнее строение пути метрополитена является сложной технической системой, состоящей из следующих отдельных элементов: рельсы, шпалы либо полушпалы, рельсовые скрепления, балластная призма либо путевой бетон (лежни и т.п.), рельсовые цепи, стрелочные переводы, контактный рельс [25 – 28, 34, 41, 70, 77, 78].

Очевидно, что деление полигона дистанции по типу конструкции имеет смысл для отделения основных конструкций пути и дальнейшего их сравнения.

Исследуемые конструкции практически полностью конструктивно отличаются друг от друга. Более подробно они описаны в подразделе 1.2.

5. Участки разгона-торможения (участки пути перед станциями, станционные и после станций) и установленной средней скорости (80 км/ч).

Достаточно актуально, с научной точки зрения, оценка конструкций безбалластного пути на разных подрельсовых основаниях и при применении разного вида рельсовых креплений.

Пример разделения участка Люблинско-Дмитровской линии Московского метрополитена на однородные участки с помощью программы Microsoft Excel приведен на рисунке 2.1.

Станция	Год	Глубина	Расположение	Нумерация	Полярность	Пикет	Метр	План	Профиль	Прот-ть	Тип констр-ии	Год	Тоннаж
	постройки	заложения				85		0					
				63	0	84	94.6	0		22.3	д/кдп		832.01
						84	94.6	300					
						84		300					
						83		300					
						82		300					
				64	0	81	80.2	300		314.4	д/кдп		832.01
						81	80.2	0					
						81		0					
Кожу- ховская	1996	12				80		0					
						79		0					
						78		0					
				65	0	77	97.3	0		382.9	д/кдп		832.01
						77	97.3	600					
						77		600					
				66	0	76	16.3	600		175.1	д/кдп		832.01
						76	16.3	0					
						76		0					
				67	0	75	54.9	0		62	д/кдп		832.01
						75	54.9	600					
						75		600					
						74		600					
						73		600					
				68	0	72	20.9	600		334	д/кдп		832.01
						72	20.9	0					
				69	0	72	4.5	0		16.4	д/кдп		832.01
						72	4.5	600					
						72		600					
						71		600					
				70	0	70	11.2	600		193.3	д/кдп		832.01
						70	11.2	0					
						70		0					
						69		0					
						68		0			д/кдп		

Рисунок 2.1 – Пример разделения участка полигона I-го главного пути Люблинско-Дмитровской линии на однородные участки.

2.2.2 Пропущенный тоннаж исследуемых конструкций

Для расчета пропущенного тоннажа конструкций пути Московского метрополитена были запрошены данные по грузонапряженности линий за весь срок эксплуатации.

Пропущенный тоннаж участка пути обнуляется только после проведения капитального ремонта. В разделе 1.1 настоящего исследования были описаны условия содержания пути в метрополитене и были указаны основные причины невозможности проведения капитального ремонта в тоннеле. И по сей день на путях метрополитена можно наблюдать большое количество рельсовых скреплений и подрельсовых оснований эксплуатирующихся с момента пуска участка. Поэтому, пропущенный тоннаж для конструкций метрополитена – это сумма годовых значений грузонапряженности линий за весь срок эксплуатации.

Для Люблинско-Дмитровской линии пропущенный тоннаж можно рассчитать согласно полученным у ГУП «Московский метрополитен» данным о грузонапряженности.

Некоторые участки Таганско-Краснопресненской линии эксплуатируются с 1966 года. Данных по величине грузонапряженности за столь поздний период нет в сохранности. ГУП «Московский метрополитен» предоставлены данные по грузонапряженности только с 1991 года. Таким образом, для получения данных с 1966 года, была построена линейная зависимость, являющаяся усредненной функцией роста грузонапряженности из года в год. Был определен угол наклона данной линии и была спрогнозирована величина грузонапряженности до 1966 года (рисунок 2.2, 2.3).

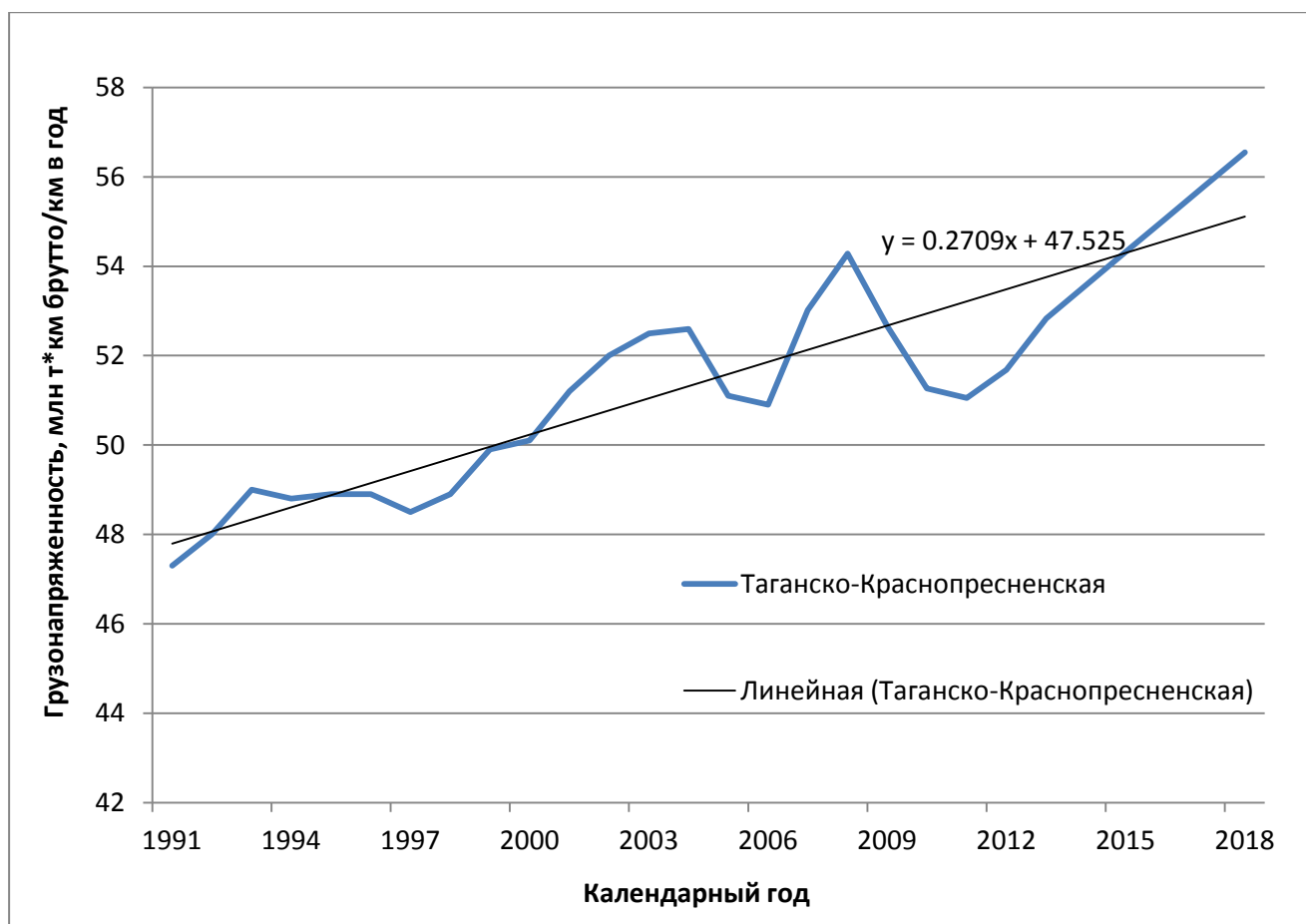


Рисунок 2.2 – Грузонапряженность Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена с 1991 года.

Тангенс угла наклона линии, описанной линейной функцией $y=0,2709 \cdot x + 47,525$, изображенной на рисунке 2.2, равен 0,2709. Значит, угол наклона линии равен $\arctg(0,2705) = 15,15^\circ$.

Таким образом, средняя линия была продолжена до 1966 года для вычисления приблизительного пропущенного тоннажа участков полигона Таганско-Краснопресненской линии метрополитена. Определенный пропущенный тоннаж представлен в таблице 2.7.

Таблица 2.7

Пропущенный тоннаж участков полигона Таганско-Краснопресненской линии

Участок	Год пуска	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто
ст. Таганская – Выхино	1966	2275,953
ст. Китай Город – Таганская	1971	2136,153
ст. Октябрьское поле – Баррикадная	1972	2106,558
ст. Баррикадная – Кузнецкий мост	1975	2014,503
ст. Щукинская – Планерная		

2.2.3 Безотказность верхнего строения пути

Определение показателя безотказности верхнего строения пути было приведено ранее в разделе 2. Номенклатура показателей безотказности приведена в таблице 2.1.

Применительно к метрополитену присутствуют определенные различия с магистральными железными дорогами в расчете данного параметра.

2.2.3.1 Средняя наработка на отказ

Средняя наработка на отказ показывает объем выполненной работы верхнего строения пути метрополитена в млн. т брутто, после наработки которого, возникнет принятый в расчете отказ (отступление по текущему содержанию ГРК).

Средняя наработка X_0 на отказ (по объему выполненной работы, млн. т брутто) верхнего строения пути для группы однородных участков пути вычисляется по следующей формуле

$$X_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * l_i}{r * L}, \quad (2.1)$$

где x_i – объем выполненной работы i -го объекта железнодорожного пути из группы однородных объектов верхнего строения пути на заданном полигоне за интервал наблюдения, млн. т брутто;

l_i – протяженность i -го объекта железнодорожного пути из группы однородных объектов верхнего строения пути на заданном полигоне, км;

n – количество однородных участков верхнего строения пути в одной группе;

$r > 0$ – суммарное количество отказов в группе однородных участков верхнего строения пути за интервал наблюдения (отступления по текущему содержанию ГРК II и III степени согласно ведомостям проезда путеизмерительного вагона);

L – суммарная протяженность однородных участков в группе, км.

Из перечисленных выше составляющих формулы 2.1 следует подробно остановиться на параметре r . Как говорилось ранее (раздел 2.1), за единичные отказы верхнего строения пути приняты в исследовании отступления в содержании ГРК II-V степени, выявленные при проезде путеизмерительного вагона.

Учет в данной формуле только отступлений II и III степени согласно ведомостям проезда путеизмерительного вагона объясняется несколькими причинами.

Во-первых, II и III степени самые распространенные отступления по текущему содержанию ГРК как на принятых в расчетах полигонах пути, так и на всем метрополитене (приложение Г, таблица Г1). Например, по результатам контрольных проездов путеизмерительного вагона «Синергия» 1 по Люблинско-Дмитровской линии, в период с 2017 по 2018 год включительно, IV и V степеней отступлений в содержании ГРК обнаружено не было на всем полигоне линии. На Таганско-Краснопресненской линии таких отступлений, по результатам

обработки ведомостей помесечных проездов вагона-путеизмерителя за 2016-2018 год (36 проездов), было обнаружено 129 шт.

Во-вторых, IV и V степени отступлений по текущему содержанию ГРК требуют, согласно [71], ограничения скорости до 25 км/ч либо остановки движения до устранения отступления. Поэтому для данных отступлений будет проведен отдельный расчет показателей надежности, так как они напрямую влияют на график и безопасность движения поездов.

Если не известны объемы выполненной работы x_i , а задана средняя грузонапряженность для группы однородных участков, то формула (2.1) приобретает вид

$$X_0 = \frac{\Gamma * L}{r}, \quad (2.2)$$

где Γ – средняя грузонапряженность, млн. т*км брутто/км в год.

Средняя наработка на отказ (по времени) применяется для расчета коэффициента готовности. Для расчета данного показателя выделять группы однородных участков не обязательно (он может быть рассчитан как для группы однородных участков, так и для произвольного участка пути).

Средняя наработка на отказ (по времени) верхнего строения пути для группы однородных участков вычисляется по следующей формуле

$$X_0^t = \frac{T_n - T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma}}{r}, \quad (2.3)$$

где T_n – интервал наблюдения, ч;

$r > 0$ – суммарное количество отказов исследуемого участка верхнего строения пути за интервал наблюдения;

$T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma}$ – суммарная продолжительность планового технического обслуживания и ремонта участка верхнего строения пути за интервал наблюдения, ч, вычисляемая по формуле:

$$T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^s t_{\text{ТОиР}i}, \quad (2.4)$$

где $t_{\text{ТОиР}i}$ – продолжительность i -го планового технического обслуживания или ремонта всех видов, выполненного на объектах группы однородных участков пути в течение интервала наблюдения, ч. Интервал технического обслуживания пути метрополитена постоянен, и равен продолжительности ночного технологического «окна» $t_{\text{ТОиР}i} = 2,25$ часа (2 часа 15 минут).

s – общее количество технических обслуживаний или ремонтов всех видов, выполненных за интервал наблюдения на объектах группы однородных участков пути.

Данный параметр расчета вычисляется исходя из графика работы путейских бригад в рамках одного околотка эксплуатационной дистанции. Интервал наблюдения равен одному календарному году. С учетом выходных дней путейских бригад, количество ночных «окон» между двумя контрольными проездами путеизмерительного вагона, во время которых проводятся работы по выправке пути, равно 16. Данному числу равно среднее арифметическое значение количества ночных «окон», во время которых осуществлялась выправка пути, вычисленное согласно данным, полученным с эксплуатационного околотка Таганско-Краснопресненской линии (подраздел 2.2.4.1 настоящего исследования). Таким образом, умножая данное число на количество проездов в год, получим $s = 16 * 12 = 192$ ночных технологических «окон» в год на ремонт пути в пределах околотка.

Однако параметр s относится ко времени выполнения планового технического обслуживания и ремонта именно на группе однородных участков, а не ко всему околотку либо дистанции. Таким образом, целесообразно рассчитать время на ремонт одного километра пути в пределах одного околотка, чтобы в дальнейшем определять s как произведение данной величины на длину исследуемой группы участков пути.

Средняя длина околотка $L_{\text{ср}}$ на Люблинско-Дмитровской линии (ПЧ-7), по

данным Службы пути и искусственных сооружений метрополитена, составляет 11,2 км. Средняя длина околотка на Таганско-Краснопресненской (ПЧ-6) составляет 12,3 км.

Из этого следует, что суммарная продолжительность планового технического обслуживания и ремонта участка верхнего строения пути за интервал наблюдения вычисляется как

$$T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma} = \frac{t_{\text{ТОиР}i} * S}{L_{\text{ср}}} * L. \quad (2.5)$$

2.2.3.2 Интенсивность отказов верхнего строения пути

Данный показатель вычисляется как обратная величина наработке на отказ верхнего строения пути (см. формулы (2.3), (2.4), (2.5) и (2.8)):

$$\lambda = \frac{1}{X_0}; \lambda^t = \frac{1}{X_0^t}. \quad (2.6)$$

2.2.3.3 Параметр потока отказов

Параметр потока отказов верхнего строения пути по объему выполненной работы определяется по следующей формуле

$$\omega = \frac{r}{x}, \quad (2.7)$$

где $x > 0$ – объем выполненной работы участка пути в течение 1 года, млн. т брутто;

r – количество отказов на участке пути в течение 1 года.

2.2.3.4 Вероятность безотказной работы верхнего строения пути

Приняв допущение, что плотность потока отказов верхнего строения пути распределена по экспоненциальному закону, вероятность безотказной работы в заданном интервале наработки Δx определяется по следующей формуле

$$P(x) = \exp(-\lambda * \Delta x), \quad (2.8)$$

где λ – интенсивность отказов, вычисляемая по (2.6), 1/млн. т брутто;
 Δx – интервал наработки, млн. т брутто.

2.2.3.5 Вероятность отказа верхнего строения пути

Вероятность отказа верхнего строения пути является дополнением до единицы вероятности безотказной работы (см. (2.8)) и определяется по следующей формуле

$$Q(x) = 1 - P(x) = 1 - \exp(-\lambda * \Delta x). \quad (2.9)$$

2.2.4 Ремонтопригодность верхнего строения пути

2.2.4.1 Ремонтопригодность верхнего строения пути исходя из фактических возможностей путевых бригад

Для всех групп однородных участков должно соблюдаться неравенство

$$T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma} = \frac{t_{\text{ТО}} * S}{L_{\text{ср}}} * L_i \geq \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{r_{\text{факт}}^1} * t_{\text{ТО}}, \quad (2.10)$$

где $T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma}$ – суммарная продолжительность планового технического обслуживания и ремонта участка верхнего строения пути за интервал наблюдения, ч;
 r_i – фактическое количество отступлений (отказов) II и III степени по содержанию ГРК в группе однородных участков пути, имеющих суммарную протяженность L ;
 $r_{\text{факт}}^1$ – среднее количество отступлений, устраняемых во время одного ночного технологического «окна» в пределах одного околотка эксплуатационной дистанции пути;
 $t_{\text{ТО}}$ – продолжительность ночного технологического «окна» - 2 часа 15 минут, или, 2,25 часа.

Левая часть неравенства (2.10) отражает фактическое количество времени, которое может уделить путевая бригада в пределах одного околотка на устранение отступлений, оштрафованных определенным баллом, за рассматриваемый интервал наблюдения (месяц, год).

Правая часть неравенства (2.10) отражает количество времени фактически необходимое для устранения всех отступлений оштрафованных баллами за рассматриваемый интервал наблюдения.

Для обеспечения ремонтпригодности рассматриваемых групп однородных участков пути необходимо, чтобы левая часть неравенства была всегда больше либо равна правой части.

Если не соблюдается данное неравенство (2.10), теоретически, должно происходить постепенное ухудшение состояния пути и увеличение балловой оценки рассматриваемых участков. Несоблюдение неравенства показывает на необходимость привлечения дополнительных трудовых ресурсов для ремонта данных участков.

Для определения $r_{\text{факт}}^1$ были проанализированы помесечные ведомости устранения отступлений в геометрии рельсовой колеи, полученные с 64 околотка (ПД-64) Таганско-Краснопресненской линии (ПЧ-6) (участок между станциями «Кузнецкий Мост» и «Полежаевская» от ПК 017+00 до ПК 082+50). На

рассматриваемом околотеке присутствует шесть стрелочных переводов марки 1/9 Р50 на щебеночном основании. Путь вне стрелочных переводов на данном участке представляет собой типовую конструкцию пути метрополитена (п. 1.2.1).

Таким образом, анализ данного околотека покажет информацию о возможностях путевых бригад в условиях работы на достаточно сложном по текущему содержанию участке пути. Актуален анализ фактических данных по устранению отступлений в пределах одного околотека метрополитена.

Во-первых, анализ покажет возможности путевых бригад по устранению отступлений наряду с проведением других работ по текущему содержанию пути (шлифовка и замена рельсов, разгонка рельсовых стыков, установка противоугонов, замена элементов верхнего строения пути на стрелочных переводах, месячные и квартальные осмотры и т.д.).

Во-вторых, на метрополитене ведется строгий учет устраненных отступлений в содержании геометрии рельсовой колеи с помощью графических диаграмм («путевых лент») и ведомостей об устранении. Они содержат дату устранения, вид отступления с его длиной и отклонением, и фамилию ответственного за устранение.

Данные с ведомостей устранения отступлений приведены на рисунках 2.4 – 2.6 и в таблице 2.8.



Рисунок 2.3 – Количество устраненных штрафных баллов согласно ежемесячным ведомостям устранения отступлений по текущему содержанию ГРК в пределах одного околотка.

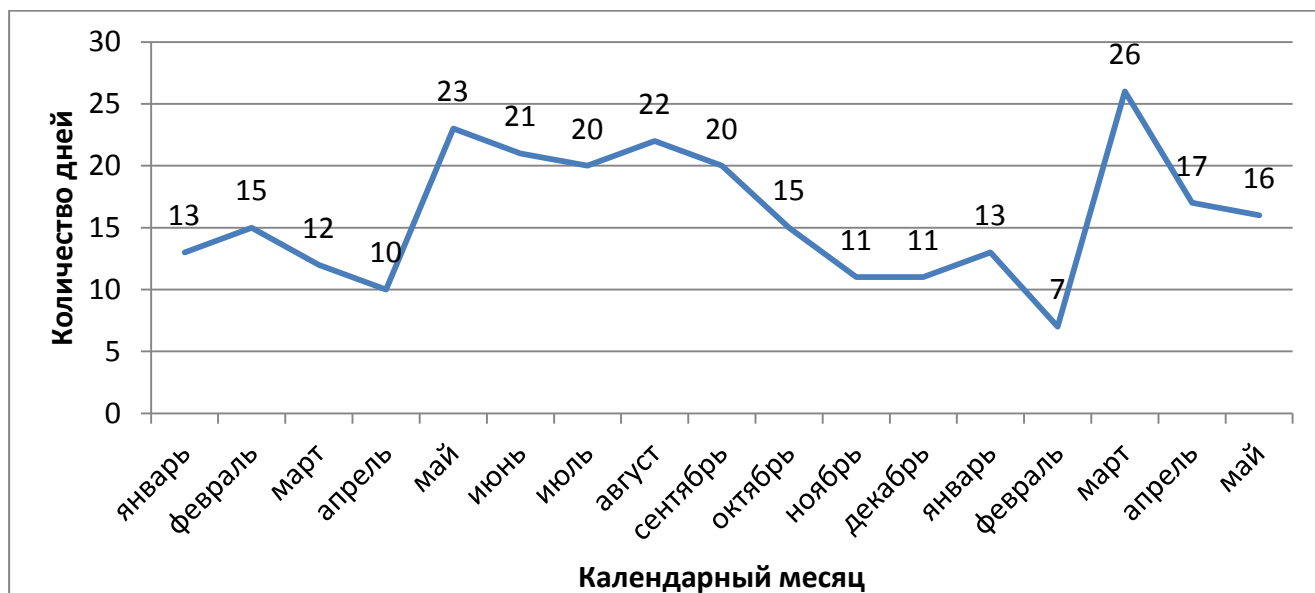


Рисунок 2.4 – Количество ночных технологических «окон», во время которых были устранены отступления по текущему содержанию ГРК в пределах одного околотка (количество «окон», во время которых осуществлялась выправка пути).

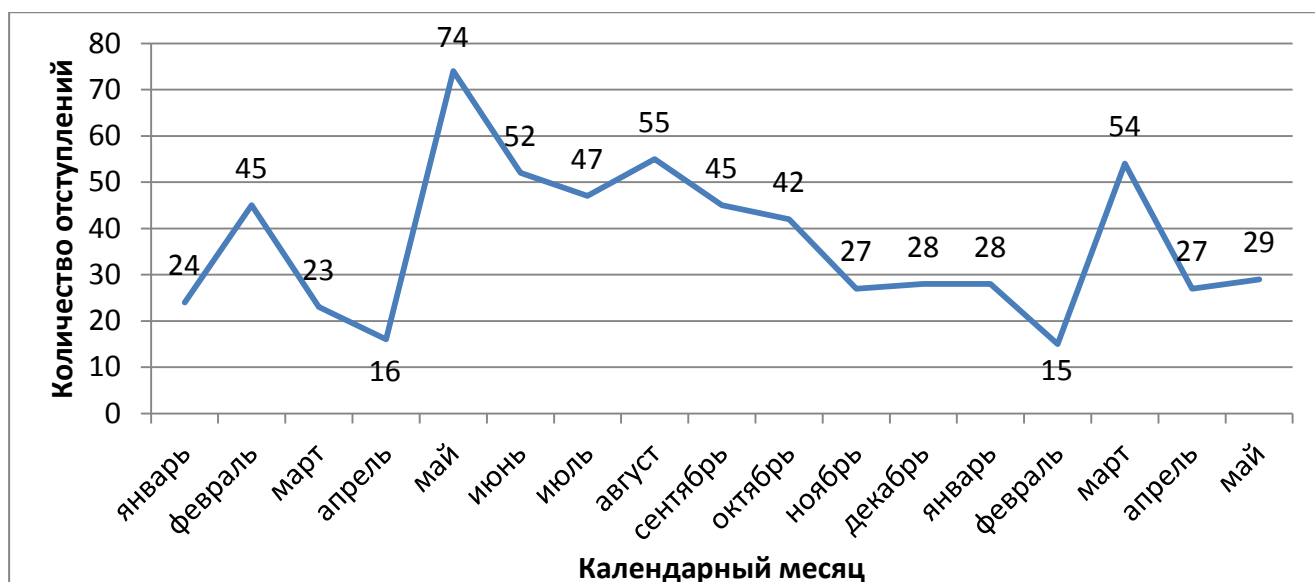


Рисунок 2.5 – Количество устраненных отступлений по текущему содержанию ГРК во время технологических «окон» в пределах одного околотка.

Таблица 2.8

Объемы работы путевых бригад в пределах одного околотка

Год	Месяц	Количество устраненных отступлений	Количество ночных технологических «окон»	Сумма устраненных баллов
2019	Январь	24	13	102
	Февраль	45	15	352
	Март	23	12	240
	Апрель	16	10	136
	Май	74	23	472
	Июнь	52	21	190
	Июль	47	20	312
	Август	55	22	260
	Сентябрь	45	20	240
	Октябрь	42	15	200
	Ноябрь	27	11	126
	Декабрь	28	11	156
2018	Январь	28	13	370
	Февраль	15	7	58
	Март	54	26	286
	Апрель	27	17	116
	Май	29	16	184
Среднее арифметическое		37	16	223

Таким образом, определив средние значения искомых параметров, становится возможным оценить ремонтпригодность объектов группы однородных участков пути.

В дальнейшем в расчетах принято считать среднее количество ночных «окон» за один календарный месяц, во время которых осуществляется выправка пути $s^{30} = 16$.

Среднее количество отступлений по текущему содержанию ГРК, устранимое за один календарный месяц $n^{30} = 37$.

Значит, среднее количество отступлений, устранимых за одно ночное «окно»

$$r_{\text{факт}}^1 = \frac{n^{30}}{s^{30}} = \frac{37}{16} = 2.3. \quad (2.11)$$

Таким образом, определены ранее неизвестные параметры неравенства 2.10, значит, становится возможным оценка ремонтпригодности участка пути с учетом фактических возможностей путевых бригад $r_{\text{факт}}^1 = 2.3$ отступлениям.

2.2.4.2 Необходимое среднее время до восстановления

Среднее необходимое время до восстановления верхнего строения пути для группы однородных объектов за интервал наблюдения T_n определяется по следующей формуле и соответствует правой части неравенства 2.10

$$T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{r_{\text{факт}}^1} * t_{\text{ТО}}. \quad (2.12)$$

2.2.5 Расчет показателей долговечности верхнего строения пути

2.2.5.1 Средний срок службы (ресурс) верхнего строения пути

Срок службы (ресурс) каждого конкретного объекта наблюдения зависит от многих случайных факторов, при этом предельное состояние объекта практически определяется его характеристиками, свидетельствующими о том, что его дальнейшая эксплуатация становится небезопасной для человека и окружающей среды, или становится экономически невыгодной.

Статистическая оценка среднего срока службы (среднего ресурса) определяется по результатам наблюдения для выбранной группы однородных объектов.

В условиях Московского метрополитена, где элементы верхнего строения пути заменяются на новые только при превышении нормативного пропущенного тоннажа, либо срока эксплуатации, выраженного в годах, а также при наличии эксплуатационных неисправностей (рельсовые дефекты («рисунки»), изломы элементов рельсовых скреплений, кустовая негодность шпал и т.д.), прямой расчет срока службы верхнего строения пути является невозможным, так как, не ведется учет заменяемых элементов с конкретными координатами нахождения их на полигоне и датой замены.

Таким образом, в данной работе, показатель долговечности не несет статистический характер и вычисляется из фактических значений предельного срока службы, выраженного в годах либо тоннаже, и, приведенного к временному значению.

Средний срок службы конструкции верхнего строения пути вычисляется как:

$$T_{\text{сл(р)}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n t_{\text{сл(р)}} j, \quad (2.13)$$

где $t_{\text{сл}(p)j}$ – заявленный производителем срок службы (ресурс) j -го элемента верхнего строения пути на заданном полигоне, ч (млн. т брутто);
 n – количество элементов верхнего строения пути со сроком службы $t_{\text{сл}(p)j}$.

2.2.6 Расчет комплексных показателей готовности верхнего строения пути

2.2.6.1 Коэффициент готовности верхнего строения пути

Коэффициент готовности верхнего строения пути характеризует готовность объекта к функционированию, т.е. применению по назначению в произвольный момент времени, кроме периодов планового текущего содержания и плановых ремонтов, в течение которых применение железнодорожного пути по назначению не предусматривается.

При расчете коэффициента готовности учитывают только оперативное время устранения отказа.

Коэффициент готовности железнодорожного пути для группы однородных объектов определяют по формуле

$$K_{\Gamma} = \frac{X_0^t}{X_0^t + T_{\text{в}}}, \quad (2.14)$$

где X_0^t – средняя наработка на отказ, ч, за интервал наблюдения (формула (2.3));
 $T_{\text{в}}$ – среднее время до восстановления, ч, за интервал наблюдения (формула (2.12)).

2.2.6.2 Коэффициент оперативной готовности верхнего строения пути

Коэффициент оперативной готовности – это вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в данный момент времени и, начиная с этого момента, будет работать безотказно в течение заданного интервала времени [83].

Коэффициент оперативной готовности железнодорожного пути, исходя из экспоненциального закона распределения наработки между отказами, для группы однородных объектов определяют по формуле

$$K_{o.r}(\Delta t) = K_r * P(t) = K_r * \exp(-\lambda^t * \Delta t) = \frac{X_0^t * \exp(-\lambda^t * \Delta t)}{X_0^t + T_B}, \quad (2.15)$$

где K_r - коэффициент готовности, вычисляемый по (2.14);

$P(t)$ - вероятность безотказной работы, вычисляемая по (2.8);

λ^t - интенсивность отказов, вычисляемая по (2.6), 1/ч;

Δt – интервал времени, ч;

X_0^t – средняя наработка на отказ, ч, за интервал наблюдения (формула (2.3));

T_B – необходимое среднее время до восстановления, ч, за интервал наблюдения (формула (2.12)).

2.2.6.3 Коэффициент технической готовности верхнего строения пути

Коэффициент технической готовности верхнего строения пути характеризует долю времени нахождения железнодорожного пути в работоспособном состоянии с учетом простоя при техническом обслуживании и восстановлении после отказов; для группы однородных объектов его определяют по формуле

$$K_{т.г} = \frac{T_H - T_B}{T_H}, \quad (2.16)$$

где T_n – интервал наблюдения, ч;

T_b – необходимая суммарная продолжительность плановых технических обслуживаний и ремонтов всех видов в течение интервала наблюдения, ч (формула (2.12)).

2.2.7 Расчет показателей функциональной безопасности верхнего строения пути

2.2.7.1 Средняя наработка до опасного отказа верхнего строения пути

Термин «опасный отказ» подразумевает под собой единичное отступление в содержании ГРК требующее неотложного устранения, ограничения скорости либо закрытия движения (сочетание III степеней, IV и V степени).

Средняя наработка до опасного отказа (по объему выполненной работы) верхнего строения пути для группы однородных объектов $X_{оп}$ вычисляется по следующей формуле

$$X_{оп} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i * l_i}{r_{оп} * L}, \quad (2.17)$$

где x_i – объем выполненной работы i -го объекта железнодорожного пути из группы однородных объектов верхнего строения пути на заданном полигоне за интервал наблюдения, млн. т брутто;

l_i – протяженность i -го объекта железнодорожного пути из группы однородных объектов верхнего строения пути на заданном полигоне, км;

n – количество объектов в группе однородных объектов верхнего строения пути;

$r_{оп} > 0$ – суммарное количество опасных отказов в группе однородных объектов верхнего строения пути за интервал наблюдения (отступления в

содержании геометрии рельсовой колеи IV и V степени);

L – суммарная протяженность однородных объектов в группе, км.

2.2.7.2 Интенсивность опасных отказов верхнего строения пути

Интенсивность опасных отказов (по объему выполненной работы и по времени, включая приведенные к 10 км величины) верхнего строения железнодорожного пути для группы однородных объектов рассчитывают по формулам:

$$\lambda_{\text{оп}} = \frac{1}{X_{\text{оп}}}; \quad \lambda_{\text{оп}}^t = \frac{r_{\text{оп}}}{(T_{\text{н}} - T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma}) * L}, \quad (2.18)$$

где $X_{\text{оп}}$ – средняя наработка до опасного отказа (по объему выполненной работы) верхнего строения пути (формула (2.17));

$r_{\text{оп}}$ – суммарное количество опасных отказов в группе однородных объектов верхнего строения пути за интервал наблюдения;

$T_{\text{н}}$ – интервал наблюдения, ч;

$T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma}$ – суммарная продолжительность плановых технических обслуживаний и ремонтов всех видов, выполненных на объектах группы в течение интервала наблюдения, ч (формула (2.5));

L – суммарная протяженность однородных объектов в группе, км.

2.2.7.3 Вероятность безопасной работы верхнего строения пути

В соответствии с ГОСТ 33886-2016 [89], наступление опасных отказов железнодорожного пути относится к редким событиям и удовлетворяет условиям стационарности, ординарности и отсутствия последействия, поэтому может быть принято экспоненциальное распределение наработки до опасного отказа и тогда

вероятность безопасной работы верхнего строения пути в заданном интервале наработки Δx для группы однородных объектов определяется по формуле

$$P_6(x) = \exp(-\lambda_{\text{оп}} * \Delta x), \quad (2.19)$$

где $\lambda_{\text{оп}}$ – интенсивность опасных отказов, вычисляемая по (2.24), 1/млн т брутто;
 Δx – интервал наработки, млн. т брутто.

Аналогично определяется вероятность безопасной работы в заданном интервале времени:

$$P_6(t) = \exp(-\lambda_{\text{оп}}^t * \Delta t), \quad (2.20)$$

где $\lambda_{\text{оп}}^t$ – интенсивность опасных отказов, вычисляемая по (2.18), 1/ч;
 Δt – интервал времени, ч.

2.2.7.4 Вероятность опасного отказа верхнего строения пути

Опасный отказ и безопасная работа железнодорожного пути являются событиями несовместными и противоположными, поэтому

$$Q_{\text{оп}}(x) = 1 - P_6(x) = 1 - \exp(-\lambda_{\text{оп}} * \Delta x); \quad (2.21)$$

$$Q_{\text{оп}}(t) = 1 - P_6(t) = 1 - \exp(-\lambda_{\text{оп}}^t * \Delta t). \quad (2.22)$$

2.2.7.5 Время возврата к безопасному состоянию верхнего строения пути

Среднее время возврата к безопасному состоянию – математическое ожидание времени устранения опасного отказа верхнего строения

железнодорожного пути. Его для группы однородных объектов определяют по формуле:

$$T_{вб} = \frac{1}{r_{оп}} \sum_{i=1}^{r_{оп}} t_{вбi}, \quad (2.23)$$

где $r_{оп} > 0$ – суммарное количество опасных отказов в группе однородных объектов верхнего строения пути за интервал наблюдения;

$t_{вбi}$ – время возврата к безопасному состоянию после i -го опасного отказа объектов группы, ч.

Для определения $t_{вбi}$ (времени возврата к безопасному состоянию после i -го опасного отказа объектов группы) следует сделать определенные допущения.

Во-первых, согласно инструкции [71] отступления IV-V степени должны быть устранены в первое ночное технологическое «окно» после их обнаружения, либо, непосредственно после обнаружения.

Во-вторых, эксплуатация путей метрополитена возможна при нахождении опасного отказа на пути. То есть, в зависимости от типа отступления и его величины, может быть принято решение об устранении в первое ночное «окно». Это значит, что время восстановления безопасного состояния пути должно включать в себя время работы метрополитена после обнаружения опасного отказа, что может составить самое большее 19,5 часов, а также, время, необходимое на устранение путевой бригадой данного отступления.

Либо, в зависимости от типа и величины отступления, дорожный мастер (начальник эксплуатационной дистанции), может принять решение о закрытии движения до устранения отступления. В данном случае $t_{вбi}$ будет равно фактическому времени, потраченному на устранение неисправности. Данный вариант менее предпочтителен ввиду остановки движения поездов на всей линии, кроме того, Правила технической эксплуатации метрополитенов Российской Федерации [34, 35] устанавливают производство ремонтных работ по

возможности именно в ночное «окно», без нарушения графика движения поездов.

2.3 Расчет удельных показателей надежности конструкций верхнего строения пути метрополитена

С целью нивелировки влияния протяженности конструкций на абсолютные показатели надежности при статистических расчетах представляется целесообразным расчет удельных показателей надежности на 1 км пути.

Для проведения данного расчета необходимо вычислить количество отказов (отступлений по ГРК) на 1 км пути R^1 на исследуемых группах однородных участков

$$R_i^1 = \frac{r_i}{L_i}, \quad (2.24)$$

где r_i – фактическое количество отступлений (отказов) по ГРК в группе однородных участков пути за исследуемый интервал наблюдения (в настоящем исследовании – 1 год), имеющих суммарную протяженность L_i .

2.3.1 Нарботка на отказ по времени 1 погонного километра пути

Средняя наработка на отказ (по времени) верхнего строения пути для группы однородных участков вычисляется по следующей формуле

$$X_0^{1-t} = \frac{(T_n - T_{\text{ТОиPi}}^{\Sigma})}{R_i^1}, \quad (2.25)$$

где T_n – интервал наблюдения, ч;

$T_{\text{ТОиР}}^{\Sigma}$ – суммарная продолжительность планового технического обслуживания и ремонта 1 погонного километра верхнего строения пути исследуемого участка за интервал наблюдения, ч, вычисляемая по формуле (2.5).

2.3.2 Необходимое время для ремонта 1 погонного километра пути

Среднее необходимое время до восстановления 1 погонного километра верхнего строения пути для группы однородных объектов за интервал наблюдения $T_{\text{в}}^1$ определяется по следующей формуле

$$T_{\text{в}}^1 = \frac{R_i^1}{r_{\text{факт}}^1} * t_{\text{ТО}}. \quad (2.26)$$

2.3.3 Коэффициент готовности 1 погонного километра пути

Коэффициент готовности 1 погонного километра верхнего строения железнодорожного пути для группы однородных объектов определяют по формуле

$$K_{\text{г}} = \frac{X_0^{1-t}}{X_0^{1-t} + T_{\text{в}}^1}, \quad (2.27)$$

где X_0^{1-t} – средняя наработка на отказ по времени 1 погонного километра верхнего строения пути, ч, за интервал наблюдения;

$T_{\text{в}}^1$ – среднее время до восстановления 1 погонного километра верхнего строения пути, ч, за интервал наблюдения.

2.3.4 Коэффициент оперативной готовности 1 погонного километра верхнего строения пути

Коэффициент оперативной готовности верхнего строения железнодорожного пути, исходя из экспоненциального закона распределения наработки между отказами, для группы однородных объектов определяют по формуле

$$K_{o.r}(\Delta t) = \frac{X_0^{1-t} * \exp(-\lambda^{1-t} * \Delta t)}{X_0^{1-t} + T_B^1}, \quad (2.28)$$

где λ^{1-t} – интенсивность отказов по времени 1 погонного километра пути (обратная величина наработки на отказ по времени 1 погонного километра пути), 1/ч;

Δt – интервал времени, ч.

2.3.5 Коэффициент технической готовности 1 погонного километра верхнего строения пути

Коэффициент технической готовности 1 погонного километра верхнего строения пути определяют по формуле

$$K_{т.г} = \frac{T_H - T_B^1}{T_H}, \quad (2.29)$$

где T_H – интервал наблюдения, ч.

2.4 Выводы к главе 2

1. Согласно проведенному анализу, на участке пути, где зарегистрировано отступление по текущему содержанию ГРК, присутствуют изношенные либо негодные элементы верхнего строения. Таким образом, установлено, что наличие отступления по текущему содержанию ГРК связано с приходом в негодность элементов верхнего строения, а значит, наличие отступления на участке можно связать с наличием отказов (предельного износа) элементов верхнего строения (элементов рельсовых скреплений, шпал) на том же участке.

2. Оптимизированная методика по расчету показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути методологии УРРАН может за счет своей универсальности и простоты математического аппарата быть применена к полигону путей метрополитена.

3. Применение в качестве исходных данных для расчета показателей надежности верхнего строения пути метрополитена данных с проездов путеизмерительных вагонов позволит оценить способность конструкций пути стабильно сохранять ГРК в пределах допустимых норм в зависимости от пропущенного тоннажа, плана пути и других факторов.

4. Определены и введены в расчетные формулы параметры, характерные только для путей метрополитена (пропущенный тоннаж дистанции, продолжительность ночного технологического «окна», среднее количество устраненных отступлений в ночное «окно», среднее количество «окон», во время которых производятся работы по выправке пути).

5. Применение методики к каждому типу конструкции верхнего строения пути совместно с разделением полигона пути на однородные участки позволит провести сравнительный анализ данных конструкций по показателям надежности.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ МЕТРОПОЛИТЕНА

3.1 Параметры исследуемых участков

Как отмечалось во второй главе данной работы, объектом исследования показателей надежности железнодорожного пути метрополитена является полигон главных путей Таганско-Краснопресненской и Люблинско-Дмитровской линий Московского метрополитена.

На данных линиях уложены основные на данный момент конструкции пути, применяющиеся в Московском метрополитене и во всех метрополитенах стран СНГ [1, 5, 14, 41].

На главных путях Таганско-Краснопресненской линии (ПЧ-6) преимущественно уложена и принята как объект исследования конструкция:

1. Рельсы типа Р50, раздельное промежуточное скрепление типа «метро», деревянные шпалы по ГОСТ 22830-77 [76] в путевом бетоне.

Параметры исследуемых участков на Таганско-Краснопресненской линии приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Параметры исследуемых участков на Таганско-Краснопресненской линии

Тип конструкции	Длина, км	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто
Типовая (рельсы Р50, скрепление типа «метро», деревянные шпалы в путевом бетоне)	62,69	2014-2276

На главных путях Люблинско-Дмитровской линии (ПЧ-7) приняты как объект исследования конструкции:

1. Рельсы типа Р65, раздельное промежуточное рельсовое скрепление типа КДП (подкладка КД, но с упругой клеммой), деревянные шпалы в путевом бетоне.

2. Рельсы типа Р65, раздельное промежуточное рельсовое скрепление типа АРС-4, полушпала пути низкой вибрации LVT-M в путевом бетоне.

3. Рельсы типа Р65, виброгасящее рельсовое скрепление типа ВГС на композитных полушпалах в путевом бетоне.

Параметры данных участков приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Параметры исследуемых участков на Люблинско-Дмитровской линии

Тип конструкции	Длина, км	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто
КДП-65 (рельсы Р65, скрепление КД с упругой клеммой, деревянные шпалы в путевом бетоне)	34,91	806-833
LVT-M (рельсы Р65, скрепление АРС-4, полушпалы с виброзащитными чехлами в путевом бетоне)	16,16	48-146
ВГС5-65 (рельсы Р65, скрепление типа ВГС, композитные полушпалы в путевом бетоне)	4,22	293-342

Полигон исследуемых конструкций пути полностью пролегает под землей, в тоннеле.

Таким образом, расчетами будут охвачены четыре основные конструкции железнодорожного пути метрополитена. Далее, в настоящем исследовании, в целях сокращения названия и описания упомянутых конструкций в таблицах 3.1 и 3.2, данные конструкции сокращенно называются «типовая», «КДП-65», «LVT-M» и «ВГС5-65» соответственно.

В статистических расчетах, из-за разных скоростей движения подвижного состава, отделены от главных путей участки разгона и торможения (перед станциями, станционные и после станций), и стрелочные переводы. Для данных участков выполнен отдельный расчет. Часто однородный участок, на котором происходит разгон либо торможение подвижного состава, включает в себя как станцию, так и стрелочный перевод, ввиду проектного расположения

большинства стрелочных переводов метрополитена непосредственно после станционного участка. На конструкциях типа КДП-65 дефектность участков разгона и торможения и стрелочных переводов близка к дефектности участков, где движение поездов осуществляется с основной установленной скоростью (70-80 км/ч). Если параметр, определяющий количество дефектов на один километр пути на данных участках не отличается больше чем на 1-2 отказа, то данные участки в статистическом расчете не отделяются от основных, так как значения их показателей надежности будут соответствовать друг другу и зависят от количества отступлений на 1 км пути (таблица 3.3).

Таблица 3.3

Количество отказов на 1 километр пути на участках исследуемых конструкций

Тип конструкции	Тип рассматриваемого скоростного участка	Количество отказов на 1 км пути за исследуемый календарный год		Среднее количество отказов на 1 км
		2017	2018	
Типовая, тип «метро»	С ограничением	19,79	24,16	21,97
	Установленная ¹	29,62	25,85	27,73
КДП-65	С ограничением	10,38	10,63	11,01
	Установленная	12,11	10,96	11,54
LVT-M	С ограничением	5,65	2,94	4,29
	Установленная	1,89	3,95	2,92
ВГС5-65 ²	Совмещенные	1,66	3,32	2,49

1 – установленная средняя основная скорость подвижного состава Московского метрополитена по главным путям – 75 км/ч;

2 – из-за сравнительно малой протяженности исследуемых конструкций типа ВГС5-65 принято решение о совмещении участков разных скоростей.

Для обеспечения достоверности определяемых показателей надежности весь полигон исследуемых дистанций был разделен на однородные участки по плану линий и типу конструкций. Соответственно участки конструкций, близкие по показателю количества отказов на один километр, также совмещены и поделены в расчетах на однородные участки. Информация по количеству однородных участков и их принадлежности к определенному плану и

конструкции пути приведена в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Параметры исследуемых участков пути

Тип конструкции	План путей (радиус, тип)	Количество и длина однородных участков (Таганско-Краснопресненская)	Количество и длина однородных участков (Люблинско-Дмитровская)
Типовая (рельсы Р50, крепление типа «метро», деревянные шпалы в путевом бетоне)	400	35 участков, 9,26 км	—
	500	22 участка, 7,27 км	—
	600	31 участок, 6,58 км	—
	800	16 участков, 2,48 км	—
	1000	6 участков, 0,75 км	—
	1500	12 участков, 0,59 км	—
	2000	7 участков, 0,57 км	—
	Прямые	125 участков, 35,19 км	—
КДП-65 (рельсы Р65, крепление КД с упругой клеммой, деревянные шпалы в путевом бетоне)	400	—	4 участка, 1,28 км
	500	—	3 участка, 1,9 км
	600	—	22 участка, 9,44 км
	1000	—	5 участков, 0,85 км
	1200	—	5 участков, 0,62 км
	1500	—	4 участка, 0,28 км
	2000	—	6 участков, 0,54 км
	Прямые	—	52 участка, 20 км
LVT-M (рельсы Р65, крепление APC-4, полушпалы с виброзащитными чехлами в путевом бетоне)	500	—	2 участка, 1,7 км
	600	—	11 участков, 3,7 км
	Прямые	—	31 участок, 10,76 км
ВГС5-65 (рельсы Р65, крепление типа ВГС, композитные полушпалы в путевом бетоне)	Прямые	—	12 участков, 4,22 км
Всего		254 участка; 62,69 км	157 участков; 55,29 км

Таким образом, исследование охватывает 411 однородных участков пути общей протяженностью 118 км, на которых используются основные конструкции

железнодорожного пути метрополитена. Из них около 80 участков являются станционными и, либо, стрелочными, на которых скорость подвижного состава отличается от основной установленной скорости. Основная установленная скорость подвижного состава на путях метрополитена – от 70 до 80 км/ч.

3.2 Расчет и анализ показателей надежности конструкций железнодорожного пути метрополитена

3.2.1 Определение показателей надежности типовой конструкции железнодорожного пути метрополитена

Типовая конструкция железнодорожного пути метрополитена (рельсы Р50 и подкладки типа «метро» на деревянных шпалах в путевом бетоне), на момент выполнения данного исследования, применяется на большей части полигона главных путей Московского метрополитена.

Не смотря на интенсивное открытие новых станций и перегонов, на которых применяются современные виды конструкций железнодорожного пути, длина полигона типовой конструкции преобладает над остальными.

Полигон железнодорожного пути Таганско-Краснопресненской линии содержит существенное количество шпал и элементов рельсовых скреплений, эксплуатирующихся с момента открытия движения (самый старый перегон был открыт в 1966 г.). Присутствует значительное количество новых элементов рельсовых скреплений (подкладок типа «метро» и путевых шурупов). Местами деревянное подрельсовое основание подвергалось замене сторонними организациями, которые укладывают в путь шпалы не соответствующие государственному стандарту, определяющему параметры деревянных шпал для метрополитена (ГОСТ 22830-77 [76]). В результате срок службы данных шпал крайне невелик. Некоторые шпалы подвергаются ремонту, например,

заполняются продольные трещины специальным составом либо закрепляются торцы шпал стальными скобами.

Со временем ремонтируется также путевой бетон. Места трещин заполняются ремонтным составом под давлением. Места незначительного разрушения бетонируются заново, однако, из-за разнородности применяемых смесей бетона и нарушения технологии ремонта, адгезия между старым и новым бетонным слоем крайне низка, что становится причиной новых повреждений.

Важен факт того, что капитальный ремонт пути, после которого возможно обнуление пропущенного тоннажа конструкции, не проводился. Это связано с большим объемом требуемых ремонтных работ, из-за которого необходима долговременная остановка движения на ремонтируемом участке. Поэтому, объекты конструкций верхнего строения пути заменяются по мере необходимости (кроме рельсов), либо, в некоторых случаях, выполняется сплошная замена рельсовых креплений на определенных участках. Данные работы выполняются медленно, из-за малой продолжительности ночного технологического «окна». За весь период работы метрополитена, капитальный ремонт не проводился ни на одной конструкции главных путей [41, 95].

Продолжительная эксплуатация типовой конструкции железнодорожного пути в Московском метрополитене показала свои явные недостатки (см. п. 1.2.1).

Главным образом повышенная дефектность данной конструкции стала основополагающей цели настоящего исследования – определения показателей надежности железнодорожного пути метрополитена, которые должны стать критериями последующего выбора оптимальной конструкции пути для модернизации существующих линий и применения на новых перегонах.

Показатели надежности в данном исследовании рассчитываются согласно формулам 2.1 – 2.29. Все рассчитываемые показатели для типовой конструкции пути метрополитена приведены в табличном виде (таблицы 3.5 – 3.9), в следующем подразделе будет выполнен их анализ. Данная периодичность соблюдается для всех исследуемых конструкций.

Таблица 3.5

Показатели безотказности типовой конструкции железнодорожного пути метрополитена

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст.	Показатели безотказности							
				X_0 – наработка на отказ, млн. т	T_{TOuP} – среднее время для ремонта полигона, ч	X_0^t – наработка на отказ по времени, ч	λ – интенсивность отказов	λ^t – интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	$P(x)$ – вероятность безотказной работы	$Q(x)$ – вероятность отказа
Кривая R400	2016	75 км/ч,	495	1,06	334,8	17,02	0,943	0,059	8,99	0,389	0,611
	2017	9,54 км.	489	1,09	334,8	17,23	0,919	0,058	8,76	0,399	0,601
Кривая R500	2016	75 км/ч,	370	1,08	255,5	22,98	0,924	0,044	6,72	0,397	0,603
	2017	7,27 км.	347	1,17	255,5	24,51	0,855	0,041	6,22	0,425	0,575
Кривая R600	2016	75 км/ч,	389	0,93	231,1	21,93	1,074	0,046	7,07	0,342	0,658
	2017	6,58 км.	353	1,04	231,1	24,16	0,961	0,041	6,33	0,382	0,618
Кривая R800	2016	75 км/ч,	84	1,62	86,9	103,25	0,617	0,010	1,53	0,540	0,460
	2017	2,48 км.	84	1,64	86,9	103,25	0,608	0,010	1,51	0,544	0,459
Кривая R1000-2000	2016	75 км/ч,	5	2,05	41,8	1743,63	0,076	0,001	0,91	0,614	0,386
	2017	1,94 км.	19	1,86	41,8	458,85	0,286	0,002	0,34	0,585	0,415
Прямые	2016	75 км/ч,	683	1,86	809,9	11,64	0,538	0,086	12,41	0,621	0,379
	2017	23,06 км.	596	2,16	809,9	13,34	0,463	0,075	10,68	0,636	0,364

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 2014-2392 млн. т брутто.

Таблица 3.6

Показатели ремонтпригодности и готовности типовой конструкции железнодорожного пути

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год	Эксплуатационные условия (средняя скорость движения и протяженность)	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто	Число отступлений II-III ст.	Показатели ремонтпригодности		Комплексные показатели готовности		
					$T_{\text{в}}$ – необходимое время до восстановления полностью исправного состояния ВСП, ч	Результат соблюдения неравенства (2.10) как заключения о ремонтпригодности и участков	K_z – коэффициент готовности	$K_{o.z}$ – коэффициент оперативной готовности	$K_{m.z}$ – коэффициент технической готовности
Кривая R400	2016	75 км/ч,	2015-2392	495	484,2	не соблюдается	0,034	0,032	0,942
	2017	9,54 км.		489	478,4	не соблюдается	0,035	0,033	0,942
Кривая R500	2016	75 км/ч,	2015-2304	370	361,9	не соблюдается	0,060	0,042	0,959
	2017	7,27 км.		347	339,5	не соблюдается	0,067	0,047	0,961
Кривая R600	2016	75 км/ч,	2015-2392	389	380,5	не соблюдается	0,055	0,052	0,957
	2017	6,58 км.		353	345,3	не соблюдается	0,065	0,063	0,961
Кривая R800	2016	75 км/ч,	2015-2392	84	82,2	соблюдается	0,557	0,552	0,991
	2017	2,48 км.		84	82,2	соблюдается	0,557	0,552	0,991
Кривая R1000-2000	2016	75 км/ч,	2015-2392	5	4,9	соблюдается	0,997	0,997	0,999
	2017	1,94 км.		19	18,6	соблюдается	0,961	0,959	0,998
Прямые	2016	75 км/ч,	2015-2392	683	902,9	соблюдается	0,017	0,016	0,924
	2017	23,06 км.		596	869,7	соблюдается	0,022	0,021	0,933

Таблица 3.7

Приведенные показатели надежности 1 погонного километра типовой конструкции железнодорожного пути метрополитена

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия (средняя скорость движения и протяженность)	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто	Число отступлений II-III ст. на 1 км пути	Показатели безотказности				Комплексные показатели готовности		
					$\hat{X}_0^t$ – периведенная наработка на отказ по времени, ч	$\hat{\lambda}^t$ – периведенная интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	T_e – время до восстановления исправного состояния ВСП, ч	$\hat{K}_r$ – периведенный коэффициент готовности	$\hat{K}_{o.r}$ – периведенный коэффициент оперативной готовности	$\hat{K}_{t.r}$ – периведенный коэффициент технической готовности
Кривая R400	2016	75 км/ч,	2015-2392	51,93	162,25	0,0061	0,943	50,80	0,762	0,757	0,994
	2017	9,54 км.		51,30	164,24	0,0061	0,919	50,18	0,766	0,761	0,994
Кривая R500	2016	75 км/ч,	2015-2304	50,87	167,19	0,0060	0,924	49,76	0,771	0,766	0,994
	2017	7,27 км.		47,70	178,25	0,0056	0,855	46,67	0,793	0,788	0,995
Кривая R600	2016	75 км/ч,	2015-2392	59,11	144,28	0,0069	1,074	57,83	0,714	0,709	0,993
	2017	6,58 км.		53,64	158,99	0,0063	0,961	52,48	0,752	0,747	0,994
Кривая R800	2016	75 км/ч,	2015-2392	33,93	255,59	0,0039	0,617	33,20	0,885	0,882	0,996
	2017	2,48 км.		34,34	252,58	0,0040	0,615	33,59	0,883	0,879	0,996
Кривая R1000-2000	2016	75 км/ч,	2015-2392	29,60	323,74	0,0031	0,272	26,27	0,925	0,922	0,997
	2017	1,94 км.		24,62	290,25	0,0034	0,333	29,3	0,908	0,905	0,997
Прямые	2016	75 км/ч,	2015-2392	26,23	286,85	0,0035	0,477	25,66	0,918	0,915	0,997
	2017	35,19 км.		25,26	297,82	0,0034	0,453	24,72	0,923	0,920	0,997

Таблица 3.8

Показатели функциональной безопасности железнодорожного пути метрополитена

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия (средняя скорость движения и протяженность)	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто	Число отступлений IV-V ст.	Показатели функциональной безопасности				
					X_{on} – наработка на опасный отказ, млн. т	λ_{on} – интенсивность отказов	λ_{on}^t – интенсивность отказов	$P_6(x)$ – вероятность безопасной работы	$Q_{on}(x)$ – вероятность опасного отказа
Кривая R400	2016	75 км/ч,	2015-2392	33	15,90	0,063	0,004	0,939	0,061
	2017	9,54 км.		40	13,30	0,075	0,005	0,927	0,073
Кривая R500	2016	75 км/ч,	2015-2304	13	27,86	0,036	0,002	0,965	0,035
	2017	7,27 км.		9	39,92	0,025	0,001	0,975	0,025
Кривая R600	2016	75 км/ч,	2015-2392	6	66,73	0,015	0,001	0,985	0,015
	2017	6,58 км.		1	405,97	0,003	0,0001	0,998	0,002
Прямые	2016	75 км/ч,	2015-2392	17	113,93	0,009	0,002	0,991	0,009
	2017	35,19 км.		10	196,39	0,005	0,001	0,995	0,005

Таблица 3.9

Показатели надежности типовой конструкции железнодорожного пути метрополитена на участках разгона-торможения (станционные) и ограничения скорости (стрелочные переводы)

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия (средняя скорость движения и протяженность)	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто	Число отступлений II-III ст.	Показатели безотказности							
					X_0 – наработка на отказ, млн. т	T_{TOuP} – среднее время для ремонта полигона, ч	X_0^t – наработка на отказ по времени, ч	λ – интенсивность отказов	λ^t – интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	$P(x)$ – вероятность безотказной работы	$Q(x)$ – вероятность отказа
Прямые	2016	30 км/ч, 12,13 км.	2015-2392	240	2,78	426,01	34,73	0,36	0,03	4,36	0,70	0,3
	2017			293	2,31	426,01	28,44	0,43	0,04	5,25	0,65	0,35
				Показатели ремонтпригодности					Комплексные показатели готовности			
				T_e – необходимое время до восстановления полностью исправного состояния ВСП, ч		Результат соблюдения неравенства (2.10) как заключения о ремонтпригодност и участков		K_e – коэффициент готовности и	$K_{o.e}$ – коэффициент оперативной готовности и	$K_{m.e}$ – коэффициент технической готовности		
				240	234,78	соблюдается	0,13	0,13	0,97			
	2016			240	234,78	соблюдается	0,13	0,13	0,97			
	2017			293	286,63	соблюдается	0,09	0,09	0,97			

3.2.1.1 Анализ полученных показателей надежности типовой конструкции пути

Выполненный расчет показывает определенные зависимости полученных показателей от плана пути. Например, такой показатель как наработка на отказ X_0 увеличивается с увеличением радиуса кривых и максимален на прямых участках пути (рисунок 3.1).

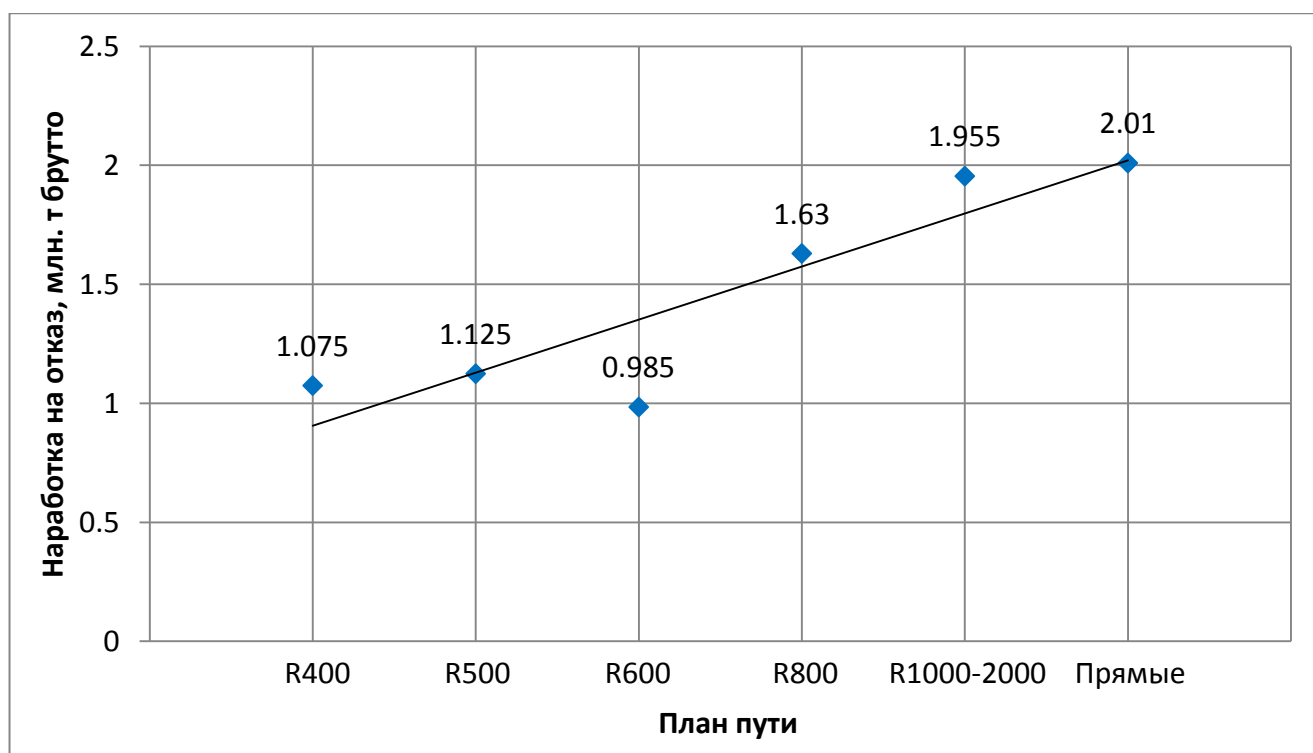


Рисунок 3.1 – График изменения среднего значения наработки на отказ X_0 в зависимости от плана пути типовой конструкции.

Кроме того, можно заметить минимальную разницу между вычисленными показателями безотказности за каждый исследуемый календарный год (таблица 3.4). Например, расчетная наработка на отказ X_0 за каждый календарный год, на кривых радиусом 400 м, показывает разницу максимально в три сотых млн. т брутто. Минимальная разница данного показателя, вычисленного за разные календарные годы, наблюдается также на некоторых других кривых.

Присутствует определенное случайное распределение наработки на участках кривых радиусом 800, 1000, 1500 и 2000 м ввиду их малой протяженности.

Сравнение значений расчетных параметров надежности приводит к их зависимости от плана пути, которая, проиллюстрирована линейно (рисунок 3.1). Аналогичную линейную зависимость от плана пути имеют также комплексные показатели готовности верхнего строения пути. Это означает сосредоточенность большего количества отступлений на 1 км пути на кривых участках полигона исследуемой дистанции. Данная сосредоточенность согласуется с опытом текущего содержания пути, во время которого большее число отступлений геометрии рельсовой колеи, особенно по плану, устраняется на кривых участках. В подтверждение этого следует рассмотреть графическую диаграмму ГРК («ленту»), сформированную мобильным средством диагностики (вагоном-путеизмерителем) (рисунок 3.2, приложение В, рисунок В1).

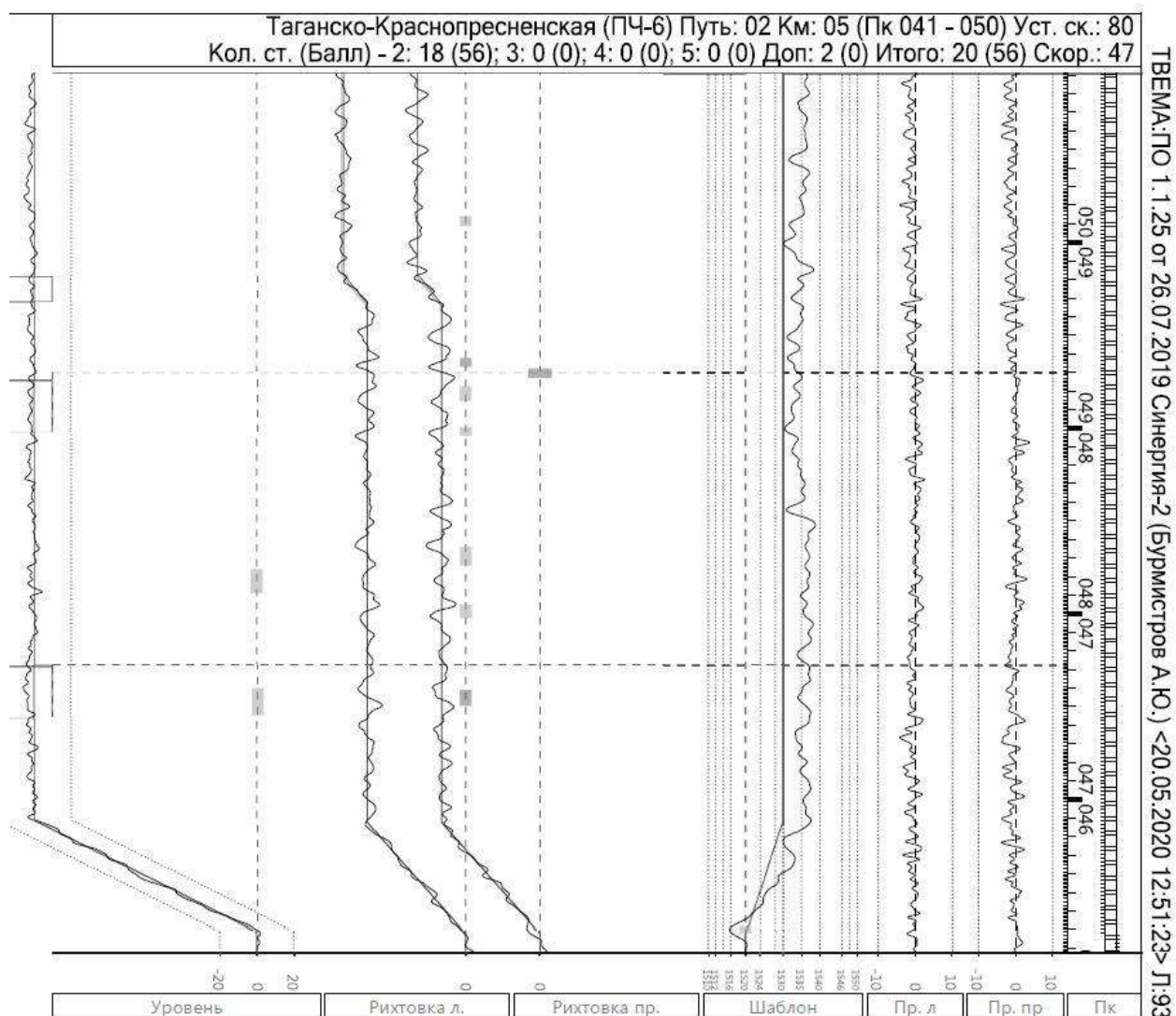


Рисунок 3.2 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Таганско-Краснопресненской линии «Улица 1905 года» - «Баррикадная». Участок кривой радиусом 500 м, номинальная ширина колеи – 1530 мм, возвышение наружной рельсовой нити – 120 мм, износ рельсов – 0 мм.

Изучив график «Шаблон» (рисунок 3.2), отражающий фактическую ширину колеи на участке под нагрузкой подвижного состава, можно заметить, что нулевая линия на круговой кривой анализируемой конструкции радиусом 500 м проходит по линии «1530» показывая номинальное проектное значение ширины колеи на данной кривой. Однако, фактическое значение сконцентрировано по линии «1535», указывая на изношенность верхнего строения пути. Местами фактическое значение ширины колеи на кривой доходит до линии «1540». Например, на пикете

046+100 зафиксировано уширение колеи от допускаемых норм на 1 мм (1539 мм). При уширении до 1543 мм данное отступление оценивается как V степени, минуя IV степень, и, оценивается 500 штрафными баллами $((1543-1538)*100=500)$.

Линии «рихтовок» отражают динамику изменения стрелы изгиба рельсовых нитей. На рассматриваемом участке, длиной в 500 м, зарегистрировано 6 отступлений II степени типа «Рихтовка».

Рассматриваемая графическая диаграмма отражает нестабильность положения рельсовых нитей по плану, причиной которого является изношенность элементов верхнего строения пути (шпал, элементов рельсовых креплений). Полная графическая диаграмма данного участка представлена в приложении В, рисунок В1.

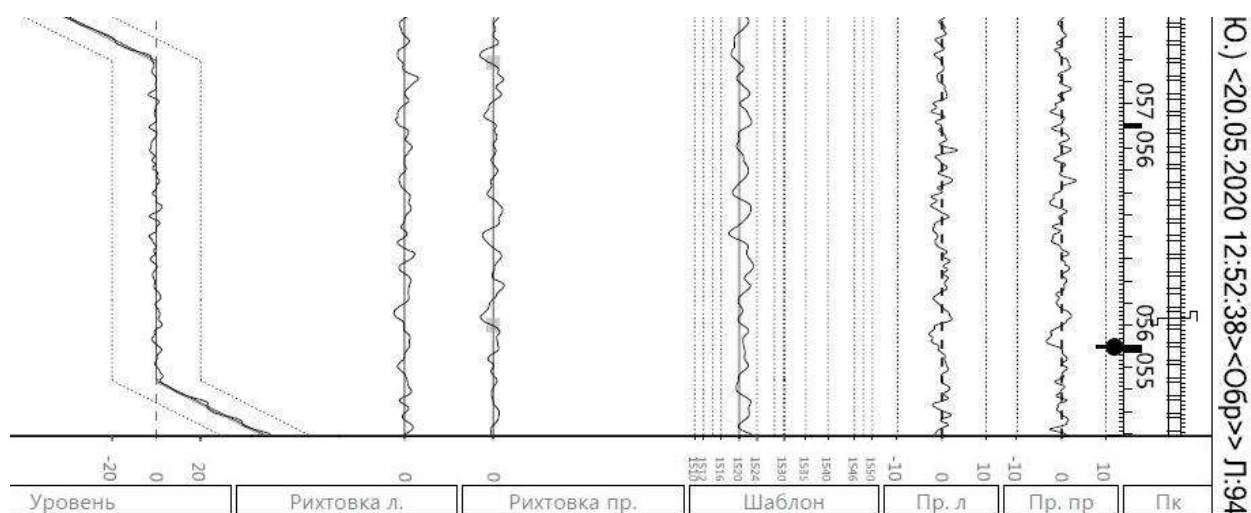


Рисунок 3.3 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Таганско-Краснопресненской линии «Беговая» - «Улица 1905 года». Прямой участок пути, номинальная ширина колеи – 1520 мм, износ рельсов – 0 мм.

На рисунке 3.3 представлена часть графической диаграммы для оценки состояния одного из прямых участков пути исследуемой конструкции. График «Шаблон» более сконцентрирован по нулевой линии (1520 мм), а графики «Рихтовка» более стабильны, без скачков. График «Уровень» также отражает стабильное положение рельсовых нитей по уровню. Полная графическая диаграмма данного участка представлена в приложении В, рисунок В2.

Таким образом, анализ графических диаграмм показывает нестабильность, а значит и изношенность кривых участков пути по отношению к их протяженности при сравнении с прямыми участками. Это наблюдается и при сравнении графических диаграмм других участков полигона типовой конструкции пути. Данный анализ подтверждает расчетные результаты показателей надежности, которые показали большой поток отказов ω на кривых участках пути, имеющих значительно меньшую протяженность, чем прямые участки.

Кроме того, расчет показателей ремонтпригодности кривых участков радиусом 400-600 м показал невозможность полного ремонта кривых и устранения всех выявленных отступлений (таблица 3.6), так как не соблюдается неравенство (2.10). Повышенная дефектность кривых участков объясняется возникновением боковых сил воздействия подвижного состава на рельсовую колею, в результате чего наблюдается интенсивный износ элементов верхнего строения пути (подкладки, путевые шурупы), параллельно чему стареют и гниют деревянные шпалы, уменьшается сопротивление сдвигу и выдергиванию путевым шурупам. Не соблюдение неравенства ремонтпригодности (2.10) является свидетельством дальнейшего ухудшение полигона кривых радиусом 400-600 вследствие нехватки времени и трудовых ресурсов на ремонт данных участков в ночные технологические «окна».

Следует более подробно остановиться на показателях функциональной безопасности, которые зависят от количества зарегистрированных отступлений IV-V степени, при которых ограничивается скорость движения либо вовсе останавливается движение поездов до устранения отступления.

Данные опасные отказы (отступления) зафиксированы преимущественно на кривых участках радиусом 400-600 м, большинство из которых отступления по плану до предкритических значений ширины колеи (не более 1548 мм). Распределение вероятности возникновения опасных отказов Q_{on} при пропуске 1 млн. т брутто представлена на рисунке 3.4.

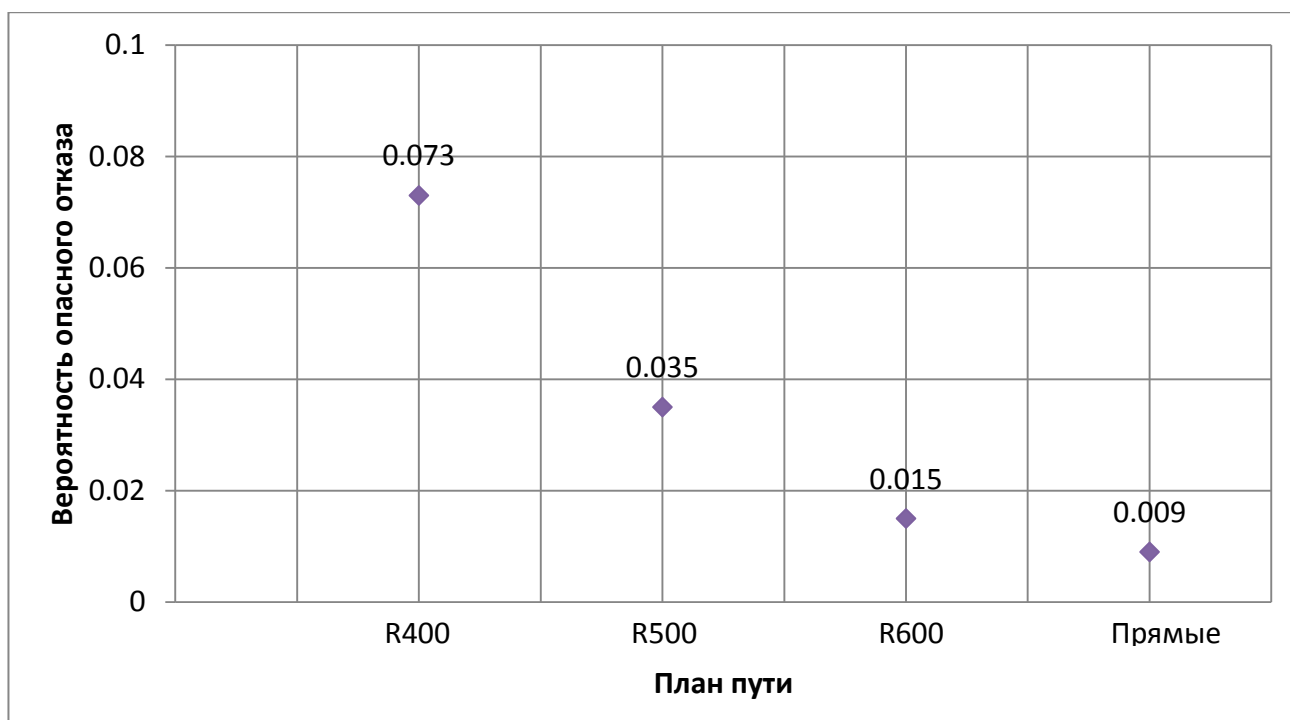


Рисунок 3.4 – График зависимости вероятности возникновения опасного отказа от плана путей.

На графике (рисунок 3.4) по оси ординат указаны значения максимальной расчетной вероятности возникновения опасного отказа, так как данное значение показателя функциональной безопасности прямо влияет на безопасность движения поездов. Следует предупреждать состояние пути, при котором возникает какая-либо вероятность возникновения опасного отказа, и своевременно проводить ремонт изношенного участка.

Оценить состояние участков пути Таганско-Краснопресненской линии, на которых зарегистрированы отступления IV-V степени можно по графическим диаграммам в приложении В: рисунок В3, рисунок В4 и рисунок В5 и В6. Это кривые по первому пути ПК 065+47 – 061+5, ПК 111+79 – 116+8,5, ПК 137+9 – 141+13 соответственно, а также кривая ПК 81+22 – 84+14 на рамповом участке (приложение В, рисунок В7), отличаются отсутствием стабильного расстояния ширины колеи, полной потерей плавного устройства кривизны рельсовых нитей по плану, большим количеством просадок и перекосов пути.

3.2.2 Определение показателей надежности конструкции пути метрополитена типа КДП-65

Конструкция типа КДП-65 применяется на Люблинско-Дмитровской линии с 1996 года. Данная конструкция является своего рода эволюцией типовой конструкции пути. Главным отличием является наличие упругих клемм в конструкции рельсового скрепления. На полигоне главных путей Люблинско-Дмитровской линии применяется только с рельсами типа Р65. Текущее содержание участков пути метрополитена с данной конструкцией отличается относительно меньшей трудоемкостью. Отсутствуют некоторые описанные в разделе 1.2.1 настоящей работы дефекты типовой конструкции пути. Главным образом, не происходит интенсивный износ реборд подкладок.

Пропущенный тоннаж данной конструкции варьируется в диапазоне 806-930 млн. т брутто в зависимости от рассматриваемого календарного года и года открытия перегона. В целом, разница пропущенного тоннажа не превышает 5%, поэтому полигон конструкции объединен в одну группу однородных объектов.

Полигон Люблинско-Дмитровской линии содержит 90% кривых радиусом 600 м, поэтому, протяженность кривых радиусом 600 и прямых участков превосходящая, и, позволяет провести достоверный расчет показателей надежности конструкции типа КДП-65.

Грузонапряженность на Люблинско-Дмитровской линии составляет 48,88 млн. т*км брутто/км в год. В настоящее время линию обслуживают составы из вагонов 81-717/714 современной модификации. Полигон линии полностью пролегает под землей, без наземных, либо надземных участков.

Расчет показателей надежности приведен в таблицах 3.10-3.13.

Таблица 3.10

Показатели безотказности конструкции железнодорожного пути метрополитена типа КДП-65

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год поездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст.	Показатели безотказности							
				X_0 – наработка на отказ, млн. т	T_{TOuP} – среднее время для ремонта полигона, ч	X_0^t – наработка на отказ по времени, ч	λ – интенсивность отказов	λ^t – интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	$P(x)$ – вероятность безотказной работы	$Q(x)$ – вероятность отказа
Кривая R400-600	2017	75 км/ч, 12,62 км.	340	1,81	486,9	24,33	0,554	0,041	6,99	0,575	0,425
	2018		274	2,25	486,9	30,19	0,444	0,033	5,61	0,359	0,359
Кривая R1000-2000	2017	75 км/ч, 2,4 км.	51	2,29	92,4	169,95	0,438	0,006	1,05	0,646	0,355
	2018		27	4,34	92,4	321,02	0,231	0,003	0,55	0,794	0,206
Прямые	2017	75 км/ч, 9,58 км.	116	4,02	369,4	72,33	0,249	0,014	2,38	0,780	0,220
	2018		105	4,46	369,4	79,91	0,224	0,013	2,16	0,799	0,201

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 806-930 млн. т брутто.

Таблица 3.11

Показатели ремонтпригодности и готовности конструкции железнодорожного пути типа КДП-65

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст.	Показатели ремонтпригодности		Комплексные показатели готовности		
				$T_{\text{в}}$ – необходимое время до восстановления полностью исправного состояния ВСП, ч	Результат соблюдения неравенства (2.10) как заключения о ремонтпригодности участков	$K_{\text{г}}$ – коэффициент готовности	$K_{\text{о.г}}$ – коэффициент оперативной готовности	$K_{\text{т.г}}$ – коэффициент технической готовности
Кривая R400-600	2017	75 км/ч, 12,62 км.	340	332,61	соблюдается	0,068	0,065	0,97
	2018		274	268,04	соблюдается	0,101	0,098	0,976
Кривая R1000-2000	2017	75 км/ч, 2,4 км.	51	49,89	соблюдается	0,773	0,769	0,994
	2018		27	26,41	соблюдается	0,924	0,921	0,997
Прямые	2017	75 км/ч, 9,58 км.	116	113,48	соблюдается	0,389	0,384	0,988
	2018		105	102,72	соблюдается	0,438	0,432	0,988

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 806-930 млн. т брутто.

Таблица 3.12

Приведенные показатели надежности 1 погонного километра конструкции железнодорожного пути метрополитена типа КДП-65

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст. на 1 км пути	Показатели безотказности				Комплексные показатели готовности		
				$\hat{X}_0^t$ – периведенная наработка на отказ по времени, ч	$\hat{\lambda}^t$ – периведенная интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	T_e – время до восстановления исправного состояния ВСП, ч	$\hat{K}_T$ – периведенный коэффициент готовности	$\hat{K}_{o.r.}$ – периведенный коэффициент оперативной готовности	$\hat{K}_{T.r.}$ – периведенный коэффициент технической готовности
Кривая R400-600	2017	75 км/ч,	26,94	307,13	0,0033	0,554	26,35	0,921	0,918	0,997
	2018	12,62 км.	21,71	381,11	0,0026	0,444	21,24	0,947	0,945	0,998
Кривая R1000-2000	2017	75 км/ч,	21,30	407,02	0,0025	0,438	20,83	0,951	0,949	0,998
	2018	2,4 км.	11,27	768,82	0,0013	0,231	11,03	0,986	0,985	0,999
Прямые	2017	75 км/ч,	11,21	712,74	0,0014	0,230	10,97	0,985	0,983	0,999
	2018	19,98 км.	11,31	706,43	0,0014	0,231	11,06	0,985	0,983	0,999

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 806-930 млн. т брутто.

Таблица 3.13

Показатели надежности конструкции железнодорожного пути метрополитена типа КДП-65 на участках разгона-торможения (станционные) и ограничения скорости (стрелочные переводы)

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год	Эксплуатационные условия (средняя скорость движения и протяженность)	Пропущенный тоннаж, млн. т брутто	Число отступлений II-III ст.	Показатели безотказности							
					X_0 – наработка на отказ, млн т	T_{TOuP} – среднее время для ремонта полигона, ч	X_0^t – наработка на отказ по времени, ч	λ – интенсивность отказов	λ^t – интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	$P(x)$ – вероятность безотказной работы	$Q(x)$ – вероятность отказа
Прямые	2017	30 км/ч, 10,41 км	806-930	108	4,69	401,36	77,40	0,213	0,013	2,22	0,808	0,192
	2018			121	4,20	401,36	69,08	0,238	0,015	2,48	0,788	0,212
				Показатели ремонтпригодности					Комплексные показатели готовности			
				T_{ε} – необходимое время до восстановления полностью исправного состояния ВСП, ч		Результат соблюдения неравенства (2.10) как заключения о ремонтпригодности и участков		K_z – коэффициент готовности	$K_{o,z}$ – коэффициент оперативной готовности	$K_{m,z}$ – коэффициент технической готовности		
	2017			108	105,65		соблюдается		0,423	0,417	0,988	
	2018			121	118,37		соблюдается		0,369	0,363	0,987	

3.2.2.1 Анализ полученных показателей надежности конструкции типа КДП-65

Анализ конструкции показал очевидную зависимость параметра наработки на отказ X_0 от плана пути. Согласно расчету, наработка на отказ прямых участков пути больше чем на кривых радиусом 600 м в 2,1 раза. Сравнение наработки на отказ с типовой конструкцией пути приведено на рисунке 3.5.

Данная зависимость подтверждает полученную в разделе 3.2.1.1 зависимость потока отказов от плана пути, показывая большую дефектность кривых участков пропорционально уменьшению радиуса круговой кривой.

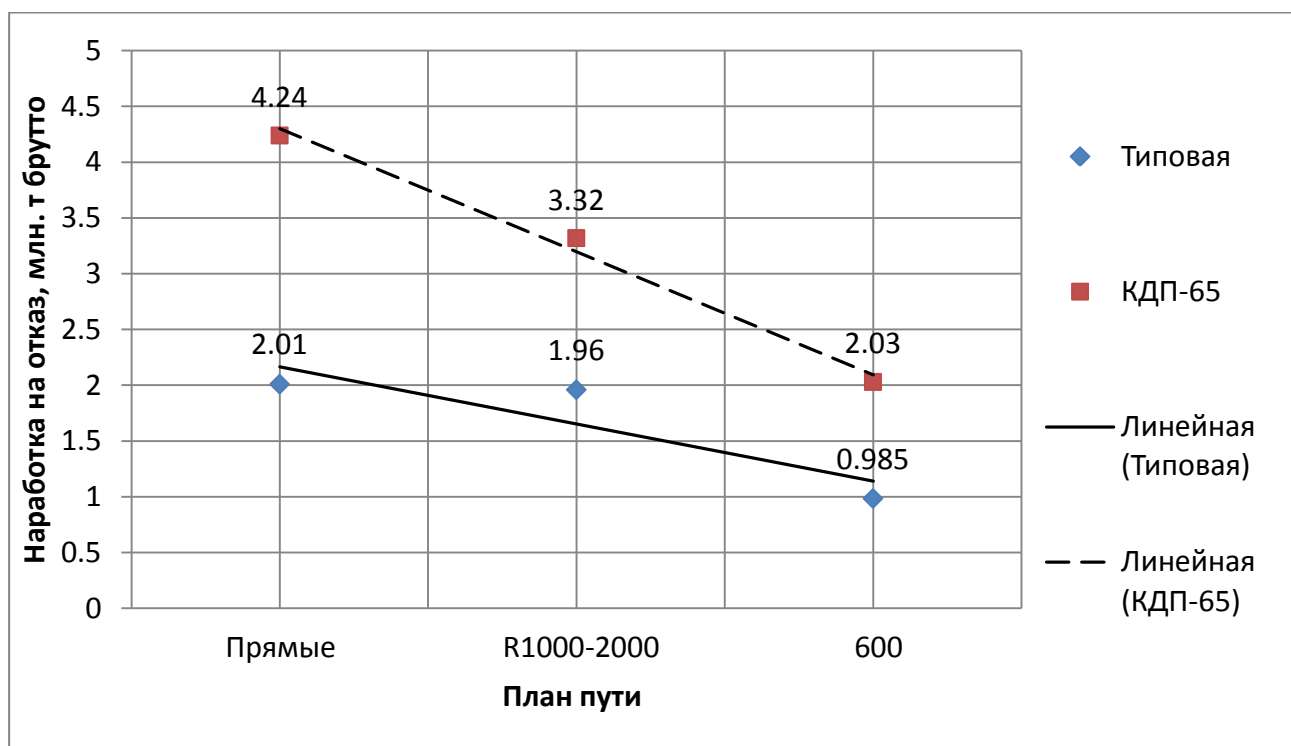


Рисунок 3.5 – График зависимости среднего значения наработки на отказ от плана линий типовой конструкции пути и КДП-65.

Сравнивая наработку на отказ исследуемых конструкций (рисунок 3.5) следует не оставлять без внимания наработку тоннажа конструкциями. Нарработка

тоннажа типовой конструкции на момент проведения исследования более чем в 2 раза больше чем конструкции КДП-65 и составляет 2,2 млрд. т брутто.

Для подтверждения факта меньшей наработки на отказ кривых участков пути следует изучить графические диаграммы проездов вагонов путеизмерителей по исследуемым участкам.

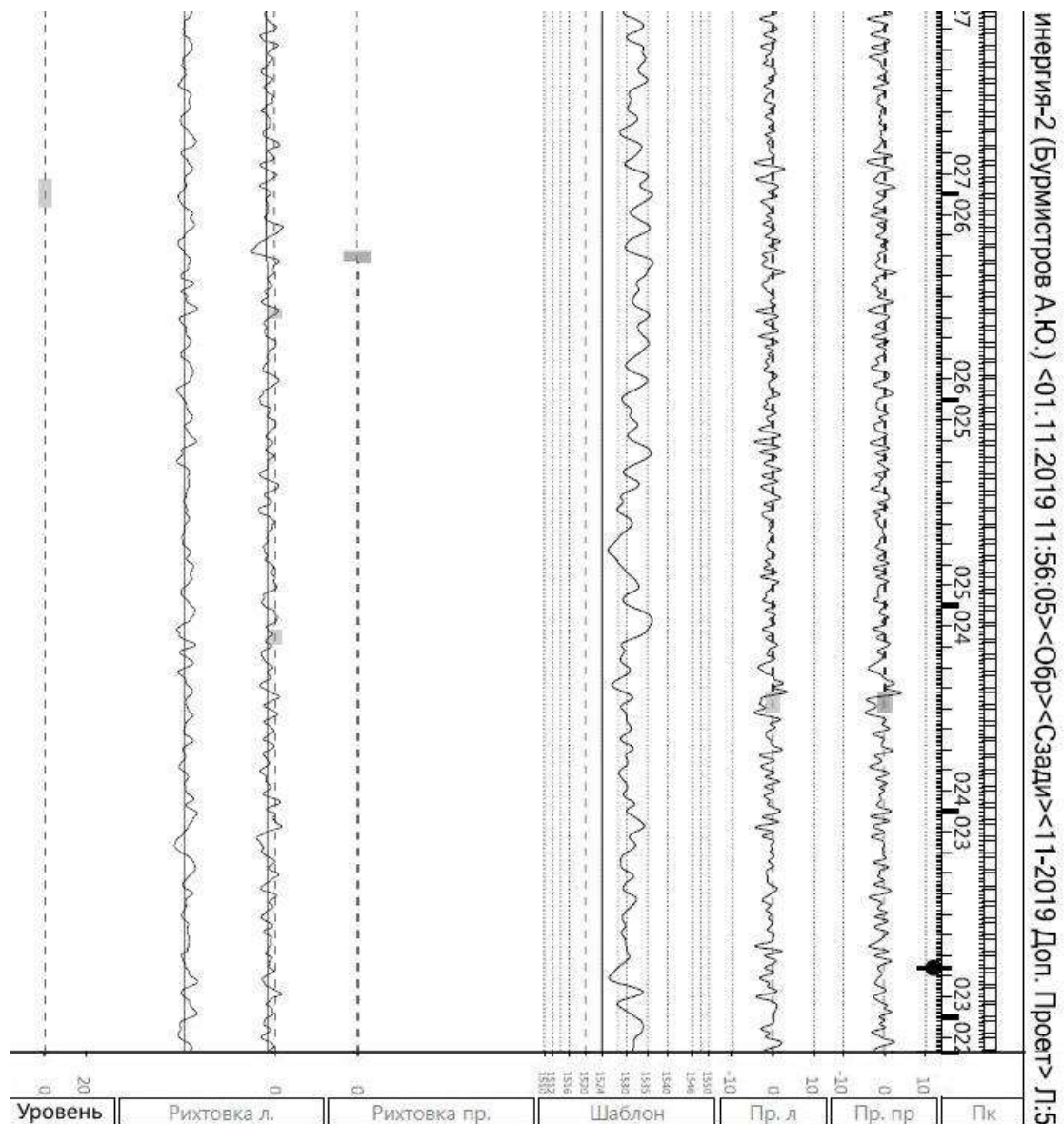


Рисунок 3.6 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Люблинско-Дмитровской линии «Римская» - «Чкаловская». Участок кривой радиусом 600 м, номинальная ширина колеи – 1524 мм, возвышение наружной рельсовой нити – 120 мм, износ рельсов – 5 мм.

На рисунке 3.6 показана графическая диаграмма проезда вагона-путеизмерителя «Синергия-2» по одной из кривых полигона конструкции КДП-65. Очевидно уширение ширины колеи по графику «Шаблон» до некритических значений. Можно заметить отсутствие стабильности правильного положения рельсовых нитей по плану и профилю (графики «Рихтовка» и «Просадка»). В отличие от прямых участков полигона данной конструкции, кривые участки, главным образом, нестабильны по плану.

Полная графическая диаграмма данного участка представлена в приложении В, рисунок В8.

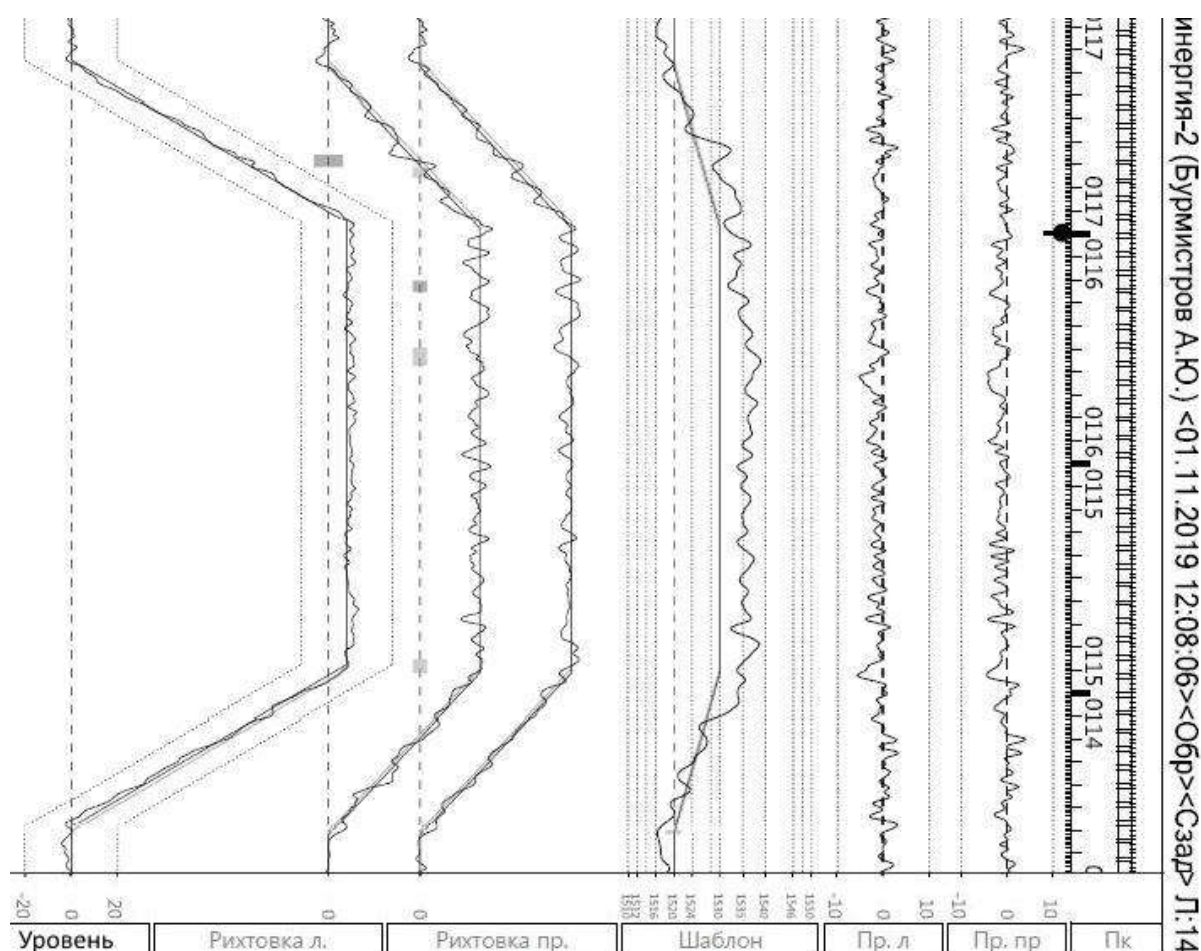


Рисунок 3.7 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Люблинско-Дмитровской линии «Печатники» - «Волжская». Участок кривой радиусом 400 м, номинальная ширина колеи – 1530 мм, возвышение наружной рельсовой нити – 120 мм, износ рельсов – 1 мм.

Аналогичную ситуацию по графической диаграмме, показанной на рисунке 3.6, можно наблюдать по результатам проезда путеизмерителя на перегоне «Печатники» - «Волжская» (рисунок 3.7). На данном участке кривой радиусом 400 м более отчетливо видны отклонения положения рельсовых нитей по плану и участки уширения колеи. Наблюдаются также участки с просадкой обеих рельсовых нитей.

Полная графическая диаграмма данного участка представлена в приложении В, рисунок В9.

Таблица 3.14

Отступления по текущему содержанию ГРК, зарегистрированные контрольными проездами путеизмерительного вагона по полигону конструкции типа КДП-65

Тип отступления	Путь	Количество за год		Общее количество отступлений
		2017	2018	
Отступления по плану пути				
«Р»	I	251	204	455
	II	253	226	479
«УШ»	I	4	6	10
	II	5	7	12
«СУЖ»	I	22	39	61
	II	6	22	28
«РНР»	I	4	0	4
	II	4	0	4
«ОТВШ»	I	9	0	9
	II	3	0	3
Отступления по профилю пути				
«П»	I	27	28	55
	II	29	33	62
«Пр.п»	I	1	0	1
	II	1	1	2
«Пр.л»	I	1	0	1
	II	8	0	8
«Р+П»	I	4	0	4
	II	3	0	3

Анализ количества отступлений, зарегистрированных за календарный год, также показывает на большее количество отступлений по плану, чем по профилю

пути (таблица 3.14). В среднем количество отступлений по плану пути в 7,5 раз больше чем по профилю. Подавляющее большинство отступлений приходится на нарушение номинального значения смежных стрел изгиба наружной рельсовой нити в кривой («рихтовка»). Происхождение данного отступления возможно в силу старения шпал, гниения и потери их связи с путевым бетоном. Подробная расшифровка отступлений ГРК была показана ранее в разделе 2.1 настоящего исследования.

Анализ фактического состояния пути с помощью графических диаграмм и опыт текущего содержания пути согласуется с результатами расчетов показателей надежности конструкции верхнего строения пути типа КДП-65. Графические диаграммы также показывают большую стабильность положения рельсовых нитей по плану и профилю на конструкции КДП-65 по сравнению с типовой.

Следует отметить полное отсутствие зарегистрированных отступлений IV-V степени на полигоне конструкции КДП-65 за два года проездов вагона-путеизмерителя, не смотря на эксплуатацию пути, превышающую 20 лет непрерывной работы без проведения удлиненных технологических «окон» на Люблинско-Дмитровской линии.

3.2.3 Определение показателей надежности конструкции пути метрополитена типа LVT-M

Исследуемая конструкция типа LVT-M эксплуатируется на полигоне Люблинско-Дмитровской линии, на участке «Марьино роща» - «Селигерская». Данный участок относительно новый, движение открыто в сентябре 2016 года, на участке «Петровско-Разумовская» - «Селигерская» в марте 2018 года. Соответственно пропущенный тоннаж конструкцией относительно невелик, однако, присутствуют определенные дефекты конструкции, связанные с резиновыми оболочками и упругими подкладками бетонных полушпал, что проявляется в количестве отступлений по плану и профилю пути на новом,

современном участке.

Пропущенный тоннаж конструкции варьируется 48,65-145,94 млн. т брутто. Преобладают прямые участки и кривые, радиусом 600 м.

Показатели надежности данной конструкции являются объектом высокого интереса, так как исследуемая конструкция в настоящее время принята как основная для Московского метрополитена. На большинстве стоящихся линий метрополитена столицы будет уложена конструкция LVT модификации М либо НА. Определение показателей надежности данной конструкции покажет ее поведение в условиях интенсивной эксплуатации.

Расчетные показатели надежности конструкции LVT-М на Люблинско-Дмитровской линии представлены в таблицах 3.15 – 3.18.

Таблица 3.15

Показатели безотказности конструкции железнодорожного пути метрополитена типа LVT-M

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст.	Показатели безотказности							
				X_0 – наработка на отказ, млн. т	T_{TOUP} – среднее время для ремонта полигона, ч	X_0^t – наработка на отказ по времени, ч	λ – интенсивность отказов	λ^t – интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	$P(x)$ – вероятность безотказной работы	$Q(x)$ – вероятность отказа
Кривая R500-600	2017	75 км/ч, 5,36 км.	37	3,97	116,47	233,61	0,252	0,004	0,76	0,777	0,223
	2018	75 км/ч, 5,36 км.	47	5,57	206,70	181,99	0,179	0,006	0,97	0,836	0,164
Прямые	2017	75 км/ч, 10,76 км.	32	9,15	232,21	266,49	0,109	0,004	0,66	0,897	0,104
	2018	75 км/ч, 10,76 км.	38	13,85	415,19	219,60	0,072	0,005	0,78	0,930	0,070

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 48,65-145,94 млн. т брутто.

Таблица 3.16

Показатели ремонтпригодности и готовности железнодорожного пути типа LVT-M

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст.	Показатели ремонтпригодности		Комплексные показатели готовности		
				$T_{\text{в}}$ – необходимое время до восстановления полностью исправного состояния ВСП, ч	Результат соблюдения неравенства (2.10) как заключения о ремонтпригодности участков	$K_{\text{г}}$ – коэффициент готовности	$K_{\text{о.г}}$ – коэффициент оперативной готовности	$K_{\text{т.г}}$ – коэффициент технической готовности
Кривая R500-600	2017	75 км/ч, 5,36 км.	37	36,20	соблюдается	0,866	0,862	0,996
	2018		47	45,98	соблюдается	0,798	0,794	0,995
Прямые	2017	75 км/ч, 10,76 км.	32	31,30	соблюдается	0,895	0,892	0,996
	2018		38	37,17	соблюдается	0,855	0,851	0,996

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 48,65-145,94 млн. т брутто.

Таблица 3.17

Приведенные показатели надежности 1 погонного километра железнодорожного пути метрополитена типа LVT-M

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст. на 1 км пути	Показатели безотказности				Комплексные показатели готовности		
				$\hat{X}_0^t$ – периведенная наработка на отказ по времени, ч	$\hat{\lambda}^t$ – периведенная интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	T_{ϵ} – время до восстановления исправного состояния ВСП, ч	$\hat{K}_r$ – периведенный коэффициент готовности	$\hat{K}_{o.r}$ – периведенный коэффициент оперативной готовности	$\hat{K}_{t.r}$ – периведенный коэффициент технической готовности
Кривая R500-600	2017	75 км/ч,	12,25	705,38	0,0014	0,252	11,99	0,983	0,982	0,999
	2018	5,36 км.	8,77	975,22	0,0010	0,179	8,58	0,991	0,990	0,999
Прямые	2017	75 км/ч,	5,32	1604,35	0,0006	0,109	5,20	0,997	0,996	0,999
	2018	10,76 км.	3,53	2363,82	0,0004	0,072	3,45	0,998	0,998	0,999

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 48,65-145,94 млн. т брутто.

3.2.3.1 Анализ полученных показателей надежности конструкции типа LVT-M

Полученные показатели надежности конструкции LVT-M также показывают зависимость исчисляемых параметров от плана пути. Наблюдается соответствующая тенденция большей дефектности кривых участков пути, полученная ранее при анализе других конструкций.

Анализ графических диаграмм геометрии рельсовой колеи также показывает нестабильность плана пути (рисунок 3.8).

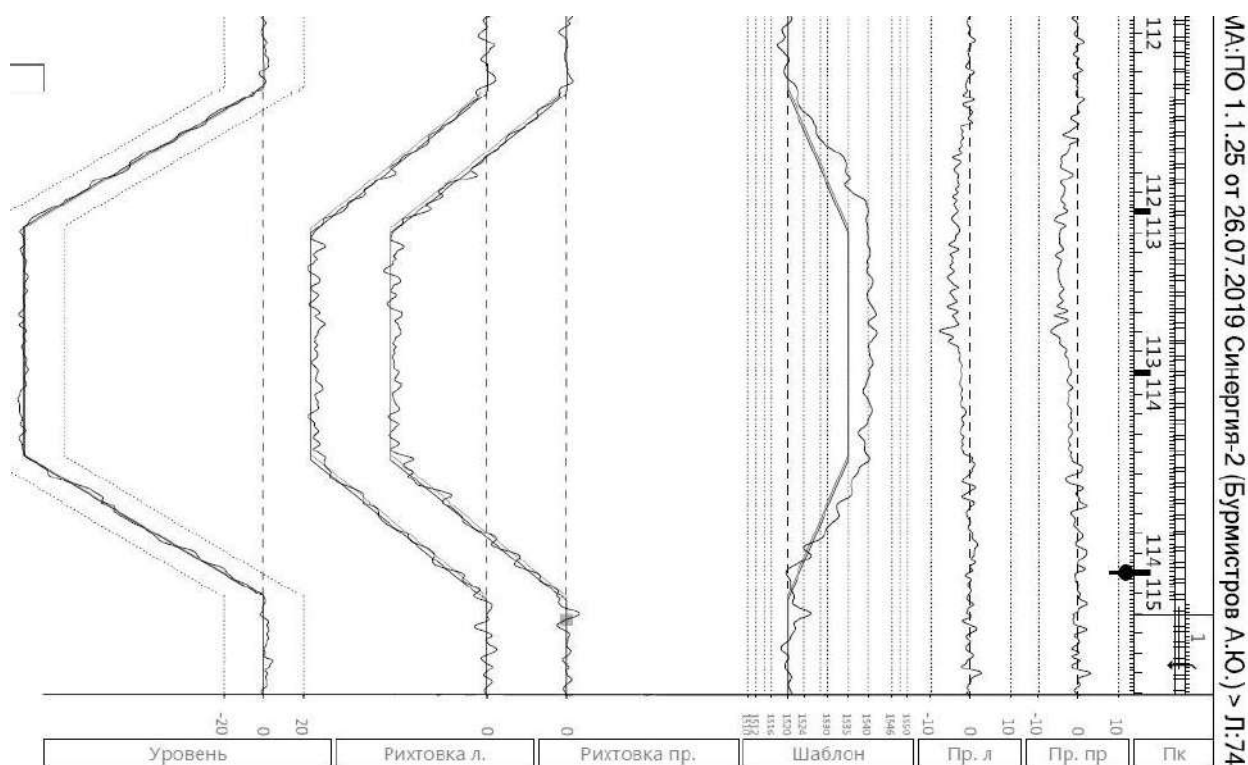


Рисунок 3.8 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Люблинско-Дмитровской линии «Окружная» - «Петровско-Разумовская». Участок кривой радиусом 300 м, номинальная ширина колеи – 1535 мм, возвышение наружной рельсовой нити – 120 мм, износ рельсов – 1 мм.

Участок кривой, показанный на диаграмме (рисунок 3.8), радиусом 300 м и

установленной скоростью 80 км/ч является примером дестабилизации геометрии рельсовой колеи на новом участке безбалластного пути. Во-первых, очевидно уширение ширины колеи на 5 мм и более (график «Шаблон») на всем протяжении круговой кривой. Местами можно заметить нарушение номинальных значений стрел изгиба. Во-вторых, очевидная просадка до 7 мм (график просадок) по обеим рельсовым нитям на всем протяжении кривой. Следует отметить стабильность возвышения наружной рельсовой нити (график «Уровень») при наличии просадок по обеим рельсовым нитям.

Полная графическая диаграмма данного участка представлена в приложении В, рисунок В10.

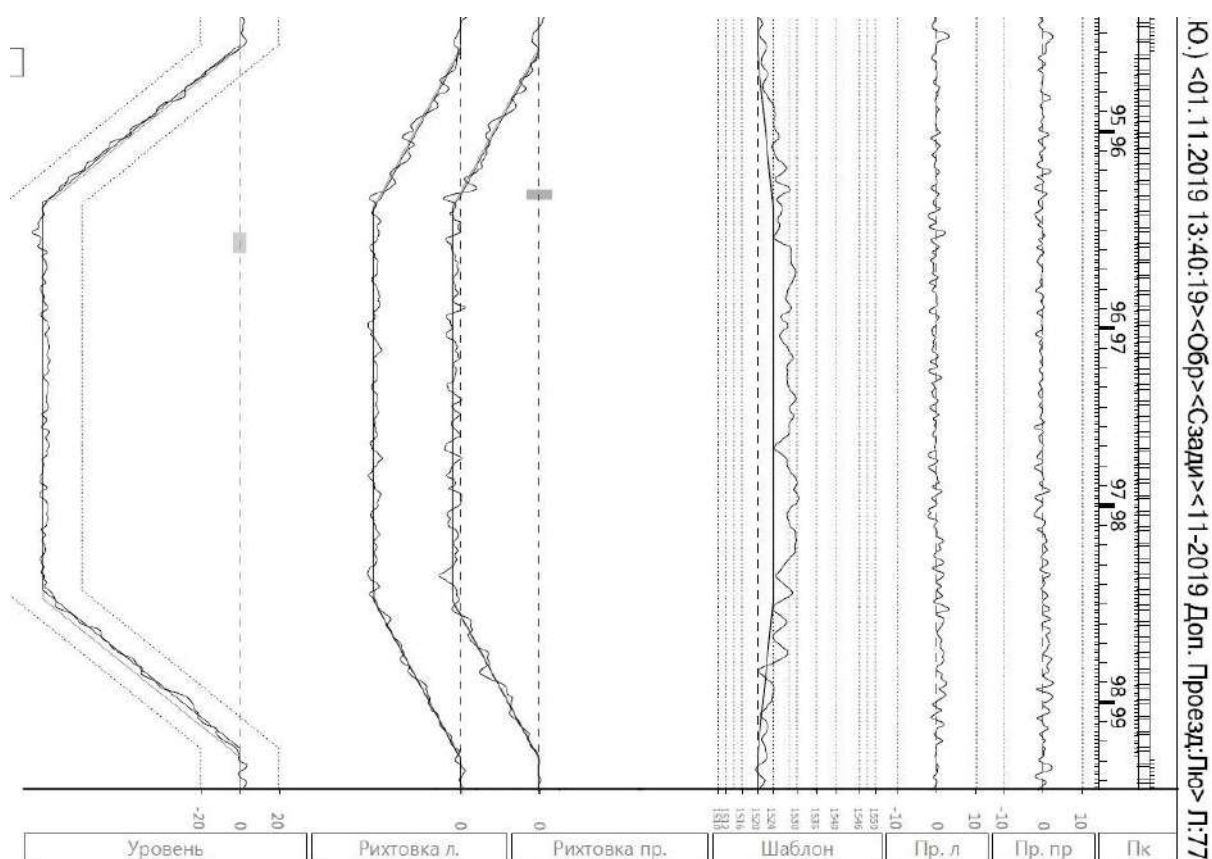


Рисунок 3.9 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Люблинско-Дмитровской линии «Петровско-Разумовская» - «Фонвизинская». Участок кривой радиусом 600 м, номинальная ширина колеи – 1524 мм, возвышение наружной рельсовой нити – 120 мм, износ рельсов – 0 мм.

На диаграмме (рисунок 3.9) показан участок кривой радиусом 600 м. Наблюдаются идентичные прошлой анализируемой кривой отклонения в устройстве геометрии рельсовой колеи по плану. По профилю состояние участка пути отличное. Полная графическая диаграмма данного участка представлена в приложении В, рисунок В11.

С целью оценки дефектности пути по плану и профилю, отступления, зарегистрированные вагоном-путеизмерителем за 2017 и 2018 календарный год по конструкции LVT-M, приведены в таблице 3.18.

Таблица 3.18

Отступления по текущему содержанию ГРК, зарегистрированные контрольными проездами путеизмерительного вагона по полигону конструкции типа LVT-M

Тип отступления	Путь	Количество за год		Общее количество отступлений
		2017	2018	
Отступления по плану пути				
«Р»	I	23	21	44
	II	22	29	51
«УШ»	I	1	9	10
	II	1	28	29
«СУЖ»	I	0	0	0
	II	1	1	2
«РНР»	I	0	0	0
	II	0	0	0
«ОТВШ»	I	0	0	0
	II	0	0	0
Отступления по профилю пути				
«П»	I	21	9	30
	II	8	10	18
«Пр.п»	I	0	0	0
	II	0	0	0
«Пр.л»	I	0	0	0
	II	0	0	0
«Р+П»	I	0	0	0
	II	1	0	1

Согласно таблице 3.18 более 70% зарегистрированных за два календарных года отступлений приходится на отступления по плану. Наблюдается, аналогично

прошлой конструкции, картина с преобладающим количеством отступлений «рихтовка», заключающихся в отклонении от допускаемых значений смежных стрел изгиба наружной рельсовой нити в кривых. Учитывая непродолжительную эксплуатацию конструкции LVT-M (2-3 года; 48,65-145,94 млн. т брутто), количество зарегистрированных отступлений за первые годы эксплуатации наводит на факт возможной технической непригодности данной конструкции под эксплуатацию в условиях высокой интенсивности движения поездов (порядка 500 пар поездов в сутки по Люблинско-Дмитровской линии).

3.2.4 Определение показателей надежности конструкции пути метрополитена типа ВГС5-65

Конструкция виброгасящих скреплений ВГС создана отечественными учеными. Рассматриваемая конструкция ВГС5-65 содержит полушпалу из композиционного материала.

Проведено много работы в направлении большей адаптации применения скреплений типа ВГС на полигонах метрополитенов. Кроме различных вариантов скреплений ВГС для установки на подрельсовое основание разного типа, проведены исследования в направлении обеспечения достаточной связи композитных полушпал с путевым бетоном [5, 9].

Конструкция ВГС5-65 впервые массово применена на Люблинско-Дмитровской линии на участках «Достоевская» - «Марьино» и «Борисово» - «Зябликово» по обоим главным путям. К моменту проведения данного исследования конструкция имела наработку пропущенного тоннажа, в зависимости от рассматриваемого календарного года, в диапазоне 293,08 - 484,2 млн. т брутто (около 10 лет эксплуатации).

Представляют особый интерес показатели надежности данной конструкции, эксплуатирующейся в тяжелых условиях при высокой интенсивности движения поездов Московского метрополитена, из-за как положительных, так и

отрицательных отзывов Службы пути и искусственных сооружений.

Виброгасящие свойства данной конструкции доказаны многократными измерениями уровня вибраций до и после установки креплений ВГС (участок Сокольнической линии под Государственным Академическим Большим Театром (ГАБТ) в Москве, в метрополитене города Екатеринбург) [78].

При обеспечении высокого уровня надежности по сравнению с другими конструкциями и необходимых виброгасящих свойств отечественная конструкция может стать основной для новых линий метрополитенов.

Расчетные показатели надежности конструкции ВГС5-65 приведены в таблицах 3.19 – 3.21.

Таблица 3.19

Показатели безотказности конструкции железнодорожного пути метрополитена типа ВГС5-65

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст.	Показатели безотказности							
				X_0 – наработка на отказ, млн. т	T_{TOuP} – среднее время для ремонта полигона, ч	X_0^t – наработка на отказ по времени, ч	λ – интенсивность отказов	λ^t – интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	$P(x)$ – вероятность безотказной работы	$Q(x)$ – вероятность отказа
Прямые	2017	75 км/ч, 4,22 км.	7	29,32	162,71	1228,18	0,034	0,081	0,144	0,967	0,034
	2018		14	14,73	162,71	614,09	0,068	0,161	0,287	0,934	0,066

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 293,08 - 484,2 млн. т брутто.

Таблица 3.20

Показатели ремонтпригодности и готовности конструкции железнодорожного пути типа ВГС5-65

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст.	Показатели ремонтпригодности		Комплексные показатели готовности		
				T_{θ} – необходимое время до восстановления полностью исправного состояния ВСП, ч	Результат соблюдения неравенства (2.10) как заключения о ремонтпригодности участков	K_z – коэффициент готовности	$K_{o.z}$ – коэффициент оперативной готовности	$K_{т.г}$ – коэффициент технической готовности
Прямые	2017	75 км/ч, 4,22 км.	7	6,85	соблюдается	0,994	0,994	0,999
	2018		14	13,70	соблюдается	0,978	0,977	0,996

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 293,08 - 484,2 млн. т брутто.

Таблица 3.21

Приведенные показатели надежности 1 погонного километра конструкции железнодорожного пути метрополитена типа ВГС5-65

Конструктивные показатели выбора однородных участков	Анализируемый календарный год проездов вагонов-путеизмерителей	Эксплуатационные условия* (средняя скорость движения и протяженность)	Число отступлений II-III ст. на 1 км пути	Показатели безотказности				Комплексные показатели готовности		
				$\hat{X}_0^t$ – периведенная наработка на отказ по времени, ч	$\hat{\lambda}^t$ – периведенная интенсивность отказов по времени	ω – поток отказов	$T_{\text{в}}$ – время до восстановления исправного состояния ВСП, ч	$\hat{K}_r$ – периведенный коэффициент готовности	$\hat{K}_{\text{о.г}}$ – периведенный коэффициент оперативной готовности	$\hat{K}_{\text{т.г}}$ – периведенный коэффициент технической готовности
Прямые	2017	75 км/ч,	1,66	5181,07	0,0002	0,034	1,62	0,999	0,999	0,999
	2018	4,22 км.	3,32	2590,54	0,0004	0,068	3,25	0,999	0,998	0,999

*пропущенный тоннаж исследуемых конструкций варьируется в диапазоне 293,08 - 484,2 млн. т брутто.

3.2.4.1 Анализ полученных показателей надежности конструкции типа ВГС5-65

При сравнении полученных результатов показателей надежности конструкции ВГС5-65 с показателями ранее проанализированных конструкций, можно наблюдать очевидное превосходство данной конструкции над остальными, проявляющееся в показателях безотказности, ремонтпригодности и готовности.

Несмотря на пропущенный тоннаж, примерно в 400 млн. т брутто, и десятилетнюю эксплуатацию, конструкция стабильно обеспечивает размеры геометрии рельсовой колеи в допускаемых диапазонах отклонений.

Чтобы убедиться в полученных результатах следует рассмотреть графическую диаграмму проезда путеизмерительного вагона по Люблинско-Дмитровской линии на полигоне исследуемой конструкции (рисунки 3.10-3.13).

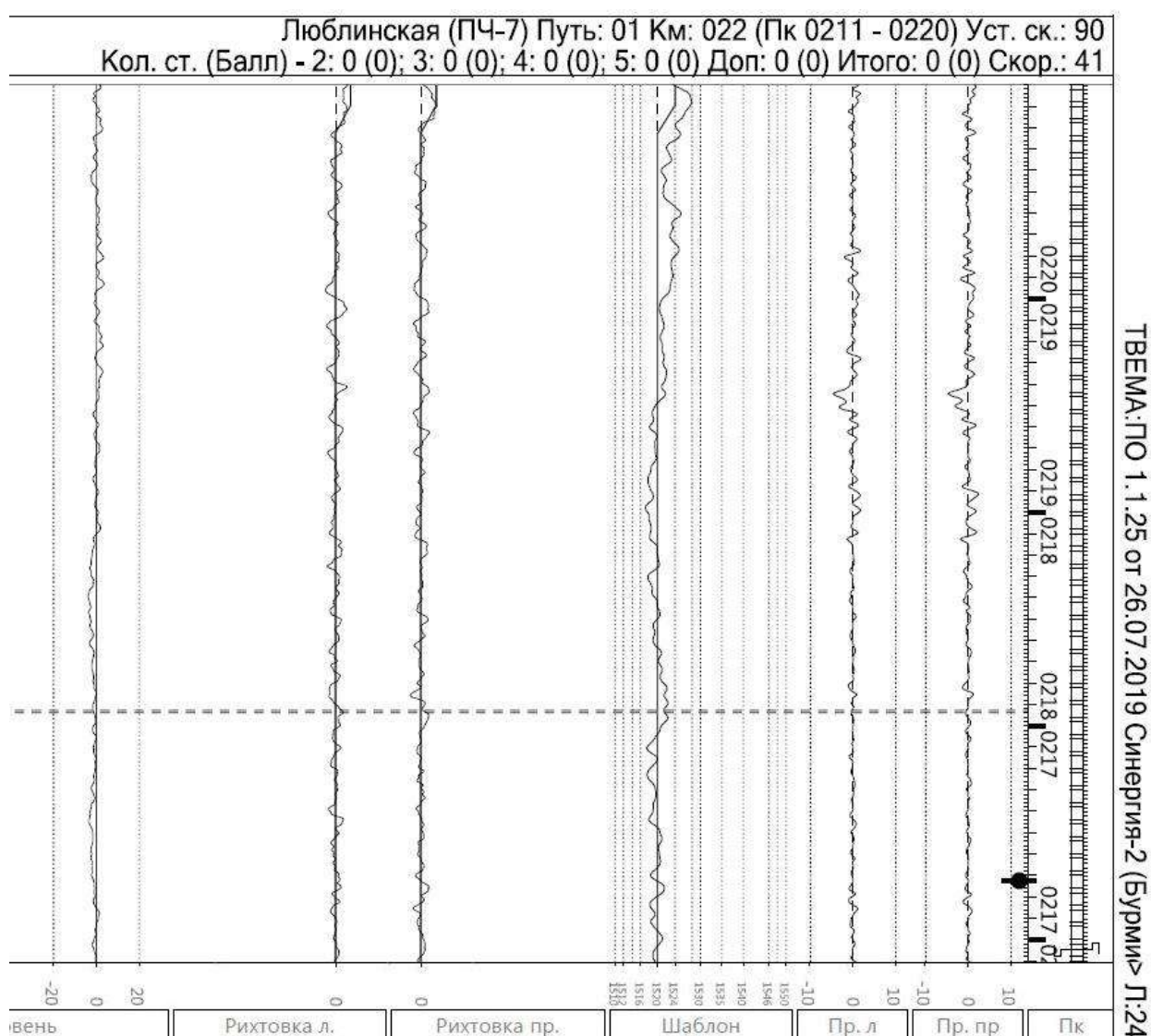
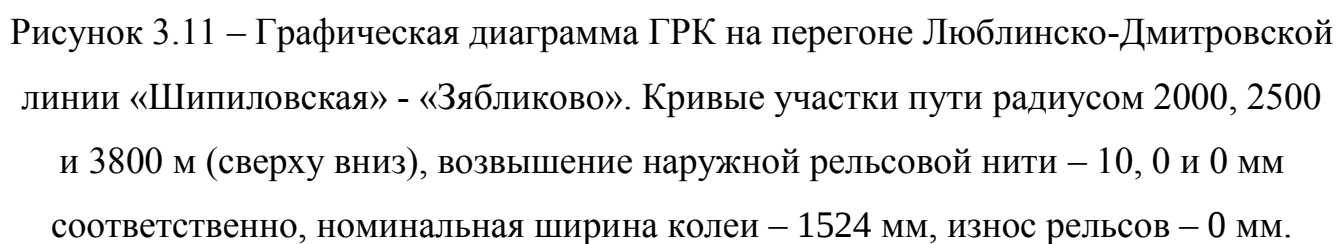


Рисунок 3.10 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Люблинско-Дмитровской линии «Шипиловская» - «Зябликово». Прямой участок пути, номинальная ширина колеи – 1520 мм, износ рельсов – 0 мм. Конструкция типа ВГС5-65.

Анализируя состояние прямых участков пути конструкции ВГС5-65 (рисунок 3.10) можно сделать вывод о высоком обеспечении стабильности размеров геометрии рельсовой колеи. Однако, местами наблюдается износ конструкции, отражающийся в близком к II степени отклонениям в прямолинейности рельсов (график «рихтовок») и возникновением местами просадок рельсовых нитей, также в допустимых интервалах. Данный износ конструкции является закономерным при пропущенном тоннаже 400 млн. т брутто. Полная графическая диаграмма данного участка представлена в



Анализ состояния полигона кривых большого радиуса (рисунок 3.11, приложение В, рисунок В13) также показывает на стабильность положения рельсовых нитей по плану и профилю. Наблюдается впечатляющая стабильность по профилю (график «просадок») для участка безбалластного пути.

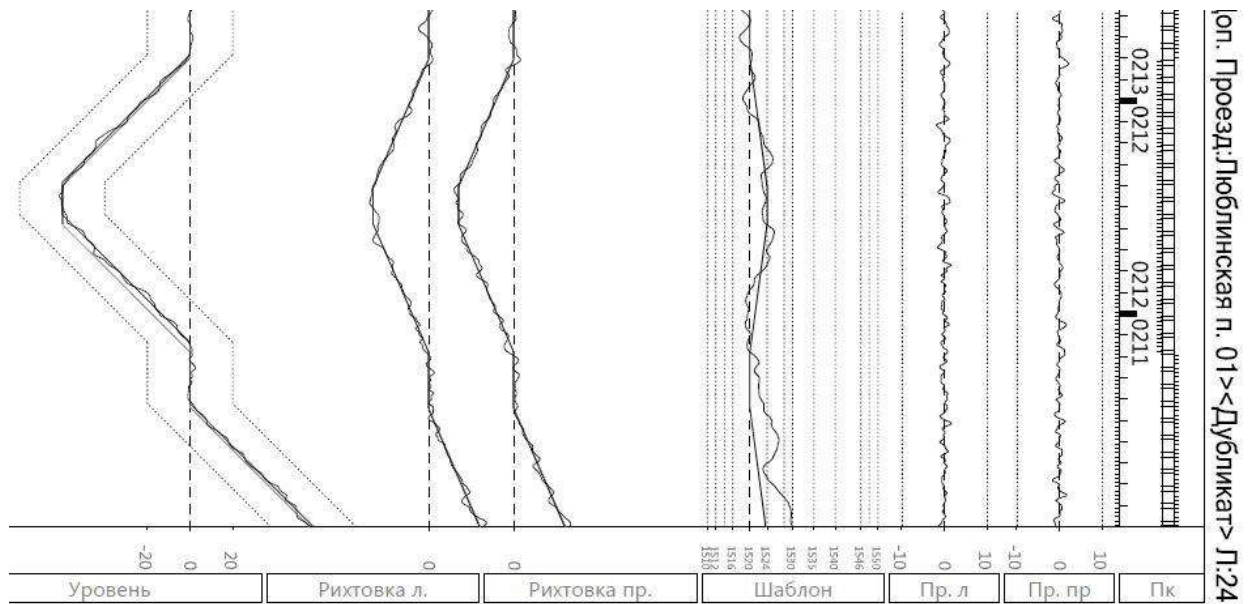


Рисунок 3.12 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Люблинско-Дмитровской линии «Борисово» - «Шипиловская». Кривой участок пути радиусом 1000 м, возвышение наружной рельсовой нити – 60 мм, номинальная ширина колеи – 1524 мм, износ рельсов – 1 мм. Конструкция типа ВГС5-65.

С уменьшением радиуса кривых стабильность пути сохраняется (рисунок 3.12, приложение В, рисунок В12). Так, на кривой радиусом 1000 м, наблюдается постоянство устроенного возвышения наружной рельсовой нити и устойчивое положение рельсовых нитей по плану пути.

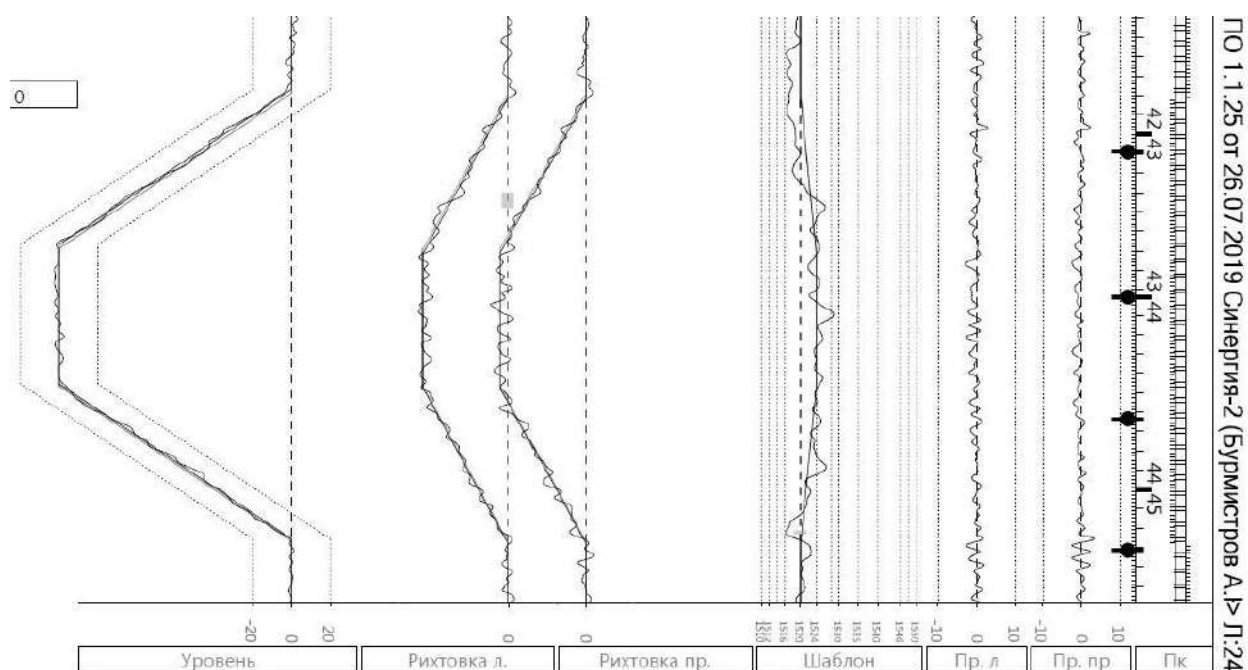


Рисунок 3.13 – Графическая диаграмма ГРК на перегоне Люблинско-Дмитровской линии «Марьяна роща» - «Достоевская». Кривой участок пути радиусом 600 м, возвышение наружной рельсовой нити – 120 мм, номинальная ширина колеи – 1524 мм, износ рельсов – 0 мм. Конструкция типа ВГС5-65.

Анализ участка кривой радиусом 600 м (рисунок 3.13, приложение В, рисунок В14) показывает техническое преимущество данной конструкции, заключающееся в обеспечении устойчивой ширины колеи, и как следствие, стабильность пути в плане. Исследуемые ранее конструкции показывали уширение колеи на кривых радиусом 600 м до предотказных значений (уширение всей круговой кривой на 5 мм выше номинального значения) (рисунки 3.2, 3.7 и 3.8).

3.3 Общий анализ полученных показателей надежности конструкций верхнего строения пути метрополитена

Выполненные расчеты и исследования показали определенные результаты и статистические закономерности, которые важны для дальнейшего анализа:

1. Количество зарегистрированных отступлений по текущему содержанию ГРК на безбалластных конструкциях железнодорожного пути метрополитена, в среднем, на 80% приходится на отступления по плану (уширения, сужения, рихтовки, нарушения отводов ширины колеи и т.д.) (таблицы 3.14 и 3.18).

2. Выявлена повышенная дефектность кривых участков пути, имеющих радиус до 800 м. На исследуемых участках наблюдается закономерность увеличения потока отказов с уменьшением радиуса исследуемой кривой (рисунок 3.1). Соответственно аналогично потоку отказов изменяются остальные показатели надежности. Однако конструкция типа ВГС5-65 проявляет стабильность ГРК, как по профилю пути так и по плану, одинаково, независимо от плана пути, согласно анализу показателей надежности и графических диаграмм (рисунки 3.10-3.13, приложение В, рисунок В12-В14).

3. Присутствует очевидный износ конструкций железнодорожного пути при анализе графических диаграмм проезда путеизмерительного вагона. Износ элементов креплений и износ шпал с наработкой тоннажа приводит к увеличению ширины колеи от номинальных значений (нулевой линии) до предотказного состояния, в результате чего увеличивается интенсивность возникновения отступлений по «рихтовке» и «шаблону» (рисунки 3.2, 3.7 и 3.8, приложение В).

4. Наблюдается очевидная разница при сравнении показателей надежности различных конструкций в зависимости от пропущенного тоннажа и типа верхнего строения пути. Для более достоверного сравнения показателей надежности конструкций железнодорожного пути метрополитена, необходимо привести их к одной наработке тоннажа.

Актуален сравнительный анализ показателей надежности исследуемых конструкций пути ввиду определения наиболее надежной из них. Очевидно, что сравнивать показатели надежности конструкций в один момент времени, у которых пропущенный тоннаж отличается в разы, ошибочно. Поэтому необходимо создать зависимость данных показателей от наработки тоннажа с привязкой к одной из исследуемых конструкций.

Приняв определенные предположения, можно построить график зависимости среднего потока отказов исследуемых конструкций на прямых участках от пропущенного тоннажа. Сделав привязку к моменту ввода в эксплуатацию конструкции типа «метро» на Таганско-Краснопресненской линии (1966 г), и, с учетом постепенного увеличения грузонапряженности, построен график зависимости показателя надежности – потока отказов ω от пропущенного тоннажа конструкций (рисунок 3.14).

При построении данного графика (рисунок 3.14) были сделаны следующие допущения:

1. На момент ввода в эксплуатацию исследуемые конструкции обладали показателем надежности – потоком отказов, равным нулю (пусть, соответствующий проектным значениям и состоянию значений размеров ГРК в допустимых диапазонах).

2. Состояние рельсовой колеи ухудшается пропорционально увеличению пропущенного тоннажа, следовательно, постепенно увеличивается количество зарегистрированных путеизмерительным вагоном отказов (отступлений) и сам поток отказов ω .

Пунктирной линией на графике (рисунок 3.14) изображены прогнозируемые значения потока отказов согласно построенной зависимости.

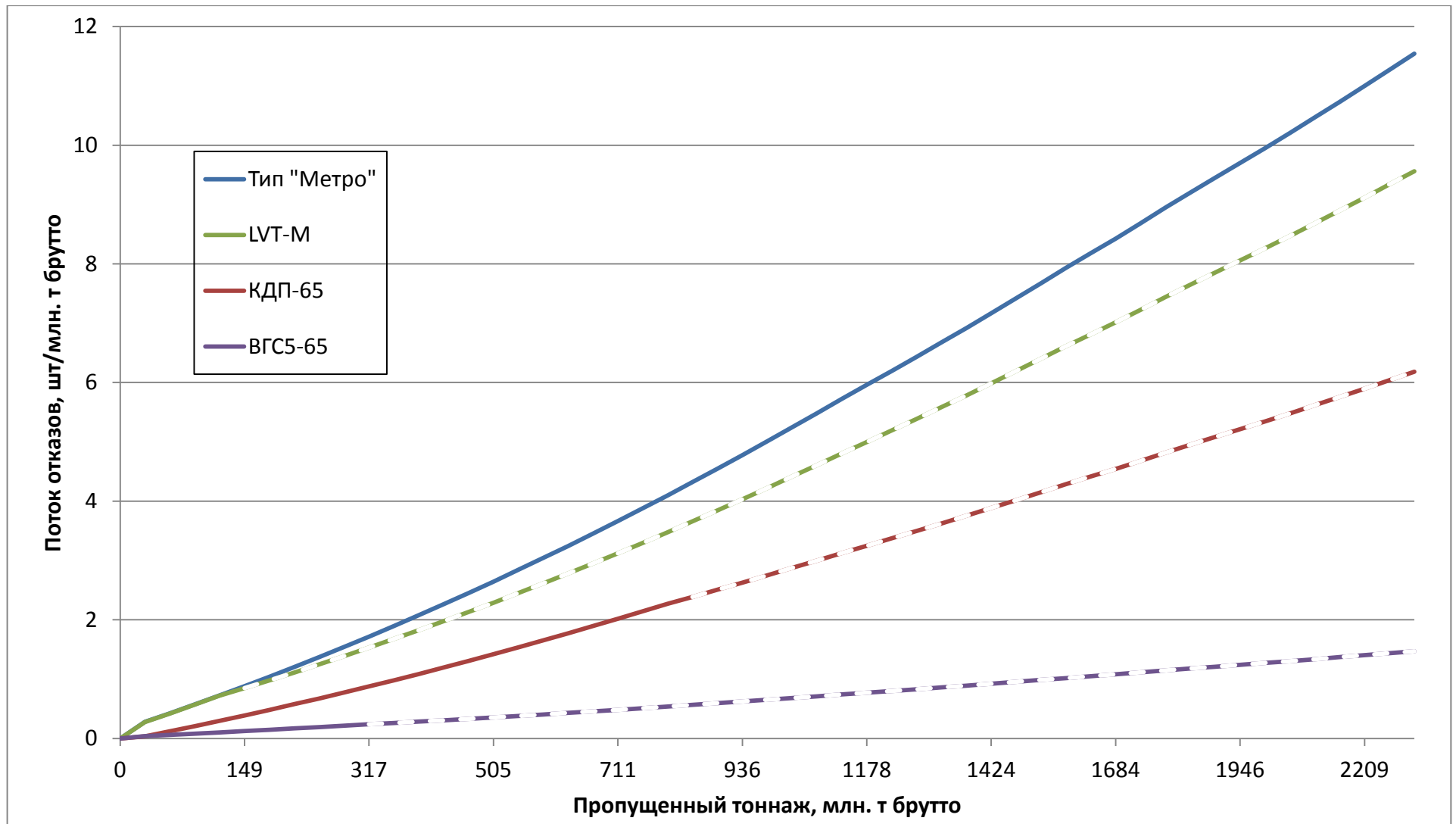


Рисунок 3.14 – График сравнительного анализа среднего потока отказов конструкций на прямых участках пути в зависимости от пропущенного тоннажа. Пунктирной линией обозначен прогнозируемый поток отказов.

График, изображенный на рисунке 3.14, показывает прогнозируемое состояние исследуемых конструкций при наработке тоннажа близкой к типовой конструкции пути.

При анализе полученных зависимостей появляется очевидный вопрос в прогнозируемой надежности конструкции LVT-M. LVT-M, как современная конструкция, с бетонным подрельсовым основанием, рельсовым скреплением типа APC-4 и конструктивными решениями для виброзащиты, в прогнозируемом интервале не конкурентная своими показателями надежности другой современной конструкции – ВГС5-65. Непродолжительная эксплуатация железнодорожного пути с блоками LVT-M (в пределах 4-х лет и 200 млн. т брутто) показывает неутешительные результаты. Причины и следствия большого потока отказов на участках пути с данной конструкцией нуждаются в дополнительном исследовании. На данный момент обнаружены определенные недостатки в эксплуатации данной конструкции:

1. Необратимая деформация и износ резиновой оболочки и упругой подкладки бетонной полушпалы, предположительно, вследствие высокой интенсивности движения поездов, взаимодействия оболочки со смазывающими материалами подвижного состава и стрелочных переводов, а также, возможным несоблюдением технологических регламентов при строительстве и укладке пути на блоках LVT на исследуемых участках.

2. Сложности при замене дефектной полушпалы, связанные со сцеплением оболочки и путевого бетона.

3. Необходимость замены всей полушпалы при наличии дефекта в анкере рельсового скрепления APC-4.

4. Износ регуляторов ширины колеи рельсового скрепления APC-4.

Следует отметить отличительную сравнительную надежность конструкции типа ВГС5-65, подтвержденную стабильным положением рельсовых нитей по плану и профилю согласно графическим диаграммам.

Можно построить другую зависимость показателей надежности исследуемых конструкций, охватывающую все участки пути, в том числе

кривые, где номинальная ширина колеи составляет 1535, 1530 и 1524 мм, и устроено возвышение наружной рельсовой нити.

На рисунке 3.15 изображен график зависимости интенсивности отказов λ на исследуемых участках от плана кривой. Дефектность кривых участках на всех исследуемых конструкциях выше прямых, для того, чтобы это показать построены линии тренда, отражающие уменьшение интенсивности отказов с увеличением радиуса кривой и приближением к прямым участкам.

Значение интенсивности отказов по конструкции ВГС5-65 показано на графике только по прямым участкам. Данный факт объясняется отсутствием достаточного количества кривых участков пути данной конструкции на исследуемых полигонах Московского метрополитена. Однако, учитывая полученные зависимости интенсивности отказов от плана пути других конструкций, можно сделать прогноз о том, что интенсивность отказов кривых участков пути конструкций типа ВГС5-65 после 10 лет эксплуатации не превысила бы значение 0,2 шт/млн. т брутто.

Изображенный на рисунке 3.15 график построен в целях оценки распределения отказов по разным по плану участкам пути. Данный график не предназначен для сравнения основных конструкций между собой по показателям надежности, так как изображенная интенсивность отказов никак не зависит от пропущенного тоннажа полигонами конструкций. Для данной цели больше подходит график, изображенный на рисунке 3.14.

Отсутствие привязки к пропущенному тоннажу на рисунке 3.14 объясняет низкую интенсивность отказов у конструкции LVT-M. Если сравнить интенсивность отказов только по прямым участкам у двух современных конструкций LVT-M и ВГС5-65, то очевидно, что ВГС5-65 при большей наработке тоннажа показывает лучший результат, чем LVT-M в течение первых 2-3 лет эксплуатации.

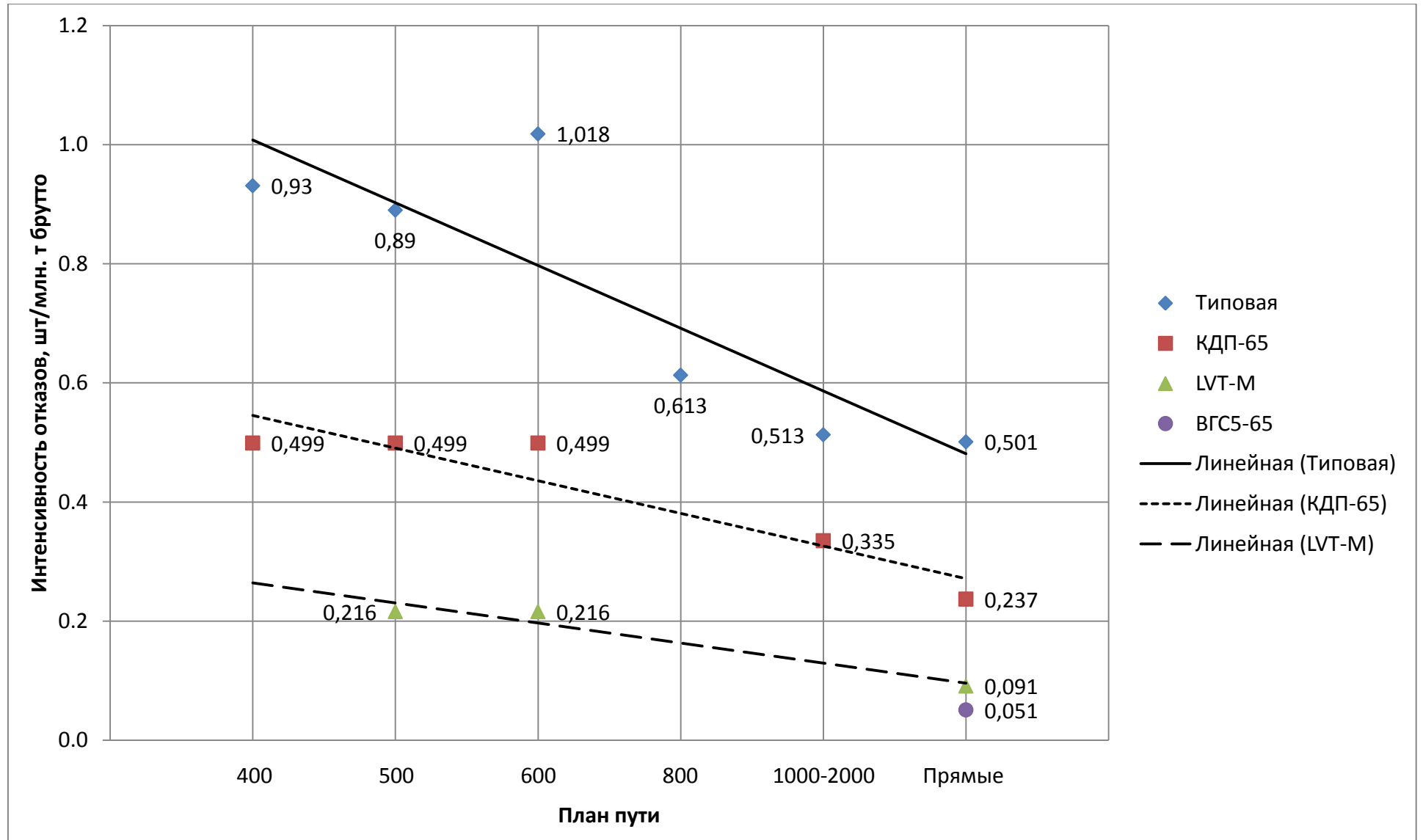


Рисунок 3.15 – График зависимости интенсивности отказов от плана пути.

3.4 Выводы к главе 3

1. Применение оптимизированной методики расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути концепции УРРАН к полигону главных путей метрополитена позволило определить основные показатели надежности конструкций пути и провести их сравнительный анализ.

2. Анализ показателей надежности конструкций железнодорожного пути метрополитена показал, что:

- Присутствует зависимость состояния ГРК от плана путей, а именно, чем меньше радиус кривой, на которой движение поездов происходит с основной установленной скоростью, тем более изношены элементы конструкции пути.

- Полигоны однородных участков кривых радиусом от 400 до 600 м на Таганско-Краснопресненской линии не могут быть полностью отремонтированы при имеющихся у эксплуатационных околотов трудовых и технических ресурсах. На перегонах метрополитена, введенных в эксплуатацию раньше, либо в интервале 1966-1975 годов, может наблюдаться аналогичная ситуация.

- Совместный анализ показателей надежности и графических диаграмм ГРК на исследуемых участках показал сходимость полученных показателей и состояния ГРК. Чем хуже полученный показатель, тем ближе к максимально и минимально допустимым значениям размеры ГРК.

3. Сравнительный анализ конструкций пути по показателям надежности показал, что:

- Типовая конструкция пути, ожидаемо, показала худший результат. На полигоне данной конструкции, помимо отступлений II и III степени, наблюдались также отступления IV и V степени, при регистрации которых ограничивается скорость движения поездов, либо останавливается движение до устранения неисправности.

- Конструкция пути типа LVT-M, уложенная на участке полигона Люблинско-Дмитровской линии, показала худший результат увеличения потока

отказов с увеличением пропущенного тоннажа в сравнении с конструкцией КДП-65. Данный факт ставит под сомнение применение данной конструкции на вновь строящихся линиях метрополитена и нуждается в дополнительном исследовании.

– Конструкция типа ВГС5-65 показала лучший результат показателей надежности по сравнению с остальными исследуемыми конструкциями. Стабильность размеров ГРК наблюдается также на проанализированных графических диаграммах.

4. Необходимость усиления железнодорожного пути на кривых участках радиусом 800 м и менее, вследствие того, что 80% всех отступлений по содержанию ГРК на безбалластном пути метрополитена приходится на данные участки (переходные и круговые кривые).

5. Необходимость дальнейшей разработки либо модернизации конструкций железнодорожного пути с технической направленностью на должное сопротивление рельсов против сдвигов в перпендикулярной оси пути плоскости, ввиду подавляющего числа зарегистрированных отступлений по плану пути на относительно новых конструкциях (уширение и сужение колеи, рихтовки, нарушение отводов ширины колеи) (в среднем 60%) (приложение Г, рисунок Г1 и Г2).

6. Необходимость создания методики по текущему содержанию железнодорожного пути метрополитенов, учитывающей данные о многократных проездах вагонов-путеизмерителей по определенному участку (дистанции, околотку), позволяющих определить наиболее изношенные (дефектные) участки пути, нуждающиеся в первоочередном ремонте либо модернизации для предупреждения возникновения опасных отказов либо недопущения постепенного ухудшения состояния пути.

7. Необходимость учета показателей надежности эксплуатирующихся конструкций верхнего строения пути метрополитена при строительстве новых участков, либо модернизации старых. Как следствие, исключение тех конструкций, которые не подтвердили свою надежность в условиях интенсивной

эксплуатации.

Вышеперечисленные результаты проведенного исследования должны служить рекомендациями, целью которых является, главным образом, обеспечение безопасности движения поездов [34 п. 3.1].

4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЙ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ МЕТРОПОЛИТЕНА

Примененная в данном исследовании методика для определения показателей надежности конструкций верхнего строения пути метрополитена на основе данных о фактическом состоянии ГРК может быть также приспособлена к решению определенных управленческих и технических задач, заключающихся в:

1) Содержании сооружений метрополитена в исправном состоянии, обеспечивающими пропуск поездов с наибольшими установленными скоростями [34 п. 2.1];

2) Предупреждении появления каких-либо неисправностей и обеспечении длительных сроков службы сооружений (верхнего строения пути) [34 п. 2.1];

3) Эффективном использовании технических средств и материальных ресурсов [34 п. 1.1];

4) Обеспечении плавности хода (снижение сопротивления движению подвижного состава и снижении негативного воздействия на пассажиров) [34 п. 3.1];

5) Повышении уровня обеспечения безопасности движения поездов [34 п. 1.1, 3.1].

Перечисленные выше задачи могут быть решены с помощью проведения адресных (локальных) ремонтов и модернизаций неблагоприятных участков пути. А также, с помощью правильного распределения персонала по эксплуатационной дистанции в зависимости от состояния обслуживаемого участка пути.

Данный раздел будет посвящен одному из методов решения вышеперечисленных задач с помощью положений методики определения показателей надежности конструкций верхнего строения пути метрополитена (глава 2).

Отправной точкой данного исследования является необходимость

регламентации, организации и проведения ремонтных мероприятий компенсирующих долговременное отсутствие капитальных ремонтов пути.

4.1 Определение участков пути для проведения первоочередного адресного (локального) ремонта либо модернизации

Задача по определению участков пути для адресного ремонта либо модернизации решается посредством распределения зарегистрированных за продолжительное время отступлений в содержании ГРК путеизмерительным вагоном по полигону дистанции пути, предварительно поделенному на однородные участки, как было описано в разделе 2.2.1 настоящего исследования. Причем, отступления в создаваемом распределении, должны регистрироваться с точными координатами, степенью, типом, величиной отклонения, длиной и соответствующим баллом. Повторно зарегистрированные отступления не должны включаться в распределение.

Пример такого распределения в упрощенном виде (без координатной привязки отступлений) показан на рисунке 2.1 и 4.1.

Участки для адресного ремонта определяются на основе одного из положений настоящего исследования, которое было раскрыто в 1 и 2 главах, и определяет, что количество зарегистрированных отступлений путеизмерительным вагоном на анализируемом участке непосредственно связано с техническим состоянием элементов верхнего строения пути. Чем больше количество отступлений по содержанию ГРК, тем изношеннее верхнее строение пути (элементы скреплений, подрельсовое основание, местами путевой бетон). На основе данного положения должны определяться участки для адресного (локального) ремонта пути.

Станция	Год постр.	Глубина	Расположен	Нумерация	Полярность	Пикет	Метр	План	Профиль	Прот-ть	Тип конс	Год	Тоннаж	Тип отступления				Примеч.	Сумма
						36	15.2	600						РНР	Р	Р	Р	1	1
						36		600						Р	Р	Р		1	1
						35		600						РР	Р	Р		3	1
						34		600						Р	Р	Р		1	1
						33		600						Р	Р	Р		1	1
						32		600						Р	Р	Р		1	1
						31		600						Р	Р	Р		1	1
						30		600						Р	Р	Р		1	1
				80	0	29	86.4	600		628.8	Д/КДП		832.01	Р	Р	Р		1	1
Римская	1996	54				29	86.4	0						П				1	
				81	0	29		0											
						28	2	0		184.4	Д/КДП		832.01						
						28	2	600						Р	Р	П	Р	1	1
						28		600						П	Р	Р	Р	1	1
						27		600						П	П	Р	Р	1	1
						26		600						Р	Р	Р	Р	1	1
						25		600						Р	Р	Р		1	1
						24		600						Р	РП	Р		1	2
						23		600						ОТВШ	П	Р		1	1
						22		600						Р	П	Р		1	1
						21		600						Р	Р	Р		1	1
				82	0	20	30.7	600		771.3	Д/КДП		832.01	Р	П	Р		1	1
						20	30.7	0						Р				1	
						20		0						П				1	
						19		0						Р				1	
						18		0											
						17		0											
						16		0											
						15		0											
						14		0											
						13		0											
						12		0											
				83	0	11	82.9	0		847.8	Д/КДП		832.01						
						11	82.9	600						ОТВШ				1	
						11		600						Р				1	
						10		600						Р				1	

Рисунок 4.1 – Пример распределения зарегистрированных отступлений в содержании ГРК по однородным участкам I пути Люблинско-Дмитровской линии с помощью программы Microsoft Excel. В данном примере учтены повторы отступлений.

Таким образом, при распределении отступлений по однородным участкам (рисунок 4.1), создается наглядная картина, отражающая участки пути, на которых за рассматриваемый период было зарегистрировано большее количество отступлений относительно их длины. Как правило, это кривые участки радиусом 800 м и менее, и прямые участки пути, на полигоне которых присутствуют переходные участки (щебень-бетон), тоннельные рампы и стрелочные переводы.

Если визуально по файлу обработки данных невозможно однозначно определить, руководствуясь количеством зарегистрированных отступлений, наиболее изношенный участок пути, нуждающийся в ремонте, то можно воспользоваться формулой

$$\rho_i = \frac{r_i}{l_i}. \quad (4.1)$$

где ρ_i - плотность распределения количества отступлений ГРК по полигону однородного участка i , шт/м;

r_i - количество зарегистрированных отступлений ГРК II-V степени на однородном участке i , шт;

l_i - длина однородного участка i , м.

Далее участок разбивают на отрезки, длина которых $l_{от.ср}$ является средней длиной одного отступления по ГРК на исследуемом участке за определенный период наблюдения

$$l_{от.ср} = \frac{\sum_{j=1}^j l_{от-j}}{r_i}, \quad (4.2)$$

где $l_{от-j}$ - длина единичного отступления ГРК j , зарегистрированного в пределах однородного участка i .

Соответственно, участки пути в пределах длины $l_{от.ср}$, на которых за выбранный период наблюдения обнаружено большее количество отступлений ГРК, объединяются и сокращаются согласно пикетажу от начала первого отступления до конца последнего.

Кроме того, при ранжировании выявленных участков по техническому состоянию для первоочередного ремонта необходимо руководствоваться величиной отклонений от номинальных размеров ГРК. Для этого вычисляется средняя величина отклонений S_{cp-i} от номинальных параметров ГРК

$$S_{cp-i} = \frac{\sum_{j=1}^j S_{от-j}}{r_i}, \quad (4.3)$$

где $S_{от-j}$ – отклонение от номинального значения параметра ГРК j , зарегистрированного в пределах выбранного участка для ремонта i .

r_i – количество зарегистрированных отступлений по ГРК II-V степени в пределах выбранного участка для ремонта i , шт;

Соответственно участок для ремонта, определенный в пределах отрезков $l_{от.ср}$ (например, участок от ПК 034+51,5 до ПК 035+1,1 на рисунке 4.4), на котором вычислена наибольшая величина S_{cp-i} является приоритетным участком планирования первоочередного ремонта.

Так как, обнаруженные проблемные участки для проведения адресных ремонтов могут быть достаточно протяженными, то следующий шаг заключается в предоставлении точных координат на однородном участке, где было зарегистрировано наибольшее количество отступлений.

Необходимо первоочередное выполнение ремонтных работ по усилению верхнего строения пути и замене изношенных элементов на участках пути, где было зарегистрировано хотя бы одно отступление от норм содержания ГРК IV и V степени. Наличие на участке одного из отступлений IV и V степени свидетельствует о значительном износе либо негодности элементов верхнего строения. Ремонтируемый участок должен включать в себя координаты расположения одного из данных отступлений.

В данном исследовании задача определения участков наибольшей концентрации отступлений решена с помощью программного обеспечения AutoCAD (Autodesk). Были проанализированы наиболее проблемные однородные участки на Люблинско-Дмитровской линии (ПЧ-7), представляющие из себя кривые радиусом 600 м и менее.

Отступления были распределены по точным координатам на анализируемых участках. В том числе, учитывается длина отступления, оцененная путеизмерительным вагоном. Например, отступление ГРК типа «рихтовка» может иметь длину до 18 м. Причем, при длине отступления в 18 м согласно информации с путеизмерительного вагона, расстояние между экстремумами смежных стрел изгиба рельсовых нитей на данном отступлении составит 9 м [71]. При длине «рихтовки» 14 м, расстояние между экстремумами составит 7 м соответственно. У «уширений» и «просадок» сравнительно малая протяженность – 1-2 метра.

Более подробно ознакомиться с методикой автоматизированной расшифровки и оценки отступлений от норм содержания ГРК Московского метрополитена мобильными путеизмерительными средствами можно в [71].

В качестве примера, для определения участка для адресного ремонта пути, построен чертеж одного из участков с наибольшим количеством отступлений ГРК (рисунок 4.2). Расположение осей станций, пикетов, начала и концов переходной и круговой кривой, возвышение рельсов и т.д. соответствует действительности. Координаты отступлений на чертеже (рисунок 4.2) имеют точность в 1 м.

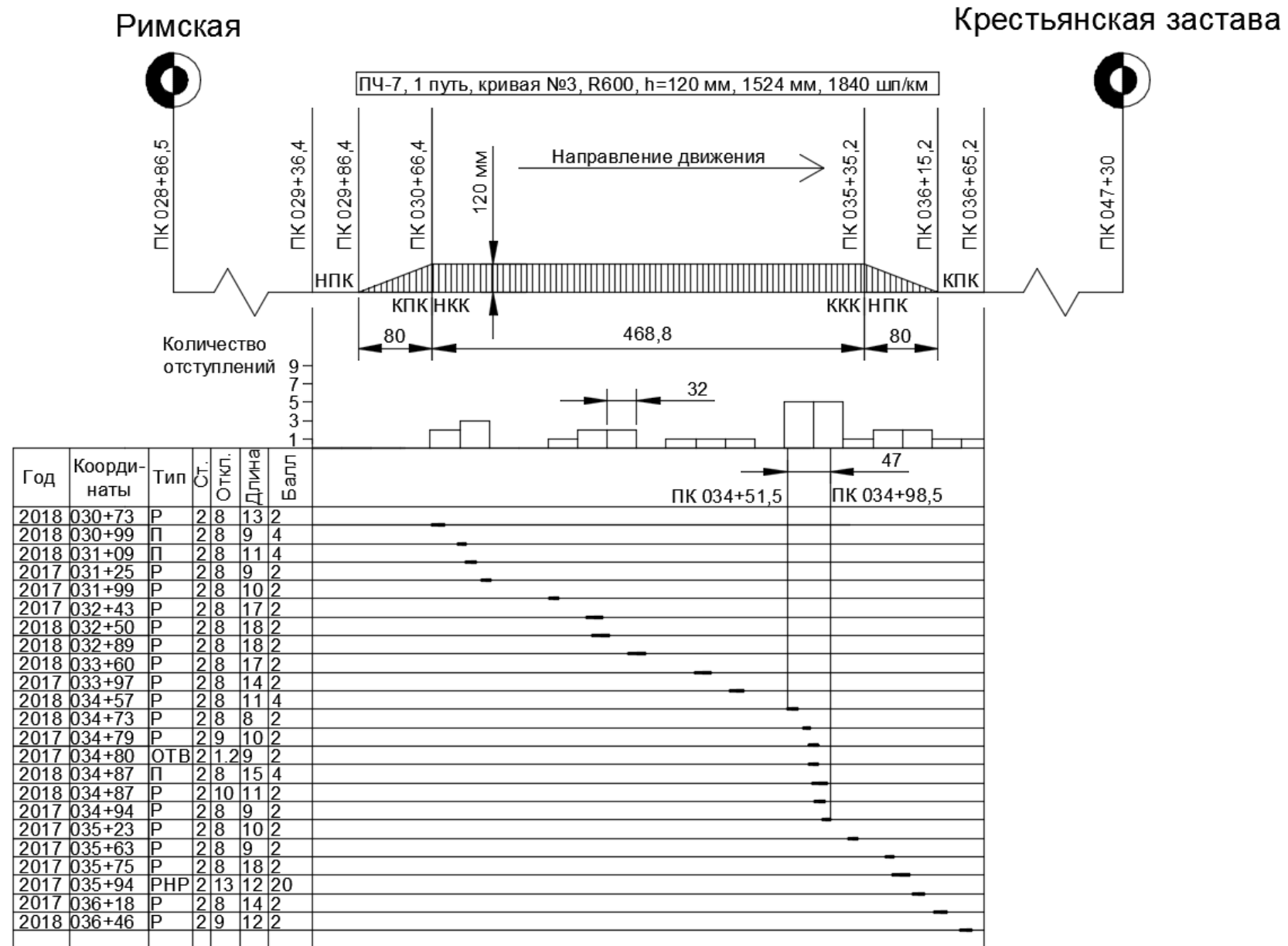


Рисунок 4.2 – Участок кривой №3 на Люблинско-Дмитровской линии. Параметры кривой указаны на рисунке.

Пример определения участка пути для ремонта на кривой №3 (нумерация кривых в данной работе соответствует нумерации по паспорту дистанции пути) радиусом 600 м от ПК 029+36,4 до ПК 036+15,2 представлен на рисунке 4.2.

Распределение отступлений по полигону исследуемой кривой выполнено согласно нарастанию пикетов для обеспечения более наглядной картины о местах их концентрации.

Величина отрезка пути, по которому построена эпюра отступлений по оси «Количество отступлений» на рисунке 4.2, составляет 32 м и является средней арифметической величиной расстояний между выявленными отступлениями на кривой №3 Люблинско-Дмитровской линии.

На участке кривой выделен очевидный участок, на котором концентрация зарегистрированных отступлений за 2 календарных года превышает концентрацию на соседних участках. Для оценки данного параметра построена эпюра кривой по 100 метровым участкам пути.

Плотность распределения отступлений на данной кривой составляет

$$\rho_{\text{кр.3}} = 0,04 \text{ шт/м},$$

а для выделенного участка (рисунок 4.1) от ПК 034+51,5 до ПК 034+98,5

$$\rho_{\text{кр.3.1}} = 0,15 \text{ шт/м}$$

при длине данного участка всего в 47 м.

Более подробный анализ выбранного участка для адресного ремонта можно выполнить, руководствуясь таблицей 4.1.

Таблица 4.1

Зарегистрированные отступления на выбранном участке для адресного ремонта по 1 главному пути ПЧ-7 от ПК 034+51,5 до ПК 034+98,5

Год обнаружения	Координаты отступления	Тип	Степень	Величина отклонения, мм	Длина, м	Балл
2018	034+57	Р	2	8	11	4
2018	034+73	Р	2	8	8	2
2017	034+79	Р	2	9	10	2
2017	034+80	ОТВ	2	1,2	9	2
2018	034+87	П	2	8	15	4

2018	034+87	P	2	10	11	2
2017	034+94	P	2	8	9	2

По данным из таблицы 4.1 можно сделать некоторые заключения о выбранном участке, которые, должны уточняться непосредственно перед назначением адресного ремонта с помощью натурного осмотра.

Во-первых, наличие пяти зарегистрированных отступлений по содержанию смежных стрел изгиба и нарушение величины плавного отвода ширины колеи свидетельствует о нестабильном положении наружной рельсовой нити в плане. Причиной этому может быть как наличие куста негодных шпал на исследуемом участке, так и возможный износ элементов рельсовых креплений. Причиной может быть также низкое сопротивление выдергиванию и сдвигу путевых шурупов вследствие механического воздействия на подрельсовое основание (сверление) при текущем содержании пути, которое нарушает целостность древесины.

Во-вторых, наличие «перекоса» свидетельствует о нестабильном положении рельсовых нитей по профилю. Кроме того, длина данного отступления (15 м) охватывает места появления отступлений по плану на исследуемом участке.

Также анализ участка можно выполнить по графическим диаграммам рельсовой колеи (рисунок 4.3).

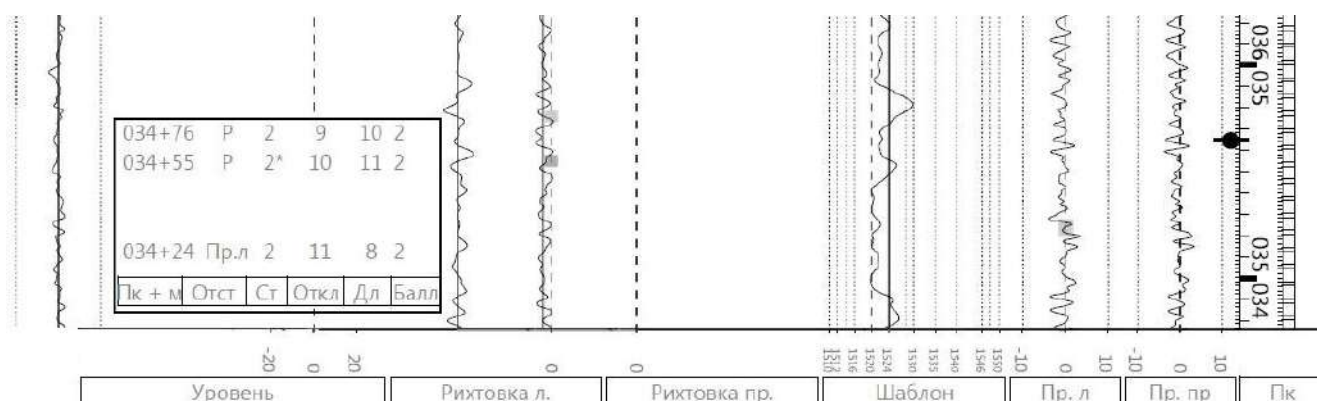


Рисунок 4.3 – Графическая диаграмма параметров ГРК на участке адресного ремонта от ПК 034+51,5 до ПК 034+98,5 (Синергия-2, проезд от 11.2019). 1 путь, ПЧ-7.

Графическая диаграмма, показанная на рисунке 4.3, отражает состояние рельсовой колеи на исследуемом участке адресного ремонта. Кроме того, что проезд зарегистрировал два отступления по содержанию смежных стрел изгиба рельсовых нитей, одно из которых близко к III степени, очевидна нестабильность ширины колеи, ее резкие сужения и уширения. Полная графическая диаграмма данного участка приведена в приложении В (рисунок В15.).

Анализ остальных кривых участков пути на ПЧ-7 (Люблинско-Дмитровская линия), на которых зарегистрировано подавляющее число отступлений ГРК, показал, что практически на всех участках можно выделить аналогичные приведенным выше участки концентрации отступлений для выполнения адресного ремонта.

На рисунке 4.4 отступления на кривой №3 распределены согласно хронологии возникновения, а длина отрезков, равная 12,4 м, является средней длиной одного отступления ГРК на исследуемом участке пути.

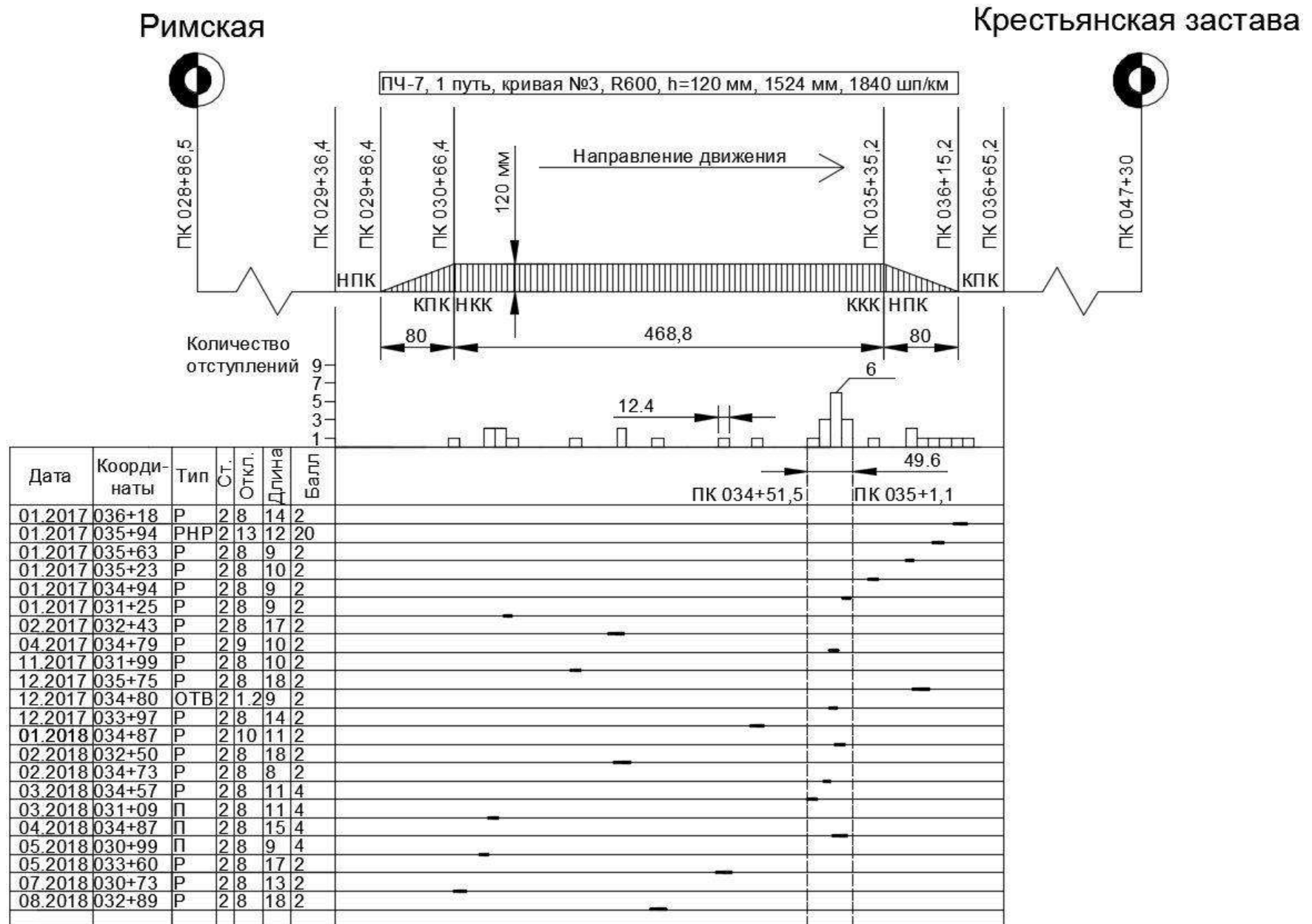


Рисунок 4.4 – Участок кривой №3 на Люблинско-Дмитровской линии. Параметры кривой указаны на рисунке.



Кривая №29 (рисунок 4.54) является примером участка, где адресный ремонт можно провести в двух местах. Очевидная концентрация отступлений в содержании ГРК присутствует на участках от ПК 0176+62 до ПК 0176+104 (таблица 4.2) и от ПК 0179+57,3 до ПК 0179+84,3 (таблица 4.3). Концентрация отступлений в данных местах указывает на изношенность элементов верхнего строения пути, главным образом, шпал и элементов рельсовых креплений.

Таблица 4.2

Зарегистрированные отступления на выбранном участке для адресного ремонта по 1 главному пути ПЧ-7 от ПК 0176+62 до ПК 0176+104

Год обнаружения	Координаты отступления	Тип	Степень	Величина отклонения, мм	Длина, м	Балл
2018	0176+57	УШ	2	1533	1	2
2017	0176+68	Р	2	8	12	2
2017	0176+74	ОТВ	2	1,5	7	2
2017	0176+74	Р	2	9	13	4
2018	0176+86	П	2	8	13	4
2017	0176+94	Р	2	8	8	2
2017	0176+99	Р	2	9	10	2

Таблица 4.3

Зарегистрированные отступления на выбранном участке для адресного ремонта по 1 главному пути ПЧ-7 от ПК 0179+57,3 до ПК 0179+84,3

Год обнаружения	Координаты отступления	Тип	Степень	Величина отклонения, мм	Длина, м	Балл
2018	0179+63	П	2	8	15	4
2018	0179+69	Р	2	8	14	2
2017	0179+76	П	2	9	4	10
2017	0179+77	Р	2	8	11	2

Чтобы ознакомиться с состоянием рельсовой колеи на анализируемых участках, воспользуемся графической диаграммой (рисунок 4.5).

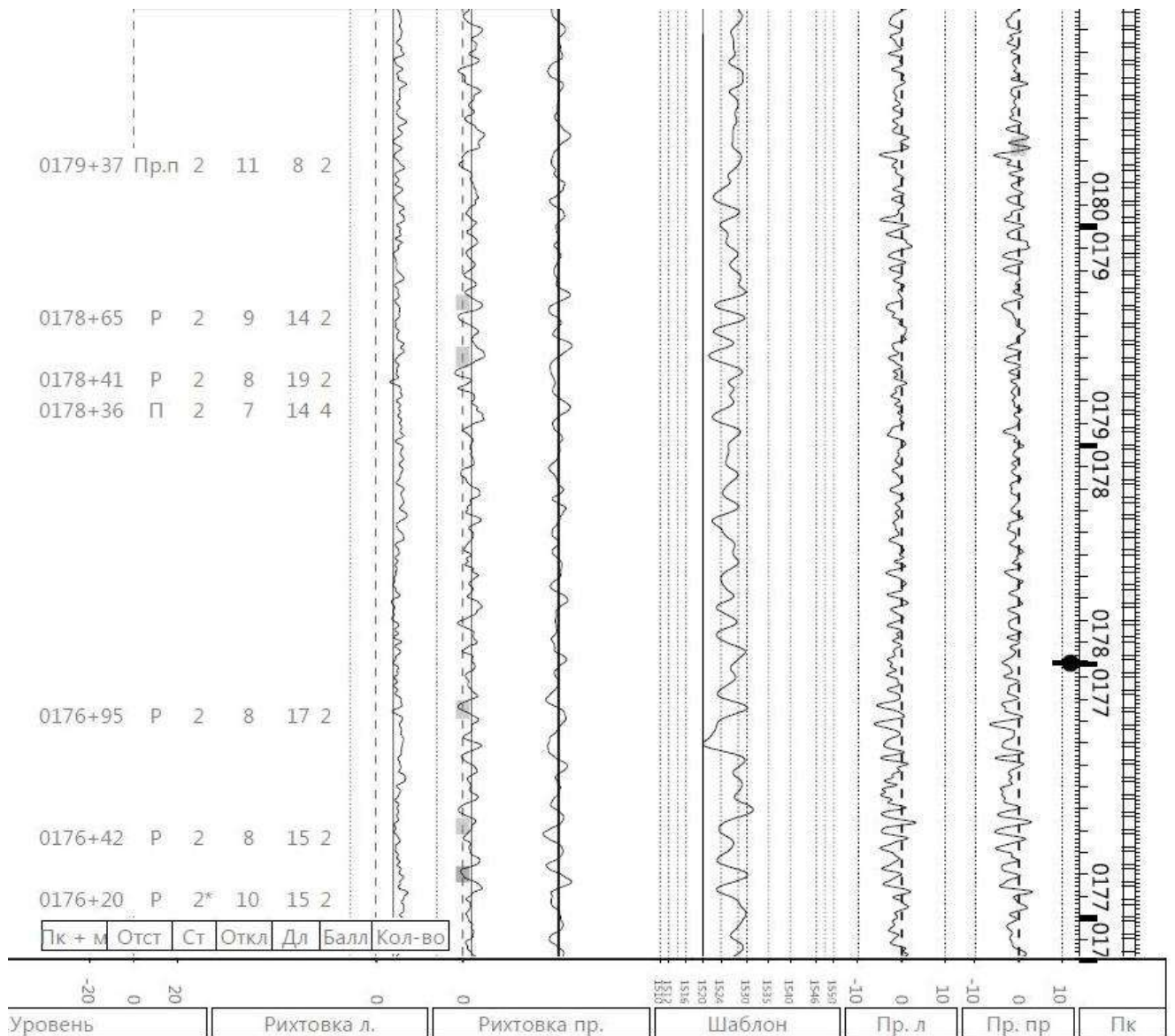


Рисунок 4.6 – Графическая диаграмма параметров ГРК на участках адресного ремонта от ПК 0176+62 до ПК 0176+104 и от ПК 0179+57,3 до ПК 0179+84,3 (Синергия-2, проезд от 11.2019). 1 путь, ПЧ-7.

Можно сделать определенные выводы, проанализировав графическую диаграмму параметров рельсовой колеи по кривой №29 на ПЧ-7 (рисунок 4.6). В целом, это также нестабильность пути в плане и местами по профилю. Полная графическая диаграмма данного участка приведена в приложении В (рисунок В16).

Однако, кривая №29 (рисунок 4.5) имеет свою особенность, заключающуюся в проектной ширине колеи в 1520 мм. Неизвестно по каким

причинам на кривой радиусом 600 м принята данная величина ширины рельсовой колеи, однако, проектные параметры участков должны учитываться и соблюдаться при назначении и выполнении адресных ремонтов пути.

В окончании данного подраздела, необходимо подчеркнуть, что путеизмерительный вагон регистрирует два основных типа данных. Это разница между экстремумами (разница между максимальными и минимальными значениями того или иного размера ГРК), и, максимумы и минимумы (минимальные и максимальные значения размеров ГРК) [71]. Первое применяется для выявления перекосов пути (разница между экстремумами по профилю пути), рихтовок (разница между экстремумами стрел изгиба рельсовых нитей). Второе актуально для нахождения уширений и сужений колеи, просадок. Очевидно, что образование резких перепадов значений стрел изгиба, положений рельсов по плану, сверхнормативных значений ширины колеи и т.д. невозможно при отсутствии негодных либо изношенных элементов верхнего строения пути. Данный факт подтверждает необходимость проведения ремонтных работ на участках, где зарегистрировано большее количество отступлений по текущему содержанию ГРК.

4.1.1 Организационно-технические решения при проведении адресных (локальных) ремонтных работ

Место проведения ремонтных работ должно определяться руководящим составом Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры Московского метрополитена (либо соответствующими по обязанностям службами других метрополитенов).

Участок адресного ремонта должен быть визуально осмотрен на наличие изношенных элементов верхнего и нижнего строения пути. Должны быть определены элементы, нуждающиеся в замене, и, при необходимости, в модернизации. Объемы ремонтных работ, количество требуемого материала и

технических средств (инструментов, механизмов) должны быть определены только после натурного осмотра.

В зависимости от типа верхнего строения пути и его состояния назначается ремонт либо модернизация. Например, участок с рельсовым скреплением типа «метро» может быть модернизирован в участок со скреплением КД-50. Возможно назначение выправки пути на исследуемом участке.

Не исключено, что результатом осмотра станет назначение замены путевого бетона, устранения трещин в нем, обеспечение его сцепления с подрельсовым основанием.

Руководитель службы (ответственный за результат производства работ) должен определить длину ремонтируемого участка в зависимости от его состояния, фактических возможностей дистанции пути и имеющихся трудовых, материальных и технических ресурсов.

Порядок производства работ на перегонах и станциях метрополитена должен обеспечивать полную безопасность движения поездов и, как правило, не нарушать график движения поездов [34 п. 10.7, 72]. Все работы по реконструкции, ремонту и модернизации пути должны выполняться в соответствии с утвержденными проектами, технологическими процессами, действующими инструкциями и правилами [72].

Важно, чтобы ремонт на участке сопровождался привязкой к проектным координатам рельсов в пути. В метрополитене привязка к проектным положениям рельсовых нитей осуществлена с помощью реперов, забетонированных в тело тоннеля. Расстояние от репера до внутренней рабочей грани ближайшего ходового рельса должно быть максимально близко к проектному значению. Это значит, что работы должны проводиться с использованием реперных шаблонов.

Стрелы изгиба рельсовых нитей должны быть максимально близки к значениям, определенным инструкцией по текущему содержанию пути и контактного рельса метрополитенов [70] при условии обеспечения реперного расстояния (расстояние от репера в теле тоннеля до рабочей грани ближайшего ходового рельса).

Величина ширины рельсовой колеи должна быть приведена в соответствие с проектными значениями. В исключительных случаях, с разрешения управления метрополитена, ширину колеи можно установить в технически приемлемых значениях для конкретного участка согласно инструкции по текущему содержанию пути и контактного рельса метрополитенов Российской Федерации [70].

Возвышение рельсовых нитей устанавливается также в проектное значение. Отвод возвышения должен быть плавным (1 мм на 1 м, либо 2 мм на 1 м), не должны допускаться резкие перепады значения возвышения рельсов во избежание возникновения дополнительных динамических нагрузок на путь. При постановке рельсов на определенную высоту должен также учитываться провис шпал, рельса, подкладок.

Положение рельсовых нитей по профилю пути должно соответствовать проектным значениям. Не исключено выставление рельсов в проектное положение совместно с подразделением метрополитена, занимающимся тахеометрической съемкой тоннелей (ГОС – габаритно-обследовательская станция).

Величины отводов ширины колеи и возвышения рельсов на переходных кривых должны изменяться по линейному закону.

Контактный рельс, после выполнения ремонтных работ, должен находиться на расстоянии от ближайшего ходового рельса согласно допускаемым значениям, установленным [70]. Работы по верхнему строению пути должны сопровождаться выправкой геометрии подвески контактного рельса с помощью точечных и катучих шаблонов.

Основная идея проведения адресных ремонтных работ в пути заключается в выставлении и закреплении рельсовой колеи в проектное положение с заменой изношенных либо негодных элементов верхнего строения. По необходимости возможен ремонт нижнего строения пути.

Практика замены рельсовых скреплений типа «метро» на КД-50 (модернизация пути) зарекомендовала себя как метод улучшения состояния пути

с помощью модернизации конструкции пути [93]. Как оговаривалось ранее, верхнее строение на участке для адресного ремонта может быть также модернизировано.

Кроме того, выставление рельсовой колеи в проектное положение необходимо с целью нивелировки проведенных за многие годы ремонтных работ на данных участках, в результате которых переходные кривые состоят из кривых разных радиусов, стрелы изгибы рельсовых нитей динамически изменяются на круговых кривых, путь имеет множество просадок и перекосов на границе допускаемых значений.

Все работы по адресному ремонту должны сопровождаться закрытием ремонтируемого перегона во время ночного «окна». Только после получения письменного подтверждения закрытия перегона от диспетчера централизованного хозяйства (ДЦХ, поездной диспетчер) можно приступать к работам.

После проведения данных работ ДЦХ необходимо выдавать письменные предупреждения на первые пять поездов (составов) о следовании со скоростью не более 25 км/ч в границах ремонтируемого участка.

После выполнения ремонтных работ, ответственный за производство работ, с допуском на нахождение на путях метрополитена под напряжением на контактном рельсе, должен, оставаясь на перегоне, сопровождать первый пассажирский поезд с целью удостоверения в том, что на путях не присутствуют неисправности угрожающие безопасности движения поездов. Кроме того, после выполнения ремонтных работ, обязателен проезд в кабине машиниста одним из ответственных за проведение работ с целью определения возможных резких толчков и просадок на ремонтируемом участке.

Если после натурного осмотра пути, либо после проезда в кабине машиниста ответственными руководителями работ обнаружены какие-либо неисправности угрожающие безопасности движения поездов, дальнейшие их действия определяются действующими на метрополитене инструкциями, правилами и нормативно-технической документацией [34, 70, 72, 77, 94, 95, 96].

4.2 Повышение надежности пути с помощью перераспределения трудовых ресурсов эксплуатационных подразделений

Основным критерием, которым необходимо руководствоваться при распределении работников в пределах эксплуатационной дистанции является состояние пути. Состояние пути подразумевает под собой количество зарегистрированных отступлений по текущему содержанию ГРК в пределах одного околотка (подразделения дистанции пути).

С целью недопущения возможности ухудшения состояния пути на подразделениях, которые имеют значительную наработку пропущенного тоннажа и не имеют достаточных трудовых ресурсов для устранения всех отступлений по ГРК, необходимо перераспределение монтеров пути между околотками в пределах эксплуатационной дистанции в зависимости от состояния обслуживаемых участков пути.

В данном подразделе исследования, трудозатраты на проведение выправочных работ (устранение отклонений по текущему содержанию ГРК) определены на основе экономических положений, основанных на временном факторе. Определены трудозатраты (человеко-часы), необходимые для ремонта 1 погонного километра конструкции пути, далее, выполнено сравнение вычисленных показателей. Проведена визуализация применяемой методики на примере Таганско-Краснопресненской линии (ПЧ-6).

Таким образом, в исследовании определено, что в течение одного месяца (интервал между контрольными проездами путеизмерительного вагона) эксплуатационное подразделение пути в среднем устраняет 36 отступлений по текущему содержанию ГРК. Причем, в течение одного ночного технологического «окна» устраняются 2,3 отступления по ГРК.

Знание вышеприведенных величин создает возможность определения требуемого количества человеко-часов $ЧЧ_1$ для устранения одного отступления по ГРК

$$\text{ЧЧ}_1 = \frac{t_{\text{ТО}} * n_{\text{м.п.}}}{r_{\text{факт}}^1 * s^{30}}, \quad (4.4)$$

где $r_{\text{факт}}^1$ – среднее количество отступлений, устраняемых во время одного ночного технологического «окна» в пределах одного околотка эксплуатационной дистанции пути;

$t_{\text{ТО}}$ – продолжительность ночного технологического «окна» - 2 часа 15 минут, или, 2,25 часа.

s^{30} - среднее количество ночных «окон» за один календарный месяц, во время которых осуществляется выправка пути, равное 16.

$n_{\text{м.п.}}$ - количество монтеров пути по штату подразделения, задействованных в проведении выправочных работ. Например, на Таганско-Краснопресненской линии Московского метрополитена, на каждом околотке количество монтеров пути, задействованных в проведении выправочных работ, составляет 12 человек.

Таким образом,

$$\text{ЧЧ}_1 = \frac{2,25 * 12}{2,3 * 16} = 0,73 \text{ чел. –ч/шт.}$$

Величина ЧЧ_1 может быть определена для каждого подразделения отдельно при условии, если значение штата работников подразделений эксплуатационной дистанции пути динамична.

Далее, необходимо определить длины кривых и прямых участков пути по полной длине обслуживаемых участков пути подразделения с целью корректной оценки требуемых трудозатрат на текущее содержание пути. В таблице 4.4 на примере 6 эксплуатационной дистанции Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры Московского метрополитена (Таганско-Краснопресненская линия, ПЧ-6) показана общая длина кривых и прямых участков пути подразделений.

В графе «Тип участка пути» таблицы 4.4 для обозначения типа участка и конструкции использованы следующие обозначения в формате 1/2/3/4:

- 1) Расположение участка пути: П – подземный участок пути, О – открытый участок пути, Н – надземный участок пути.
- 2) Тип скрепления: ТМ, КБ, КДП, ВГС, АРС – рельсовое скрепление типа «метро», КБ, КДП, ВГС и АРС-4 соответственно.
- 3) Тип подрельсового основания: Д, Б, К, П – деревянное, бетонное, композиционное и пластиковое соответственно.
- 4) Тип нижнего строения пути: Б и Щ – бетонное либо щебеночное нижнее строение пути соответственно.

Таблица 4.4

Типы участков и их общие длины в зависимости от плана пути на ПЧ-6

Подразделение ПЧ-6	Тип участка пути	План участков пути					
		Кривые R400	Кривые R500	Кривые R600	Кривые R800	Кривые R1000-2000	Прямые
		Длина, км					
ПД-61	П/ТМ/Д/Б	1,63	0	0,77	0,02	0	3,79
	О/КБ/Б/Щ	0,85	0	0,12	0	0,21	2,48
ПД-62	П/ТМ/Д/Б	0,82	0	1,52	0,5	0,2	5,28
	О/КБ/Б/Щ	0,55	0	0	0	0,63	2,38
ПД-63	П/ТМ/Д/Б	1,62	1,3	1,91	0,52	0,35	7,09
ПД-64	П/ТМ/Д/Б	2,63	2,93	0,3	0	0,6	7,02
ПД-65	П/ТМ/Д/Б	1,57	0,81	1,91	1,16	0,05	7,86
ПД-66	П/ТМ/Д/Б	0,93	2,23	0,94	0,28	0,84	6,7
ПД-67	П/ВГС/К/Б	1,91	1,77	0,83	0,42	2,14	5,34

Далее, определяется общее количество отступлений по ГРК на подразделении за год на основе удельного количества отступлений по ГРК на 1 км участка пути определенного плана и типа конструкции. Удельное количество отступлений на 1 км пути для разных типов конструкций приведено в главе 3 (таблицы 3.7, 3.12, 3.17, 3.21).

Таким образом, среднее количество отступлений по ГРК R на подразделении N будет определяться как

$$R^N = \sum_{i=1}^n l_i^N * r_i^N. \quad (4.5)$$

где N – номер подразделения, например, 71 (ПД-71);

l – длина участка определенного плана и типа конструкции пути, соответствующего i , на анализируемом подразделении N ;

r – удельное количество отступлений по ГРК на 1 км пути, соответствующее i .

В таблице 4.5 приведены показатели R^N для подразделений 6 дистанции пути Московского метрополитена.

Таблица 4.5

Удельное количество отступлений на 1 км пути в зависимости от плана линии и типа конструкции

Подразделение ПЧ-6	Тип участка пути	План участков пути						R^N , шт
		R400	R500	R600	R800	R1000- 2000	Прямые	
		Удельное количество отступлений по ГРК на 1 км пути, шт						
ПД-61	П/ТМ/Д/Б	51,62	49,29	56,38	34,14	16,78	25,75	465,46
	О/КБ/Б/Щ	133,02	-	-	-	155,08	38,23	
ПД-62	П/ТМ/Д/Б	51,62	49,29	56,38	34,14	16,78	25,75	545,34
	О/КБ/Б/Щ	133,02	-	-	-	155,08	38,23	
ПД-63	П/ТМ/Д/Б	51,62	49,29	56,38	34,14	16,78	25,75	461,41
ПД-64								488,09
ПД-65								471,78
ПД-66								406,90
ПД-67	П/ВГС/К/Б	3,8						51,68

Следующим шагом является определение требуемых трудовых затрат на подразделения для устранения отступлений по ГРК в зависимости от их удельного количества. Трудовые затраты подразделения в год T_N^1 в чел. – ч определяются как

$$T_N^1 = R^N * ЧЧ_1. \quad (4.6)$$

Требуемые трудовые затраты на ПЧ-6 представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6

Требуемые трудозатраты на устранение отступлений по ГРК на ПЧ-6

Подразделение ПЧ-6	Удельное количество отступлений в год, шт.	Требуемые трудозатраты, чел. - ч
ПД-61	465,46	339,79
ПД-62	545,34	398,10
ПД-63	461,41	336,83
ПД-64	488,09	356,31
ПД-65	471,78	344,40
ПД-66	406,90	297,04
ПД-67	51,68	37,73

Следующий шаг заключается в определении имеющихся трудовых возможностей T_N подразделений на основе данных об устранении отступлений и численности штата. Имеющиеся трудовые возможности подразделения определяются как

$$T_N = R_t * ЧЧ_1 = (t * s^{30} * r_{\text{факт}}^1) * ЧЧ_1, \quad (4.7)$$

где R_t – среднее количество отступлений, устраняемое на околотках в течение интервала наблюдения t (календарный год, 12 месяцев), шт.;

На ПЧ-6 имеющиеся трудовые возможности каждого подразделения T_N составляют 602 отступления, устраняемых за 1 календарный год.

Далее необходимо определить величину требуемых либо избыточных трудовых ресурсов подразделения, вычислив разницу между необходимыми и

требуемыми величинами трудозатрат T

$$T = -k * (T_N - T_N^1), \quad (4.8)$$

где $k=-1$ при $T_N < T_N^1$, в этом случае вычисляемое T – требуемые трудовые ресурсы, чел. – ч; $k=1$ при $T_N > T_N^1$, в этом случае T – избыточные трудовые ресурсы.

В случае ПЧ-6, значение величины T приведено в таблице 4.7.

Таблица 4.7

Разница в требуемых и имеющихся трудовых ресурсах подразделений на устранение отступлений по ГРК на ПЧ-6

Подразделение ПЧ-6	Требуемые трудозатраты, чел. - ч	Имеющиеся трудозатраты, чел. - ч	ΔT , чел. - ч
ПД-61	341,51	324	-17,51
ПД-62	400,12		-76,12
ПД-63	338,54		-14,54
ПД-64	358,11		-34,11
ПД-65	346,14		-22,14
ПД-66	298,54		25,46
ПД-67	37,92		286,08

Таким образом, имеющиеся трудовые ресурсы достаточны только для устранения отступлений по ГРК на ПД-66 и ПД-67. На остальных подразделениях наблюдается недостаток трудовых ресурсов.

Далее, чтобы перейти от величины трудозатрат (чел. – ч) к величине конкретного необходимого персонала $Ч_N$ необходимо вычислить значение соотношения

$$Ч_N = n_{м.п.} - \frac{T_N^1 * n_{м.п.}}{T_N}. \quad (4.9)$$

Величина $Ч_N$ для ПЧ-6 приведена в таблице 4.8.

Таблица 4.8

Трудовые ресурсы подразделений на ПЧ-6

Околоток на ПЧ-6	ΔT , чел. - ч	Ч_N , чел.	Избыточный персонал, чел.	Требуемый персонал, чел.
ПД-61	-17,51	-0,65	0	1
ПД-62	-76,12	-2,82	0	3
ПД-63	-14,54	-0,54	0	1
ПД-64	-34,11	-1,26	0	2
ПД-65	-22,14	-0,82	0	1
ПД-66	25,46	0,94	0	0
ПД-67	286,08	10,60	10	0

По таблице 4.8 получаем избыточный персонал на подразделении ПД-67 (дата ввода в эксплуатацию – ноябрь 2013 года, преимущественно конструкция пути ВГС5-65). На остальных, кроме ПД-66, наблюдается нехватка персонала.

Таким образом, стало возможным перераспределение персонала с подразделения с лучшим состоянием пути на подразделения, где требуются работники для улучшения состояния пути.

Однако, согласно инструкциям метрополитена и техпроцессам производства работ [72, 96], на подразделении должно быть определенное постоянное минимальное число монтеров пути – не менее 6 человек, с целью возможного оперативного устранения последствий аварий либо замены остродефектных элементов пути.

В случае ПЧ-6, ПД-67 может предоставить работников другим подразделениям общим числом в 6 человек (таблица 4.8).

4.3 Выводы к главе 4

1. Отсутствие капитальных ремонтных работ на линиях метрополитена может быть компенсировано рациональной организацией работ по текущему содержанию пути на наиболее неблагоприятных участках.

2. При распределении отступлений ГРК по однородным участкам, разделенным согласно расположению, плана линии, типу конструкции, пропущенному тоннажу, становится возможным определение наиболее неблагоприятных участков пути. При подробном анализе наиболее неблагоприятных однородных участков, а именно, при по-пикетном распределении на полигоне участка отступлений ГРК, становятся очевидными участки, на которых необходим адресный ремонт пути.

3. При должном проведении и организации работ по изложенной методике определения участков для проведения первоочередных ремонтных работ согласно действующим на метрополитене инструкциям, правилам и нормативно-технической документации очевидно лучшее обеспечение безопасности движения поездов, плавности хода, а также эффективное использование технических средств и трудовых ресурсов.

4. Корректное перераспределение персонала подразделений эксплуатационной дистанции с учетом фактического состояния пути и типа конструкции позволит снабдить трудовыми ресурсами подразделения, не справляющиеся с задачей полного устранения отступлений ГРК, тем самым, повысить надежность эксплуатируемых данными подразделениями участков пути.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа экспериментальных исследований, теоретического и натурного анализа работы и технического состояния конструкций железнодорожного пути в условиях эксплуатации Московского метрополитена, выявлено их неоднозначное поведение с точки зрения надежности при высокой интенсивности движения поездов. Неоднозначно ведут себя как старые конструкции пути, так и относительно новые, современные. Интенсивно изнашиваются либо приходят в негодность элементы рельсовых скреплений и подрельсовые опоры, становясь причинами появления отступлений ГРК. Установлено, что наличие отступления ГРК связано с техническим состоянием элементов железнодорожного пути.

2. Специфические условия эксплуатации пути метрополитена, а именно ограниченное время на текущее содержание и невозможность проведения капитального ремонта подтверждают необходимость определения показателей надежности конструкций железнодорожного пути с целью выбора наиболее безотказной и малообслуживаемой из них.

3. В результате выполненной в исследовании оптимизации методики по расчету показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути, применяемой на магистральных железных дорогах ОАО «РЖД» в составе концепции УРРАН, под применение на полигоне конструкций пути метрополитена, разработан научно-обоснованный подход к оценке состояния конструкций железнодорожного пути метрополитена по критерию надежности на основе данных о состоянии ГРК, полученных с помощью мобильных средств диагностики пути.

4. Анализ полученных показателей надежности конструкций железнодорожного пути метрополитена показал зависимость состояния ГРК от плана путей, а именно, чем меньше радиус кривой, на которой движение поездов происходит с основной установленной скоростью, тем более изношены элементы конструкции пути. Кроме того, полигоны однородных участков кривых радиусом

от 400 до 600 м на Таганско-Краснопресненской линии не могут быть полностью отремонтированы при имеющихся у эксплуатационных околотов трудовых и технических ресурсах. На перегонах метрополитена, введенных в эксплуатацию раньше, либо в интервале 1966-1975 годов, может наблюдаться аналогичная ситуация. Наличие данного факта является основанием для утверждения о возможном постепенном ухудшении состояния пути.

5. Совместный анализ показателей надежности и графических диаграмм ГРК на исследуемых участках показал сходимость полученных показателей и состояния ГРК. Чем хуже полученный показатель, тем ближе к максимально и минимально допустимым значениям размеры ГРК.

6. Сравнительный анализ конструкций пути по показателям надежности показал, что типовая конструкция пути, ожидаемо, показала худший результат. На полигоне данной конструкции, помимо отступлений II и III степени, наблюдались также отступления IV и V степени, при регистрации которых ограничивается скорость движения поездов, либо останавливается движение до устранения неисправности.

7. Конструкция верхнего строения пути типа LVT-M, уложенная на участке полигона Люблинско-Дмитровской линии, показала худший результат прогнозируемого увеличения потока отказов с увеличением пропущенного тоннажа в сравнении с конструкцией КДП-65. Текущие практические результаты эксплуатации данной конструкции также не однозначны. Данные факты ставят под сомнение применение конструкции LVT-M на вновь строящихся линиях метрополитена. Все серии конструкций LVT (-M, -HA и другие) нуждаются в дополнительных экспериментальных проверках и исследованиях работы в условиях интенсивной эксплуатации (проезд минимум 500 поездов метрополитена по полигону конструкции в сутки).

8. Отечественная конструкция железнодорожного пути типа ВГС5-65 показала лучший результат по показателям надежности в сравнении с остальными исследуемыми конструкциями. Стабильность размеров ГРК наблюдается также на проанализированных графических диаграммах.

9. В рамках исследования определена необходимость усиления железнодорожного пути на кривых участках и дальнейшей разработки либо модернизации конструкций пути с технической направленностью на должное сопротивление рельсов против сдвигов в перпендикулярной оси пути плоскости.

10. Разработан научно-обоснованный подход к определению участков железнодорожного пути метрополитена для проведения адресных (локальных) ремонтных работ. На его основе возможно определение и ранжирование участков пути, нуждающихся в первоочередном ремонте, в целях повышения уровня обеспечения безопасности движения поездов и компенсации отсутствия капитальных ремонтных работ.

11. Разработан научно-обоснованный подход к рациональному распределению контингента работников эксплуатационных дистанций пути, в зависимости от фактического состояния ГРК и типа конструкции на обслуживаемых участках.

12. Дальнейшие перспективы разработки темы диссертации могут быть направлены на исследование ГРК на участках конструкций пути типа LVT-M различных модификаций, их низких показателей надежности и разработке мероприятий по улучшению состояния пути.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кравченко Н. Д. Новые конструкции железнодорожного пути для метрополитенов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.06 / Кравченко Николай Дмитриевич. – М., 1998. – 400 с.
2. Кравченко Н. Д. Путь с лежневым железобетонным подрельсовым основанием // Метрострой. 1986. №5. С. 27-29.
3. Кравченко Н. Д. Путь с лежневым основанием // Путь и путевое хозяйство // 1991. №9. С. 18-20.
4. Кравченко Н. Д., Крук Ю. Е., Кученков К. А. и др. Путь с железобетонными лежнями, замоноличенными в путевой бетон // Метро. 1993. №1. С. 17-21.
5. Замуховский, А. В. Совершенствование технологии укладки и текущего содержания безбалластного пути метрополитена: дисс. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Замуховский Александр Владимирович. – Москва. – 2006. – 90 с.
6. Замуховский А. В., Гречаник А. В., Наумов Б. В. Виброгасящие скрепления для метрополитена / А. В. Замуховский, А. В. Гречаник, Б. В. Наумов // «Вестник Уральского государственного университета путей сообщения». – 2011. – № 4 (12). – 69 с.
7. Замуховский, А. В., Семенов, Е. В. Анализ удельного выхода рельсов в московском метрополитене / А. В. Замуховский, Е. В. Семенов // «Путь и путевое хозяйство». – 2020. – № 5. – С. 10-12.
8. Замуховский, А. В., Федин, В. М., Григорашвили, Ю. Е., Фимкин, А. И., Ронжина, Ю. В. Улучшение эксплуатационных свойств элементов верхнего строения пути метрополитена / А. В. Замуховский и др. // «Путь и путевое хозяйство». – 2018. – № 2. – С. 12-15.
9. Замуховский А. В., Гречаник А. В. Технология закрепления композитных шпал-коротышей в путевом бетоне. // Вестник МИИТа: Научно-технический журнал. – Вып. 13. – М.: МИИТ, 2005.— с. 44-52.

10. Клинов С. И., Максимов В. Г., Коновалов Е. А., Жуков В. А., Карпушкин В.А. Способ сооружения безбалластного железнодорожного пути / Авторское свидетельство SU 1395723 A1, 15.05.1988. Заявка № 4080554 от 16.05.1986.
11. Клинов С. И. Гордеев В. А., Кочкин Н. В., Склезнев В. В. Безбалластное железобетонное основание железнодорожного пути / Авторское свидетельство SU 1025771 A1, 30.06.1983. Заявка № 3418116 от 25.02.1982.
12. Клинов С. И. Железнодорожный путь безбалластного типа и способ его усталостных испытаний / Патент на изобретение RU 2020455 C1, 30.09.1994. Заявка № 4937685/28 от 24.04.1991.
13. Клинов С. И., Кузюбердин А. М., Замуховский А. В. Способ закрепления подрельсовых элементов в бетонном основании пути / Авторское свидетельство SU 1691441 A1, 15.11.1991. Заявка № 4403346 от 04.03.1988.
14. Наумов Б. В. Совершенствование способов борьбы с вибрацией, передаваемой от подвижного состава на тоннель метрополитена: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Наумов Борис Владимирович. – Санкт-Петербург. – 2005. – 125 с.
15. Наумов Б. В. Новые решения проблемы вибраций в метрополитенах / Б. В. Наумов // «Метро и тоннели». 2011. № 3. С. 28-31.
16. Курбацкий, Е. Н. Метод решения задач строительной механики и теории упругости, основанный на свойствах изображений Фурье обобщенных финитных функций: дис. ... д-ра техн. наук / Е. Н. Курбацкий. - М., 1995. - 205 с.
17. Курбацкий, Е. Н., Нгуен Ван Хунг Распространение продольной сейсмической волны при работе подземных тоннелей в водонасыщенных грунтах / Е. Н. Курбацкий, Нгуен Ван Хунг // «Перспективы развития строительного комплекса». – 2013. – №2. – С. 16.
18. Курбацкий Е. Н., Курнавин С. А. Оценка параметров колебаний грунтового массива вблизи тоннелей мелкого заложения и наземных железнодорожных трасс. – Тезисы доклада 1-ой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития ж.-д. транспорта»,

Москва, 18-21 апреля, 1994.

19. Карпущенко Н. И. Виброзащитные конструкции пути для транспортных тоннелей и метрополитенов / Н. И. Карпущенко и др. // Новосибирск: Наука, 2011. - 199 с.

20. Замышляев, А. М. Результаты внедрения проекта УРРАН / А. М. Замышляев // Мир транспорта. – 2013. – № 1. – С. 100.

21. Замышляев, А. М. Система управления рисками / А. М. Замышляев // Мир транспорта. – 2011. – № 5. – С. 24.

22. Розенберг, Е. Н. Система КАС АНТ: задачи, возможности, перспективы развития / Е. Н. Розенберг, И. Н. Розенберг, А. М. Замышляев, Г. Б. Прошин // Железнодорожный транспорт. – 2008. – № 9. – С. 6.

23. Розенберг, И. Н. Создание системы АС УРРАН / И. Н. Розенберг, А. М. Замышляев, С. В. Калинин // Железнодорожный транспорт. – 2012. – № 10. – С. 41.

24. Гапанович, В. А. Система адаптивного управления техническим содержанием инфраструктуры железнодорожного транспорта (проект УРРАН) / В. А. Гапанович, И. Б. Шубинский, Е. Н. Розенберг, А. М. Замышляев // Надежность. – 2015. – № 2. – С. 4.

25. Лиманов Ю. А. Метрополитены: учебник. / Ю. А. Лиманов. – Москва: Транспорт, 1971. – 360 с.

26. Жильцов В. Н. Устройство и содержание пути Московского метрополитена / В. Н. Жильцов, Е. Т. Мосин. – Москва: Трансжелдориздат МПС, 1960. – 299 с.

27. Волков В. П. Тоннели и метрополитены: учебник. / В. П. Волков, С. Н. Наумов, А. Н. Пирожкова, В. Г. Храпов // Москва: Транспорт, 1975. – 551 с.

28. Храпов В. Г. Тоннели и метрополитены: учебник. / В. Г. Храпов, Е. А. Демешко, С. Н. Наумов и др. – Москва: Транспорт, 1989. – 383 с.

29. Шахунянц Г. М. Железнодорожный путь: учебник. / Г. М. Шахунянц // М.: Транспорт, 1987. – 479 с.

30. Яковлева Т. Г., Карпущенко Н. И., Клинов С. И., Путря Н. Н.,

Смирнов М. П. Железнодорожный путь: учебник. / Т. Г. Яковлева // М.: Транспорт, – 1999. – 406 с.

31. Ашпиз Е. С., Гасанов А. И., Глюзберг Б. Э. Железнодорожный путь: учебник. / Е. С. Ашпиз // М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», – 2013. – 544 с.

32. Виноградов В. В., Никонов А. М., Яковлева Т. Г. и др. Расчеты и проектирование железнодорожного пути: учебное пособие для студентов вузов ж.-д. транспорта. / В. В. Виноградов, А. М. Никонов // М.: Маршрут, - 2003. – 486 с.

33. Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава: учебник. / М. Ф. Вериго // М.: Транспорт, 1986. – 559 с.

34. Правила технической эксплуатации метрополитенов Российской Федерации – Москва: Транспорт, 1994. – 108 с.

35. Приложение к постановлению Правительства Москвы от 28 апреля 2020 г. № 468-ПП «Об утверждении Правил технической эксплуатации метрополитена в городе Москве» «Правила технической эксплуатации метрополитена в городе Москве». Документ зарегистрирован № 17-08-115/20 от 29.04.2020 (Управление транспорта и дорожно-транспортной инфраструктуры).

36. Лондонский метрополитен. [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа:
https://ru.wikipedia.org/wiki/Лондонский_метрополитен (Дата обращения: 2020.03.16).

37. Постановление Пленума ЦК ВКП (б) "О московском городском хозяйстве и о развитии городского хозяйства СССР", 15 июня 1931 г. [Электронный ресурс] // 100(0) ключевых документов по российской и советской истории (1917-1991). – Режим доступа:
https://www.1000dokumente.de/index.html?c=dokument_ru&dokument=0008_gen&object=translation&l=ru (Дата обращения: 2020.03.16).

38. История московского метро. [Электронный ресурс] // LIVEJOURNAL. – Режим доступа:

<https://masterok.livejournal.com/1201933.html> (Дата обращения: 2019.01.16).

39. История Московского метрополитена. [Электронный ресурс] // NewReferat. – Режим доступа:

<http://www.newreferat.com/ref-6433-1.html> (Дата обращения: 2019.01.16).

40. Московский метрополитен. [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа:

https://ru.wikipedia.org/wiki/Московский_метрополитен (Дата обращения: 2019.03.16).

41. Погосян, Д. А. Современные конструкции пути метрополитенов / Д.А. Погосян // «Путь и путевое хозяйство». – 2018. – № 4. – 18 с.

42. Погосян, Д. А., Крикун, А. В. Путевое хозяйство Московского метрополитена / Д. А. Погосян, А. В. Крикун // «Путь и путевое хозяйство». – 2020. – № 5. – 20 с.

43. Московское центральное кольцо. [Электронный ресурс] // Московский метрополитен. – Режим доступа:

<https://mosmetro.ru/mcc/> (Дата обращения: 2020.03.17).

44. Московские центральные диаметры [Электронный ресурс] // Московский метрополитен. – Режим доступа:

<https://www.mos.ru/city/projects/diameter/> (Дата обращения: 2020.03.17).

45. Замуховский А. В. Перспективы полигона безбалластного пути / А. В. Замуховский // Мир транспорта. – 2013. – № 3. С. 168-172.

46. Ковальчук, О. А. Особенности динамических откликов панельных зданий повышенной этажности, подвергающихся воздействию вибраций, вызванных движением поездов метрополитена: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Ковальчук Олег Александрович. – Москва. – 2004. – 24 с.

47. Страхов, А. М. Методика учета воздействия внутритоннельного транспорта на напряженно-деформированное состояние конструкций транспортных тоннелей: автореферат дис. ... канд. техн. Наук: 05.23.11 / Страхов Алексей Михайлович. – Москва. – 2008. – 24 с.

48. Шуб, М. Б. Улучшение динамических характеристик системы "путь-

подвижной состав": автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Шуб Михаил Борисович. - Ростов-на-Дону. – 2000. – 25 с.

49. Костарев, С. А. Анализ вибраций, генерируемых линиями метрополитена, и разработка комплекса мероприятий по их снижению: дис. ... докт. техн. наук: 01.02.06 / Костарев Станислав Андрианович. – Москва. – 2004. - 270 с.

50. Титов, Е. Ю. Разработка методов оценки и способов снижения уровней вибраций сооружений вблизи метрополитенов и железнодорожных трасс: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Титов Евгений Юрьевич. - Москва. 2006. – 26 с.

51. Антонов, Н. А. Экспериментально-теоретическое исследование колебаний поверхности грунта при движении поездов метрополитена в тоннелях неглубокого заложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Антонов Никита Александрович. – Москва. – 2006. – 168 с.

52. Сизов, Д. К. Статика и динамика резинометаллического виброизолятора: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Сизов Дмитрий Константинович. – Москва. – 2008. - 25 с.

53. Алимов, С. Г. Оценка влияния транспортной вибрации на конструкции зданий-памятников архитектуры (на примере г. Владивостока): дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Алимов Сергей Григорьевич. - Владивосток. – 2006. – 155 с.

54. Грановский, А. Н. Разработка и исследование прокладок с повышенными виброзащитными свойствами для промежуточных рельсовых скреплений железнодорожного пути метрополитенов: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.06 / Грановский Анатолий Наумович. – Москва. – 1984. – 171 с.

55. Колотовичев, Ю. А. Задачи прогноза колебаний поверхности грунта при движении поездов метрополитена в тоннелях неглубокого заложения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17 / Колотовичев Юрий Александрович. – Москва. – 2010. – 216 с.

56. Сан, Л. Т. Исследование напряженно-деформированного состояния

подземных сооружений при динамических воздействиях: автореферат дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02 / Сан Лин Тун. – Москва. – 2011. – 24 с.

57. Акимов В. А Надежность технических систем и техногенный риск: учебное пособие. / Акимов В. А., Лапин В. Л., Попов В. М., Пучков В. А., Томаков В. И., Фалеев М. И. // Изд.: Финансовый издательский дом "Деловой экспресс". – Москва. – 2002. – 368 с.

58. Чебоксаров А. Н. Основы теории надежности и диагностика: курс лекций. / А. Н. Чебоксаров // Омск: СибАДИ. – 2012. – 77 с.

59. Кокушин Н. Н. Основы теории надежности: учебное пособие. / Н. Н. Кокушин, А. А. Тихонов, С. Г. Петров, В. Е. Головкин, И. В. Ключкин // Санкт-Петербург: ГОУВПО СПбГТУРП. – 2011. – 77 с.

60. Матвеевский В. Р. Надежность технических систем: учебное пособие. / В. Р. Матвеевский // Москва: МГИЭМ. – 2002. – 113 с.

61. Эрлих, Н. В., Папиловская, Л. И., Кондрашкин, М. В. Комплексная автоматизированная система учета, контроля, устранения отказов технических средств и анализа их надежности (КАС АНТ) / Н.В. Эрлих и др. // Вестник транспорта Поволжья. – 2008. – № 1 (13). – С. 74.

62. Эрлих, Н. В. Информационные технологии - основа построения системы управления ОАО "РЖД" / Н.В. Эрлих // Вестник транспорта Поволжья. – 2008. – № 2 (14). – С. 73.

63. Эрлих, Н. В. Корпоративная информатизация - основа оценки и формирования системы показателей в области качества организации производства / Н.В. Эрлих // Вестник транспорта Поволжья. – 2009. – № 2 (18). – С. 17.

64. Эрлих, Н. В. Особенности организационных структур управления железнодорожным транспортным производством на региональном уровне / Н.В. Эрлих // Вестник транспорта Поволжья. – 2009. – № 3 (19). – С. 19.

65. Официальный сайт компании АО «РЖДстрой» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:
<http://www.rzdstroy.ru/innovations/> (Дата обращения: 2020.04.16).

66. Официальный сайт группы компаний «АБВ» [Электронный ресурс]. –

Режим доступа:

<http://abv1991.ru/> (Дата обращения: 2019.01.12).

67. Официальный сайт компании ООО НПП «АпАТэК» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.apatech.ru/> (Дата обращения: 2020.04.16).

68. Официальный сайт компании АО «БетЭлТранс» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://www.beteltrans.ru/> (Дата обращения: 2020.07.08).

69. Официальный сайт компании АО «Фирма ТВЕМА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://tvema.ru/> (Дата обращения: 2020.07.09).

70. Инструкция по текущему содержанию пути и контактного рельса метрополитенов – Москва: ОАО «Типография МВД», 2005. – 160 с.

71. Инструкция по автоматизированной расшифровке и оценке отступлений от норм содержания рельсовой колеи и контактного рельса Московского метрополитена мобильными путеизмерительными средствами. УТВ. 18.10.2019 УД-27-100258 19.

72. Инструкция по обеспечению безопасности движения поездов при производстве путевых работ на метрополитенах – Москва: Транспорт, 1994. – 34 с.

73. Москва (вагон метро). [Электронный ресурс] // Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа:

[https://ru.wikipedia.org/wiki/Москва_\(вагон_метро\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Москва_(вагон_метро)) (Дата обращения: 2020.01.22).

74. СП 120.13330.2012 Метрополитены: свод правил. Актуализированная редакция СНиП 32-02-2003 // Москва: Министерство регионального развития Российской Федерации. – 2012. – 169 с.

75. Приказ от 05.11.19 № УД-07-1378/19 (по ГУП «Московский метрополитен») о выполнении работ по смене деревянных шпал, втопленных в путевой бетон, на линиях метрополитена. ГУП «Московский метрополитен», ООО «Возрождение Петербурга».

76. ГОСТ 22830-77 Шпалы деревянные для метрополитена. Технические условия. – М. – Государственный комитет стандартов совета министров СССР. – 1978. – 8 с.

77. Инструкция по текущему содержанию пути и контактного рельса Московского метрополитена. Разработано АО «ВНИИЖТ». Утв. Д. А. Дощатовым (ГУП «Московский метрополитен»). – М. – 2018. – 337 с.

78. Погосян, Д. А., Замуховский, А. В. Вибрации в метрополитене и виброзащитные конструкции пути / Д.А. Погосян, А.В. Замуховский // «Путь и путевое хозяйство». – 2020. – № 6. – 22 с.

79. Технологический регламент на производство работ по эластичному креплению рельсов стрелочного перевода при помощи материалов Sika Icosit, М. – 2014. – 18 с.

80. Пояснительная записка к Специальным техническим условиям на проектирование и строительство верхнего строения пути объекта «Сокольническая линия ст. «Юго-Западная» - ст. «Саларьево». 4 этап: «Реконструкция верхнего строения путей и перекрестного съезда в тупиках за станцией «Юго-Западная», М. – 2015. – 5 с.

81. Фишер С., Тематические исследования в железнодорожном строительстве: современные трамвайные пути [Электронный ресурс] // Университет Сечени Иштван. – 2016. – С. 47-56. – Режим доступа: http://www.sze.hu/~fischersz/Education/Case%20studies%20in%20railway%20construction/CSRC_Topic%2006_Modern%20tramway%20superstructures.pdf (Дата обращения: 2019.12.14).

82. Принципиальное техническое решение. Виброизоляция верхнего строения пути по системе «масса-пружина» // ООО «Динамические системы». – М. – 2017 г. – 44 с.

83. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – М. : Стандартиформ, 2016. – 28с.

84. Нормативно-техническая документация метрополитена НТД/М-2019 «Дефекты рельсов. Классификация, каталог и параметры дефектных и

остродефектных рельсов для метрополитена». Утв. 14.08.2019 УД-08-10350 19.

85. Концепция комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте (УРРАН) / Утв. ОАО «РЖД» 31.07.2010.

86. Анализ отказов объектов железнодорожной инфраструктуры и их последствий [Электронный ресурс] // cyberpedia.su. – Режим доступа: <https://cyberpedia.su/17x14012.html> (Дата обращения: 2019.03.11).

87. Методика расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 04.12.2017 № 2500/р.

88. Методика оценки рисков функционирования верхнего строения железнодорожного пути, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» от 12.01.2018 № 27/р.

89. ГОСТ 33886-2016 Железнодорожный путь. Номенклатура показателей надежности и функциональной безопасности. – М. : Стандартинформ, 2016. – 12 с.

90. Диагностика инфраструктуры метрополитенов и городского транспорта. Официальный сайт компании АО «Фирма ТВЕМА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://tvema.ru/708> (Дата обращения: 2019.02.13).

91. Диагностика метрополитенов и городского рельсового транспорта. Официальный сайт компании АО «Фирма ТВЕМА» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://tvema.ru/sites/default/files/diagnostika-metropolitenov-i-gor-transporta_ru.pdf (Дата обращения: 2019.02.18).

92. Погосян, Д. А., Замуховский, А. В. Оценка конструкций верхнего строения пути метрополитена по критериям надёжности / Д. А. Погосян, А. В. Замуховский // «Путь и путевое хозяйство». – 2020. – № 12. – 22 с.

93. Анализ центра диагностики и мониторинга Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» за июнь 2020 года / Центр

диагностики и мониторинга Дирекции инфраструктуры // ГУП «Московский метрополитен». – 06.2020 г.

94. Инструкция по сигнализации на метрополитенах Российской Федерации – Москва: ТА Инжиниринг, 2003. – 95 с.

95. Инструкция по движению поездов и маневровой работе на метрополитенах Российской Федерации – Москва: ТА Инжиниринг, 2003. – 128 с.

96. Инструкция о проходе (проезде) в тоннели, на наземные участки, парковые и деповские пути и обеспечении безопасности работающих – Москва: ТА Инжиниринг, 2015. – 50 с.

97. Smalo M., Diagnostics of Track Quality of Ballastless Track and Transition Areas in Vicinity of Portals of Tunnel Turecky Vrch. Civil and Environmental Engineering, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 2-12. doi: 10.1515/cee-2016-0001.

98. Sestakova J., Quality of Slab Track Construction – Track Alignment Design and Track Geometry. Civil and Environmental Engineering, 2014, vol. 11, no. 1, pp. 2 - 9. doi: 10.1515/cee-2015-0001.

99. Sestakova J., Mear M., Evaluation of Track Design and Track Geometry of the Track with Unconventional Structure of Railway Superstructure. Procedia Engineering, 2015, vol. 111, pp. 709 -716. doi: 10.1016/j.proeng.2015.07.136.

100. Liu L., Wang J., Lv R., Finite Element Analysis of Ballastless Track Rail-Floating Slab's Dynamic Characteristics. Applied Mechanics and Materials, 2011, vol. 44-47, pp. 2907-3911. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.44-47.3907.

101. Huang J., Su Q., Liu T., Wang W., Behavior and Control of the Ballastless Track-Subgrade Vibration Induced by High-Speed Trains Moving on the Subgrade Bed with Mud Pumping. Shock and Vibration, 2019, vol. 4, pp. 1-14. doi: 10.1155/2019/9838952.

102. Wang Y., Gong Q. Li M., The Calculation of the Supporting Stress of Track Plate in Ballastless High-speed Rail Structure. Applied Mechanics and Materials, 2011, v. 97-98, pp. 3-9. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.97-98.3.

103. Renpeng C., Xing Z., Zuozhou W., Hongguang J., Xuecheng B., Experimental study on dynamic load magnification factor for ballastless track-subgrade

of high-speed railway. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, vol. 5, pp. 306-311. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.04.004.

104. Yu G., Wanming Z., Long-Term Prediction Of Track Geometry Degradation In High-Speed Vehicle–Ballastless Track System Due To Differential Subgrade Settlement. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, vol. 113, pp. 1-11. doi: 10.1016/j.soildyn.2018.05.024.

105. Ribeiro S., Afonso P., Railway slab track systems: review and research potentials. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2020, vol. 12, pp. 1635-1653. doi: 10.1080/15732479.2020.1719167.

Приложение А

Ведомость проезда средства диагностики пути типа «линейное видео»

Отчет по ведомости № 9 ПЧ-6 (Таганско-Краснопресненская) от 26.05.2020г. по 64 околотку по 1,2 пути от ПК 017+00 до 082+50							
№ ко-да	Наименование кода			1 путь		2 путь	
				кол-во выявленных неисправностей, шт.	из них повто-ров, шт.	кол-во выявленных неисправностей, шт.	из них повто-ров, шт.
1	наличие повреждений поверхности катания головки рельсов;			-	-	-	-
2	отсутствие сплошного наката на поверхности рельса в зоне стыка;			-	-	-	-
3	разрушение путевого бетона;			-	-	-	-
4	отсутствие шурупов в путевых подкладках;			15	7	15	5
5	наличие недовернутых путевых шурупов;			87	18	86	6
6	отсутствие маятниковых штырей;			-	-	-	-
7	отсутствие пружинных клемм;			-	-	-	-
8	отсутствие клеммных болтов;			-	-	-	-
9	отсутствие путевых подкладок;			-	-	-	-
10	наличие трещин в путевых подкладках;			8	2	11	5
11	наличие дефектных шпал;			69	53	148	81
12	отсутствие парных противоугонов;			3	-	2	1
13	наличие неверно расположенных клиньев противоугонов;			-	-	-	-
14	наличие двух и более растянутых или слитых (нулевых) зазоров в температурных стыках;			2	2	-	-
15	наличие не закрепленной (перекошенной) клеммы;			-	-	-	-
16	наличие неправильно закрепленной (перекошенной) клеммы;			-	-	-	-
17	потеря целостности скрепления шпалы и бетона;			-	-	-	-
18	наличие сломанной прокладки под подкладку («фанерная карточка»)			1	-	8	1
19	неисправность рельсового соединителя;			-	-	-	-
20	излом путевой подкладки;			6	-	6	2
21	наличие трещины в пружинной клемме;			1	-	1	
22	не нормативное расстояние от конца кронштейна контактного рельса до подкладки ходового рельса			-	-	-	-
Всего, шт.:	480	Из них повторов, шт.:		186	196	82	284
							104

Приложение Б

Сводная ведомость формы ПУ-32 проезда вагона-путеизмерителя «Синергия 1» по Люблинско-Дмитровской линии Московского метрополитена

11.11.2019 12:39:25 2.0.148

Страница 1 из 6

Отступления 2, 3, 4, 5 степени

ПЧ 7, Линия: Люблинская, Все пути

Син 01

13.03.2018

ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл	ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл
Путь 01								Путь 01							
Люблинская								Люблинская							
75	1	0206+73	Укл	1	1,40	85	0	73	1	0137+37	Уск	4	-0,87	1	0
		0204+79	Укл	1	1,40	85	0			0135+22	Р	2	8	15	2
		0201+39	Укл	1	1,80	65	0			0134+92	Уск	4	-0,87	1	0
		0200+25	Укл	1	1,80	65	0			0134+59	Укл	1	1,80	65	0
		021км					0			0132+84	Укл	1	1,90	55	0
		0199+25	Укл	1	1,40	85	0			0132+14	Укл	1	1,90	55	0
		0198+8	Р	2	8	11	2			0131+39	Укл	1	1,90	55	0
		0197+10	Укл	1	1,40	85	0			014км					2
		0196+25	Укл	1	1,80	65	0	72	2	0126+3	Суж	2	1515	1	2
		0195+15	Укл	1	1,80	65	0			0124+39	Укл	1	1,60	75	0
		020км					2			0124+2	Уск	3	-0,66	1	0
73	2	0180+60	Укл	1	1,40	85	0			0122+42	Уск	3	-0,66	1	0
		0180+18	Уск	2	0,48	1	0			0122+4	Укл	1	1,60	75	0
		019км					0			0121+29	Укл	1	1,80	45	0
		0179+69	Р	2	8	14	2			0120+59	Укл	1	1,80	45	0
		0176+66	Р	2	8	17	2			0120+4	Укл	1	1,70	35	0
		0176+23	Р	2	8	13	2			013км					2
		0174+35	Р	2	9	9	2			0119+44	Укл	1	1,70	35	0
		0174+9	Уск	2	0,48	1	0			0119+25	Р	2	9	15	2
		0173+67	Укл	1	1,40	85	0			0116+39	Укл	1	1,60	75	0
		018км					8			0116+2	Уск	3	0,66	1	0
		0167+7	Укл	1	1,40	85	0			0114+13	Уск	3	0,66	1	0
		0166+64	Уск	2	-0,48	1	0			0113+75	Укл	1	1,60	75	0
		0164+8	Р	2	8	16	2			0113+73	Р	2	8	7	2
		0162+58	Р	2	8	13	2			012км					4
		0162+3	Уск	2	-0,48	1	0			0100+89	Р	2	8	15	2
		0161+61	Укл	1	1,40	85	0			011км					2
		017км					4	1		095+96	Укл	1	1,70	35	0
1		0158+11	Укл	1	1,20	85	0			095+21	Укл	1	1,70	35	0
		0157+69	Уск	3	0,6	1	0			010км					0
		0157+54	Уск	3	0,6	1	0			089+81	Укл	1	1,60	75	0
		0157+11	Укл	1	1,20	85	0			088+81	Укл	1	1,60	75	0
		016км					0			086+74	Укл	1	1,30	90	0
		0143+31	Укл	1	1,20	85	0			085+62	Укл	1	1,30	95	0
		0142+81	Уск	3	-0,6	1	0			084+67	Укл	1	1,80	65	0
		0141+71	Уск	3	-0,6	1	0			084+34	Уск	4	0,87	1	0
		0141+28	Укл	1	1,20	85	0			083+85	Р	2	8	8	2
		015км					0			082+44	Уск	4	0,87	1	0

Продолжение приложения Б

11.11.2019 12:39:25 2.0.148

Страница 2 из 6

Отступления 2, 3, 4, 5 степени

ПЧ 7, Линия: Люблинская, Все пути

Син 01

13.03.2018

ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл	ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл
Путь 01								Путь 01							
Люблинская								Люблинская							
72	1	082+12	Укл	1	1,80	65	0	71	1	034+57	Р	2	8	11	2
		09км					2			033+97	Р	2	8	14	2
		077+56	Укл	1	1,40	85	0			030+71	Уск	2	-0,48	1	0
		077+41	Р	2	8	14	2			030+29	Укл	1	1,40	85	0
		077+26	Р	2	8	6	2			04км				6	
		077+13	Уск	2	-0,48	1	0			027+64	Укл	1	1,40	85	0
		077+8	Уск	2	-0,48	1	0			027+35	Р	2	8	15	2
		076+61	Укл	1	1,30	90	0			021+78	Р	2	9	14	2
		075+16	Укл	1	1,50	80	0			021+16	Уск	2	-0,48	1	0
		074+76	Уск	2	0,48	1	0			020+74	Укл	1	1,40	85	0
		073+6	Уск	2	0,48	1	0			03км				4	
		072+63	Укл	1	1,40	85	0			013+97	П	2	8	14	4
		071+63	Укл	1	1,40	85	0			011+43	Укл	1	1,40	85	0
		071+21	Уск	2	-0,48	1	0			011+13	Р	2	8	13	2
		070+96	Уск	2	-0,48	1	0			011+1	Уск	2	0,48	1	0
		070+53	Укл	1	1,40	85	0			02км				6	
		070+11	Р	2	9	12	2			09+93	Р	2	8	13	2
		08км					6			08+81	Уск	2	0,48	1	0
71	2	066+63	Укл	1	1,70	35	0			08+38	Укл	1	1,40	85	0
		064+43	Укл	1	1,40	85	0			08+35	Р	2	8	20	2
		062+71	Уск	2	-0,48	1	0			06+6	П	2	8	13	4
		062+28	Укл	1	1,40	85	0			02+51	Укл	1	1,40	85	0
		061+94	Р	2	8	9	2	74	2	02+9	Уск	2	0,48	1	0
		07км					2			00+24	Уск	2	0,48	1	0
		056+23	Укл	1	1,40	85	0			0+20	Укл	1	1,40	85	0
		055+81	Уск	4	0,73	1	0			01км				0	
		053+88	Р	2	8	18	2			01км				8	
		06км					2	74	2	1+71	Р	2	9	9	2
		049+16	Уск	4	0,73	1	0			2+10	Укл	1	1,40	85	0
		048+74	Укл	1	1,40	85	0			2+52	Уск	4	-0,73	1	0
		047+43	П	2	8	3	10			7+70	Уск	4	-0,73	1	0
		046+9	Укл	1	1,90	55	0			8+13	Укл	1	1,40	85	0
		045+24	Укл	1	1,90	55	0			1км				2	
		042+89	Р	2	8	13	2			11+42	Укл	1	1,40	85	0
		05км					12			11+85	Уск	2	-0,48	1	0
1		035+78	Укл	1	1,40	85	0			12+80	Уск	2	-0,48	1	0
		035+35	Уск	2	-0,48	1	0			13+28	Укл	1	1,40	85	0
		034+73	Р	2	8	8	2			16+93	Укл	1	1,40	85	0

Продолжение приложения Б

11.11.2019 12:39:25 2.0.148

Страница 3 из 6

Отступления 2, 3, 4, 5 степени

ПЧ 7, Линия: Люблинская, Все пути

Син 01

13.03.2018

ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл	ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл
Путь 01								Путь 01							
74	2	17+36	Уск	4	0,73	1	0	76	1	11км					0
		2км					0	Всего по пути 01 Люблинская - 158шт / 86баллов							
		21+74	Уск	4	0,73	1	0				Суж - 1шт / 26баллов				
		22+17	Укл	1	1,40	85	0				П - 4шт / 28баллов				
		26+11	Укл	1	1,40	85	0				Р - 28шт / 56баллов				
		26+53	Уск	2	0,48	1	0				Укл - 77шт / 0баллов				
		26+53	Уск	2	0,48	1	0				Уск - 48шт / 0баллов				
1		29+11	Уск	2	0,48	1	0	Путь 02							
		29+45	Р	2	9	13	2	75	1	0206+77	Укл	1	1,40	85	0
		29+54	Укл	1	1,40	85	0			0204+73	Укл	1	1,40	85	0
		3км					2			0201+38	Укл	1	1,80	65	0
2		3км					0			0200+23	Укл	1	1,80	65	0
1		34+79	Укл	1	1,40	85	0			021км					0
		35+21	Уск	2	0,48	1	0			0199+23	Укл	1	1,40	85	0
		36+36	Уск	2	0,48	1	0			0197+10	Укл	1	1,40	85	0
		36+78	Укл	1	1,40	85	0			0195+95	Укл	1	1,40	85	0
		4км					0			0194+90	Укл	1	1,40	85	0
		42+19	Укл	1	1,40	85	0			020км					0
		43+90	Укл	1	1,40	85	0	73	2	0182+52	Суж	2	1515	1	2
		5км					0			0180+71	Укл	1	1,40	85	0
76	2	61+44	Укл	1	1,20	85	0			0180+28	Уск	2	-0,48	1	0
		61+86	Уск	3	-0,6	1	0			019км					2
		64+71	Уск	3	-0,6	1	0			0179+33	Р	2	8	14	2
		65+27	Укл	1	1,20	85	0			0178+97	Р	2к3	10	14	2
		7км					0			0177+12	Р	2	8	13	2
		73+88	Укл	1	1,30	45	0			0176+24	Р	2	8	11	2
		74+58	Укл	1	1,30	45	0			0174+3	Р	2	9	13	2
		79+49	П	2	8	3	10			0174+1	Уск	2	-0,48	1	0
		8км					10			0173+58	Укл	1	1,40	85	0
1		94+98	Укл	1	1,20	85	0			018км					10
		95+40	Уск	3	-0,6	1	0			0167+3	Укл	1	1,40	85	0
		97+45	Уск	3	-0,6	1	0			0166+61	Уск	2	0,48	1	0
		97+88	Укл	1	1,20	85	0			0163+101	Р	2	8	18	2
		99+28	Укл	1	1,40	85	0			0162+8	Уск	2	0,48	1	0
		99+70	Уск	4	0,73	1	0			0161+65	Укл	1	1,40	85	0
		10км					0			017км					2
		105+61	Уск	4	0,73	1	0	1		0159+71	Р	2	8	9	2
		106+4	Укл	1	1,40	85	0			0158+30	Укл	1	1,20	85	0
										0157+87	Уск	3	-0,6	1	0
										0157+71	Уск	3	-0,6	1	0

Продолжение приложения Б

11.11.2019 12:39:25 2.0.148

Страница 4 из 6

Отступления 2, 3, 4, 5 степени

ПЧ 7, Линия: Люблинская, Все пути

Син 01

13.03.2018

ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл	ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл
Путь 02								Путь 02							
Люблинская								Люблинская							
73	1	0157+29	Укл	1	1,20	85	0	72	2	0101+26	Р	2	8	14	2
		0156+77	Р	2	8	13	2			011км					8
		016км					4	1		094+26	Укл	1	1,70	35	0
		0143+28	Укл	1	1,40	85	0			093+51	Укл	1	1,70	35	0
		0142+82	Уск	4	0,73	1	0			091+19	П	2	8	5	10
		0141+59	Укл	1	1,40	85	0			090+46	Укл	1	1,60	75	0
		015км					0			010км					10
		0139+90	Р	2	8	20	2			089+87	Р	2	8	13	2
		0137+64	Укл	1	1,80	65	0			089+47	Укл	1	1,60	75	0
		0137+32	Уск	4	0,87	1	0			086+72	Укл	1	1,50	65	0
		0134+92	Уск	4	0,87	1	0			085+63	Укл	1	1,50	65	0
		0134+60	Укл	1	1,80	65	0			084+78	Укл	1	1,80	65	0
		014км					2			084+45	Уск	4	-0,87	1	0
72	2	0129+75	Суж	2	1515	1	2			083+29	Р	2	8	11	2
		0124+55	Укл	1	1,60	75	0			082+48	Уск	4	-0,87	1	0
		0124+18	Уск	3	0,66	1	0			082+15	Укл	1	1,80	65	0
		0123+90	Р	2	8	16	2			09км					4
		0122+59	Уск	3	0,66	1	0			078+49	Р	2	8	10	2
		0122+21	Укл	1	1,60	75	0			077+55	Укл	1	1,40	85	0
		0121+31	Укл	1	1,80	45	0			076+58	Укл	1	1,40	85	0
		0120+57	Укл	1	1,80	45	0			075+62	Р	2	8	11	2
		013км					4			075+23	Укл	1	1,40	85	0
		0119+24	Суж	2	1515	1	2			072+67	Укл	1	1,40	85	0
		0117+82	Укл	1	1,70	35	0			072+31	Р	2	8	9	2
		0117+22	Укл	1	1,70	35	0			071+2	Укл	1	1,40	85	0
		0116+47	Укл	1	1,60	75	0			08км					6
		0116+9	Уск	3	-0,66	1	0			069+83	Укл	1	1,40	85	0
		0115+67	Р	2	9	13	2	71	2	064+38	Укл	1	1,40	85	0
		0114+11	Уск	3	-0,66	1	0			062+30	Укл	1	1,40	85	0
		0113+74	Укл	1	1,60	75	0			07км					0
		012км					4	72	1	07км					0
		0107+89	Суж	2	1515	1	2	71	2	056+41	Укл	1	1,40	85	0
		0107+27	Укл	1	1,90	55	0			06км					0
		0106+55	Укл	1	1,90	55	0			048+56	Укл	1	1,40	85	0
		0105+93	Р	2	8	13	2			046+6	Укл	1	1,90	55	0
		0105+84	Укл	1	1,90	55	0			045+20	Укл	1	1,90	55	0
		0105+14	Укл	1	1,90	55	0			05км					0
		0102+78	Р	2	8	16	2			036+78	Р	2	9	15	2

Продолжение приложения Б

11.11.2019 12:39:25 2.0.148

Страница 5 из 6

Отступления 2, 3, 4, 5 степени

ПЧ 7, Линия: Люблинская, Все пути

Син 01

13.03.2018

ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл	ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл
Путь 02								Путь 02							
Люблинская								Люблинская							
71	1	036+36	Р	2	9	7	2	74	2	16+84	Укл	1	1,40	85	0
		035+67	Укл	1	1,40	85	0			17+27	Уск	4	-0,73	1	0
		035+24	Уск	2	0,48	1	0			2км					0
		034+68	П	2	8	5	10			21+85	Уск	4	-0,73	1	0
		033+28	Р	2	8	10	2			22+27	Укл	1	1,40	85	0
		030+37	Укл	1	1,40	85	0			26+3	Укл	1	1,40	85	0
		04км					14			26+45	Уск	2	-0,48	1	0
	2	04км					2	1		29+15	Уск	2	-0,48	1	0
	1	028+64	Р	2	8	8	2			29+58	Укл	1	1,40	85	0
		028+4	Р	2	8	9	2			3км					0
		027+50	Укл	1	1,40	85	0	2		3км					0
		027+8	Уск	2	0,48	1	0	1		34+71	Укл	1	1,40	85	0
		026+52	Р	2	8	12	2			35+14	Уск	2	-0,48	1	0
		023+125	Р	2	8	11	2			36+39	Уск	2	-0,48	1	0
		021+24	Уск	2	0,48	1	0			36+82	Укл	1	1,40	85	0
		020+82	Укл	1	1,40	85	0			39+84	Р	2	8	8	2
		03км					8			4км					2
		011+57	Укл	1	1,40	85	0			42+37	Укл	1	1,40	85	0
		011+14	Уск	2	-0,48	1	0			42+79	Уск	2	0,48	1	0
		02км					0			43+54	Уск	2	0,48	1	0
		08+37	Укл	1	1,40	85	0			43+96	Укл	1	1,40	85	0
		07+62	Р	2	9	11	2			5км					0
		07+2	Р	2	8	11	2	76	2	61+45	Укл	1	1,20	85	0
74	2	02+53	Укл	1	1,40	85	0			61+88	Уск	3	0,6	1	0
		02+10	Уск	2	-0,48	1	0			64+78	Уск	3	0,6	1	0
		00+10	Уск	2	-0,48	1	0			65+20	Укл	1	1,20	85	0
		0+33	Укл	1	1,40	85	0			7км					0
71	1	01км					4			74+30	Укл	1	1,30	45	0
74	2	01км					0			74+100	Укл	1	1,30	45	0
		2+28	Укл	1	1,40	85	0			78+74	Р	2	8	14	2
		2+71	Уск	4	0,73	1	0			8км					2
		7+61	Уск	4	0,73	1	0	1		94+97	Укл	1	1,20	85	0
		8+3	Укл	1	1,40	85	0			95+40	Уск	3	0,6	1	0
		1км					0			97+37	Уск	3	0,6	1	0
		11+33	Укл	1	1,40	85	0			97+79	Укл	1	1,20	85	0
		11+76	Уск	2	0,48	1	0			97+82	Р	2	9	11	2
		12+72	Уск	2	0,48	1	0			98+89	Укл	1	1,40	85	0
		13+14	Укл	1	1,40	85	0			99+32	Уск	4	-0,73	1	0

11.11.2019 12:39:25 2.0.148

Страница 6 из 6

Отступления 2, 3, 4, 5 степени

ПЧ 7, Линия: Люблинская, Все пути

Син 01

13.03.2018

ПД	ПДБ	коорд.	Отступление	ст	Откл	Длина, м	Балл
Путь 02		Люблинская					
76	1	10км					2
		105+80	Уск	4	-0,73	1	0
		106+22	Укл	1	1,40	85	0
		106+66	Р	2	8	8	2
		108+63	Р	2	8	12	2
		11км					4
Всего по пути 02 Люблинская - 156шт / 946баллов							
Суж - 4шт / 86баллов							
П - 2шт / 20баллов							
Р - 33шт / 66баллов							
Укл - 78шт / 0баллов							
Уск - 39шт / 0баллов							

Итого по ПЧ: 314шт / 180баллов

В том числе:

Суж - 5шт / 10баллов
П - 6шт / 48баллов
Р - 61шт / 122баллов
Укл - 155шт / 0баллов
Уск - 87шт / 0баллов

Приложение В

Графические диаграммы параметров геометрии рельсовой колес

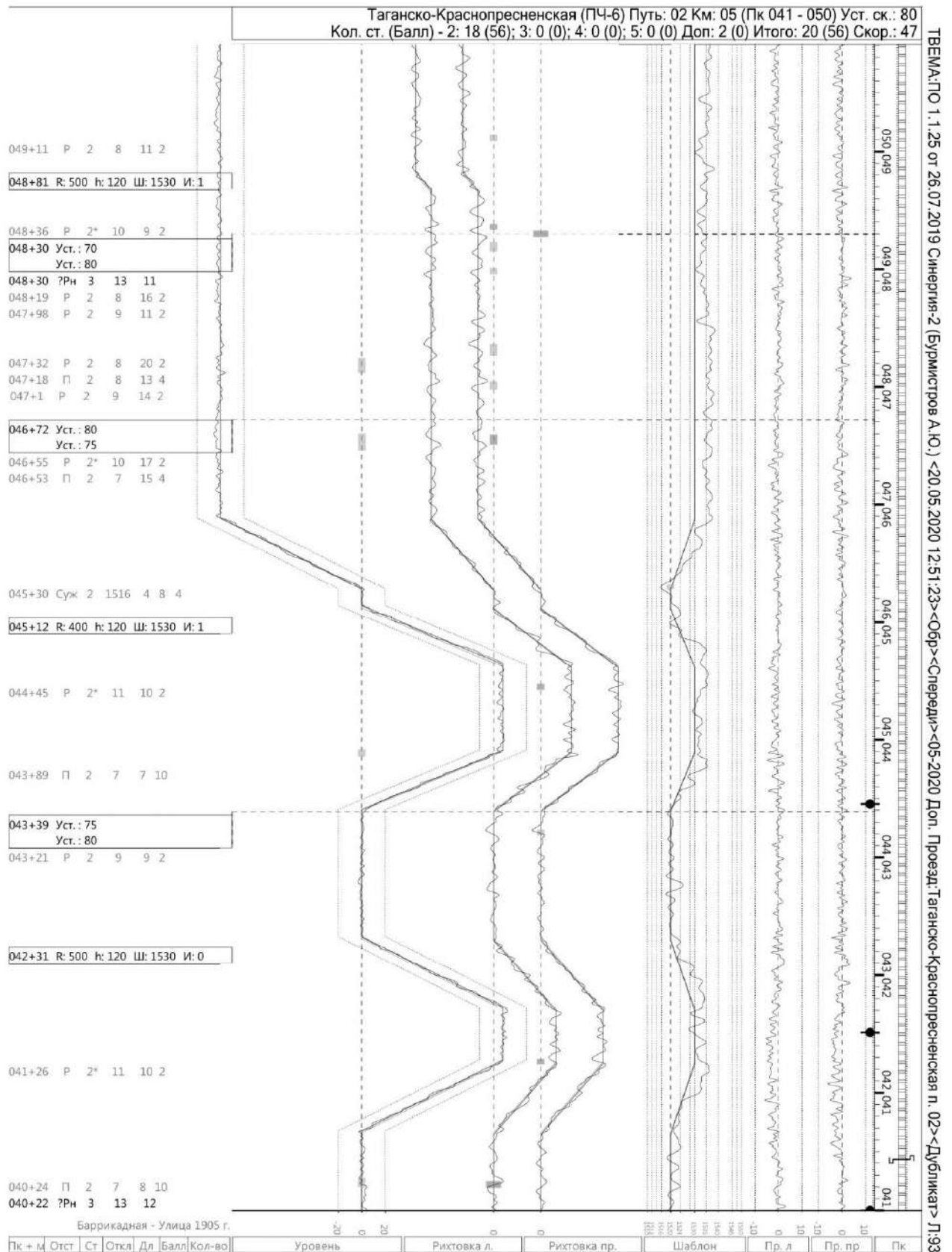


Рисунок В1 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-6, 2 путь, 5 км.

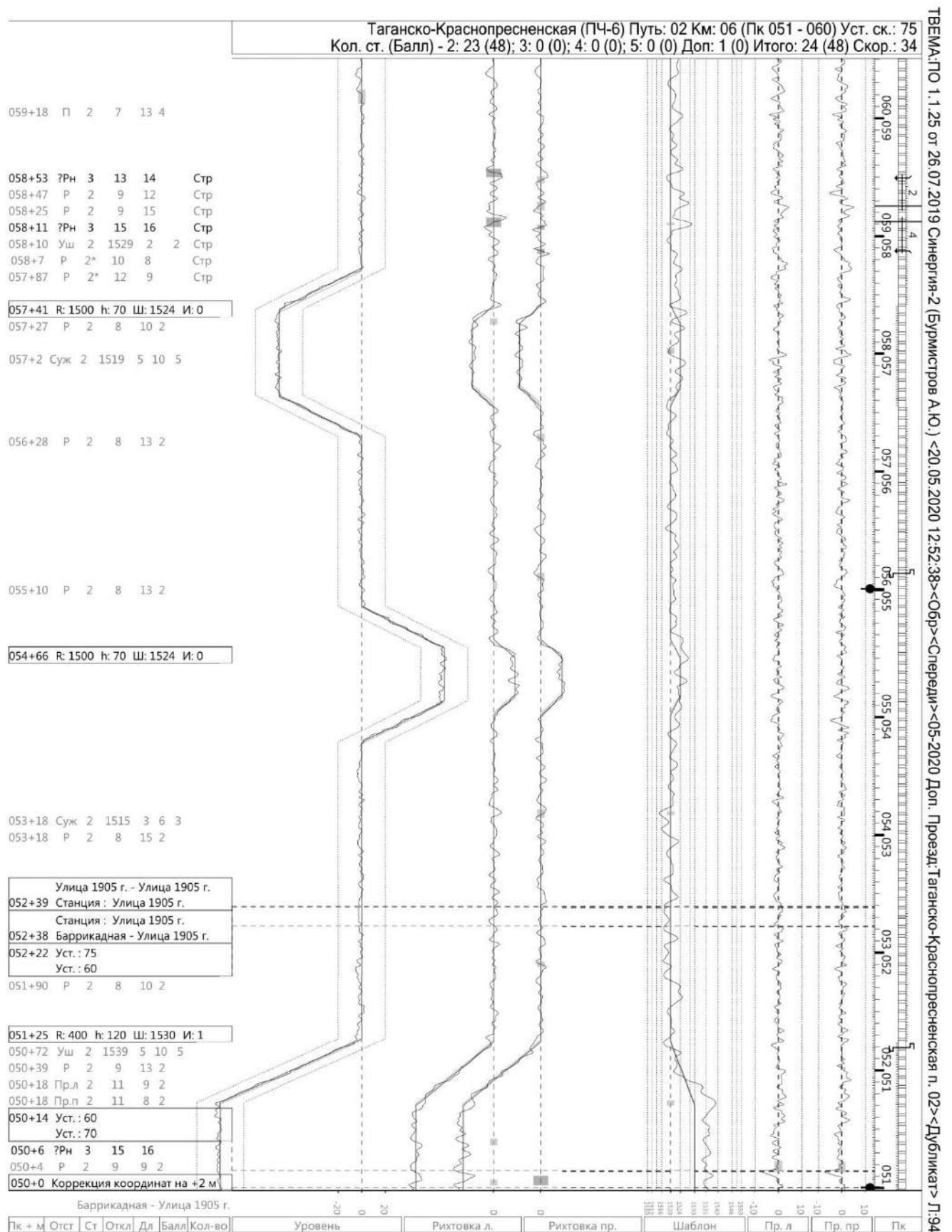


Рисунок В2 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-6, 2 путь, 6 км.

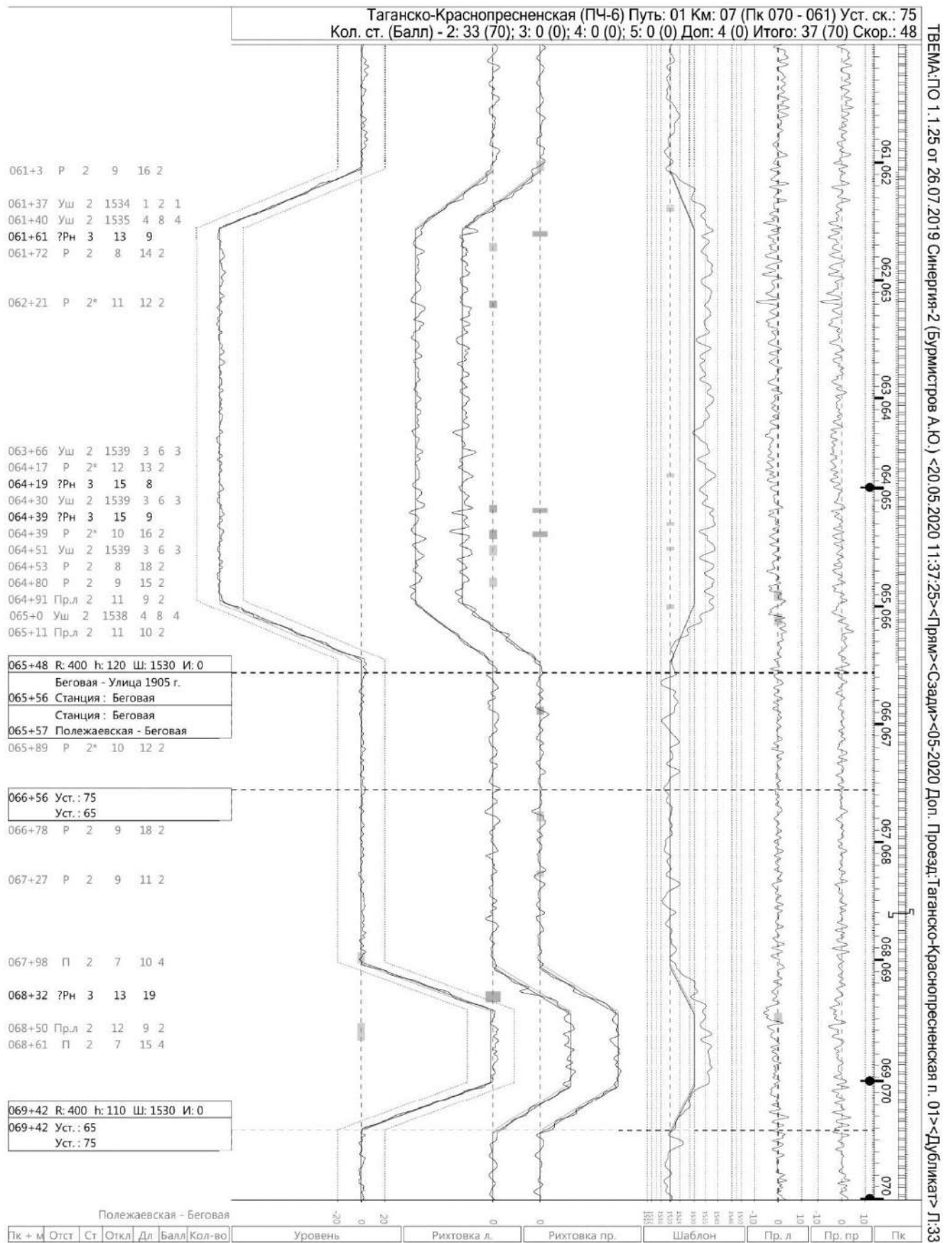


Рисунок ВЗ - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-6, 1 путь, 7 км.

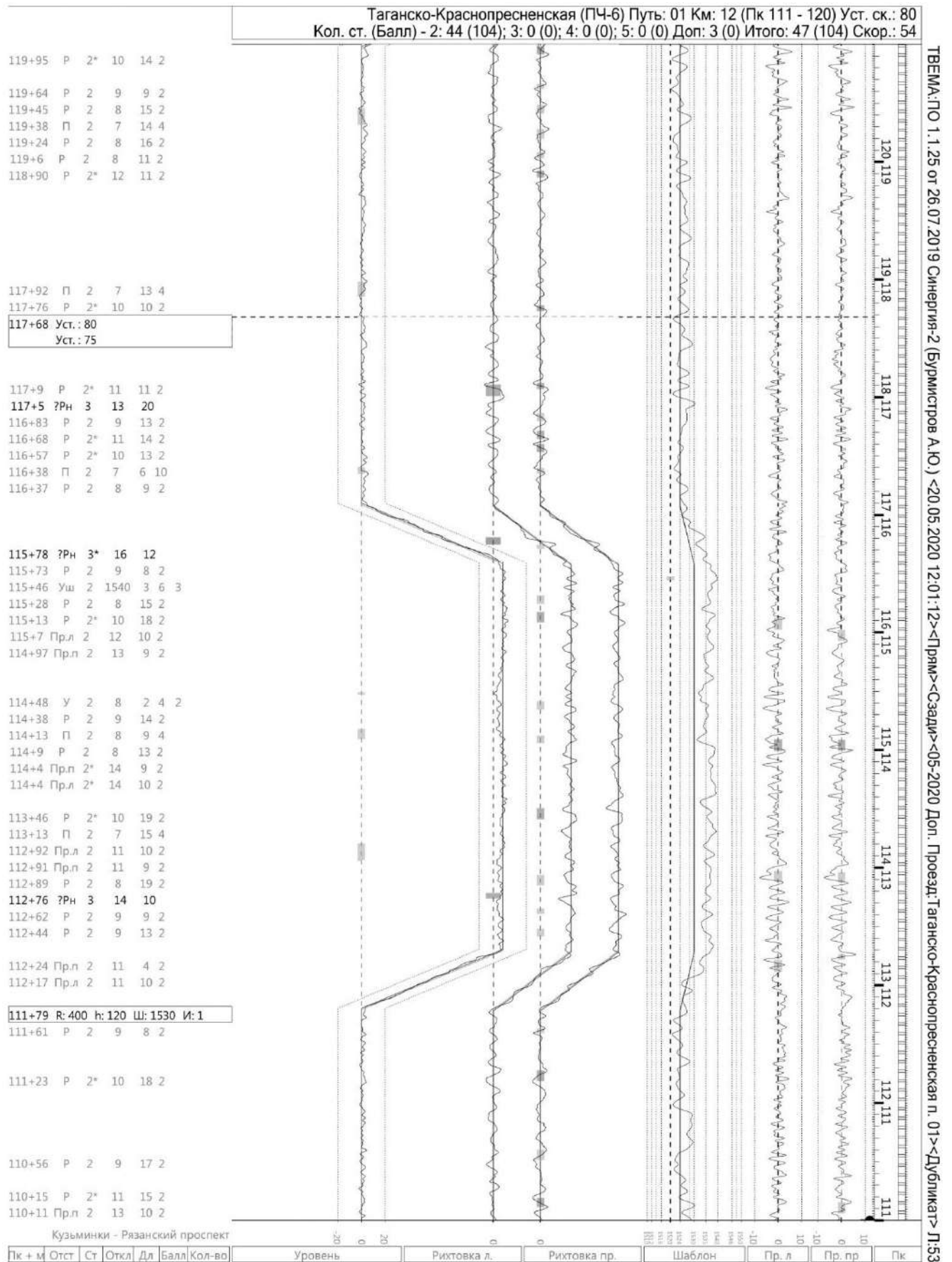


Рисунок В4 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-6, 1 путь, 12 км.

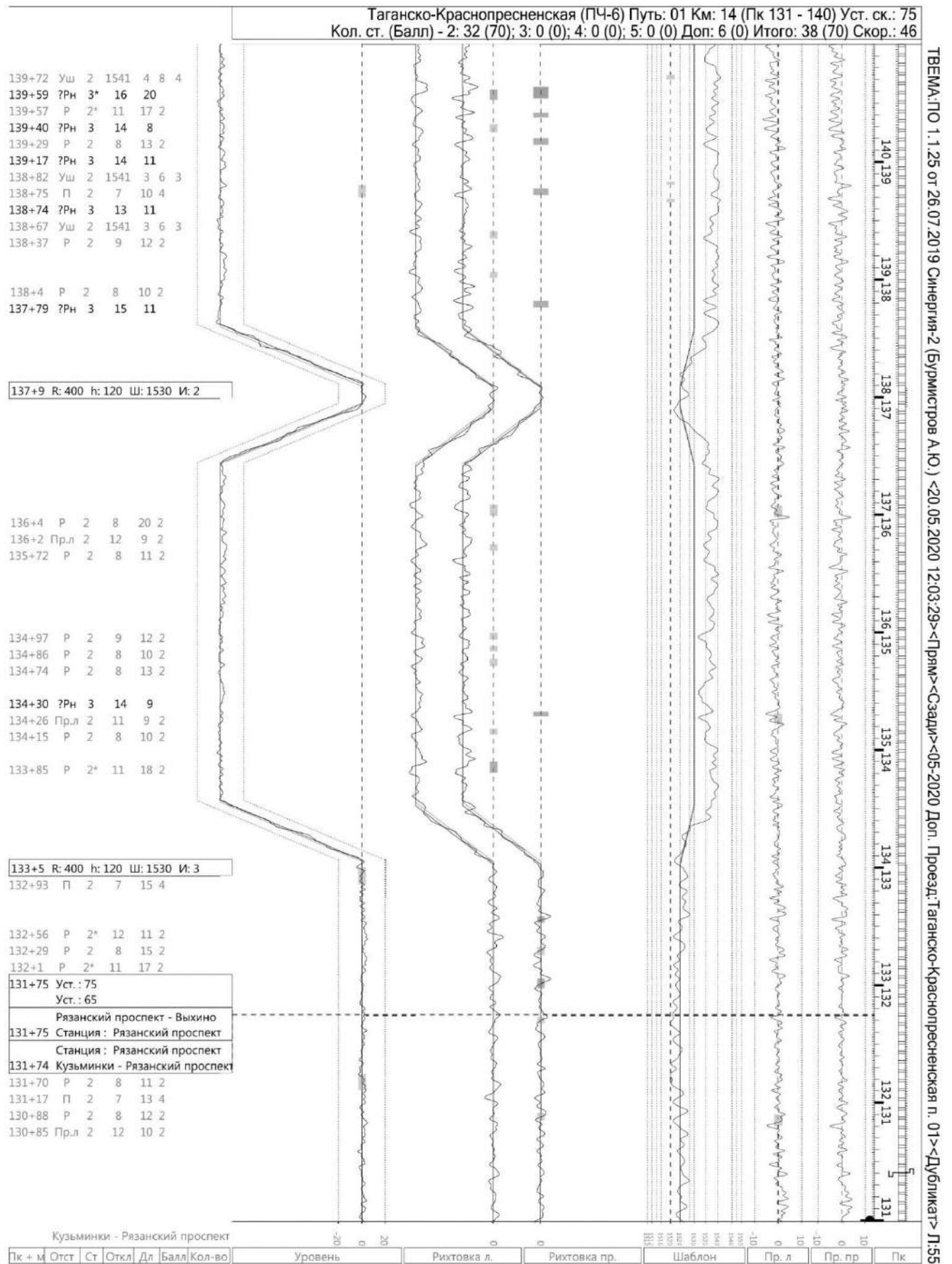


Рисунок В5 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-6, 1 путь, 14 км.

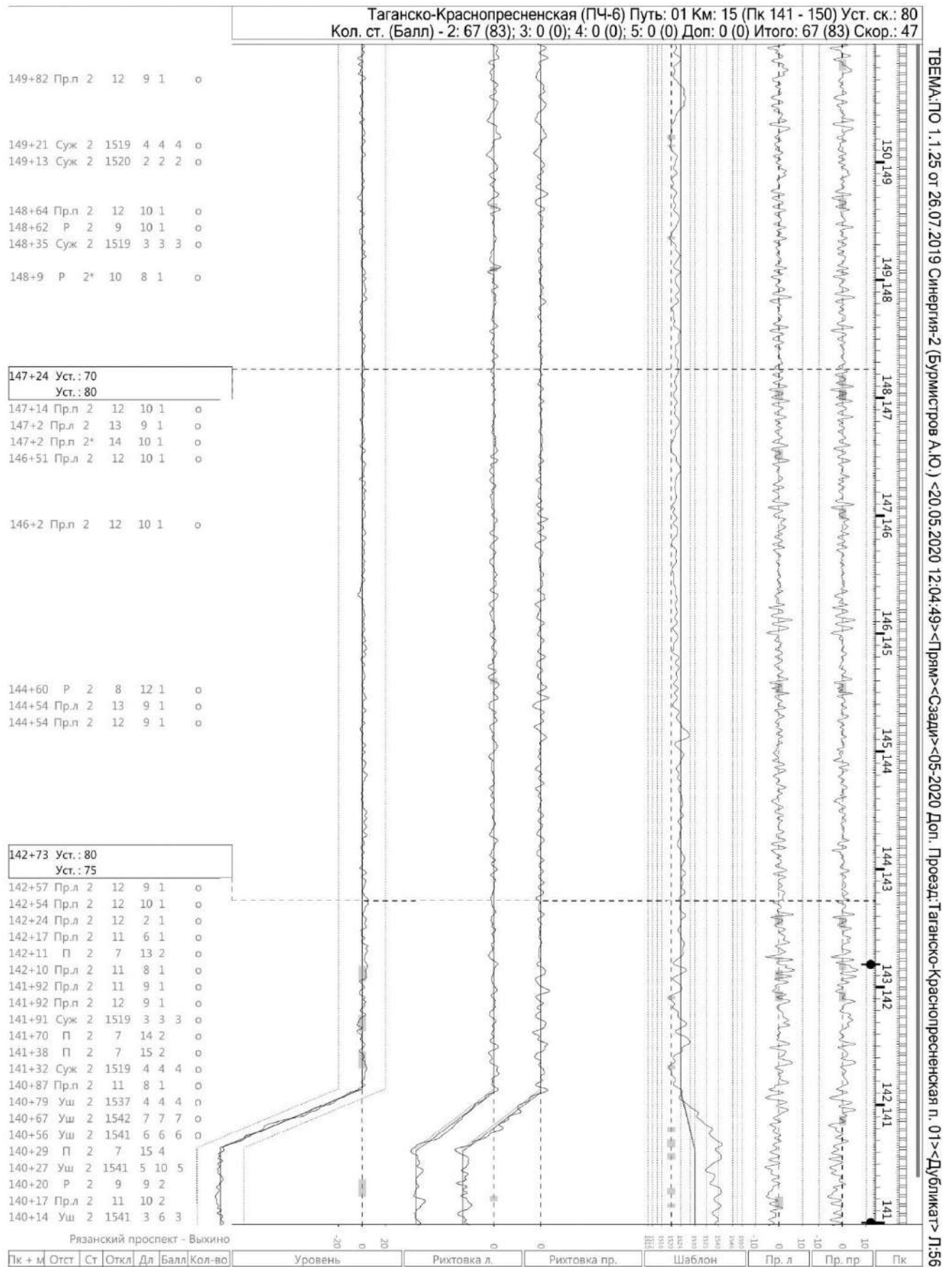


Рисунок В6 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-6, 1 путь, 15 км.

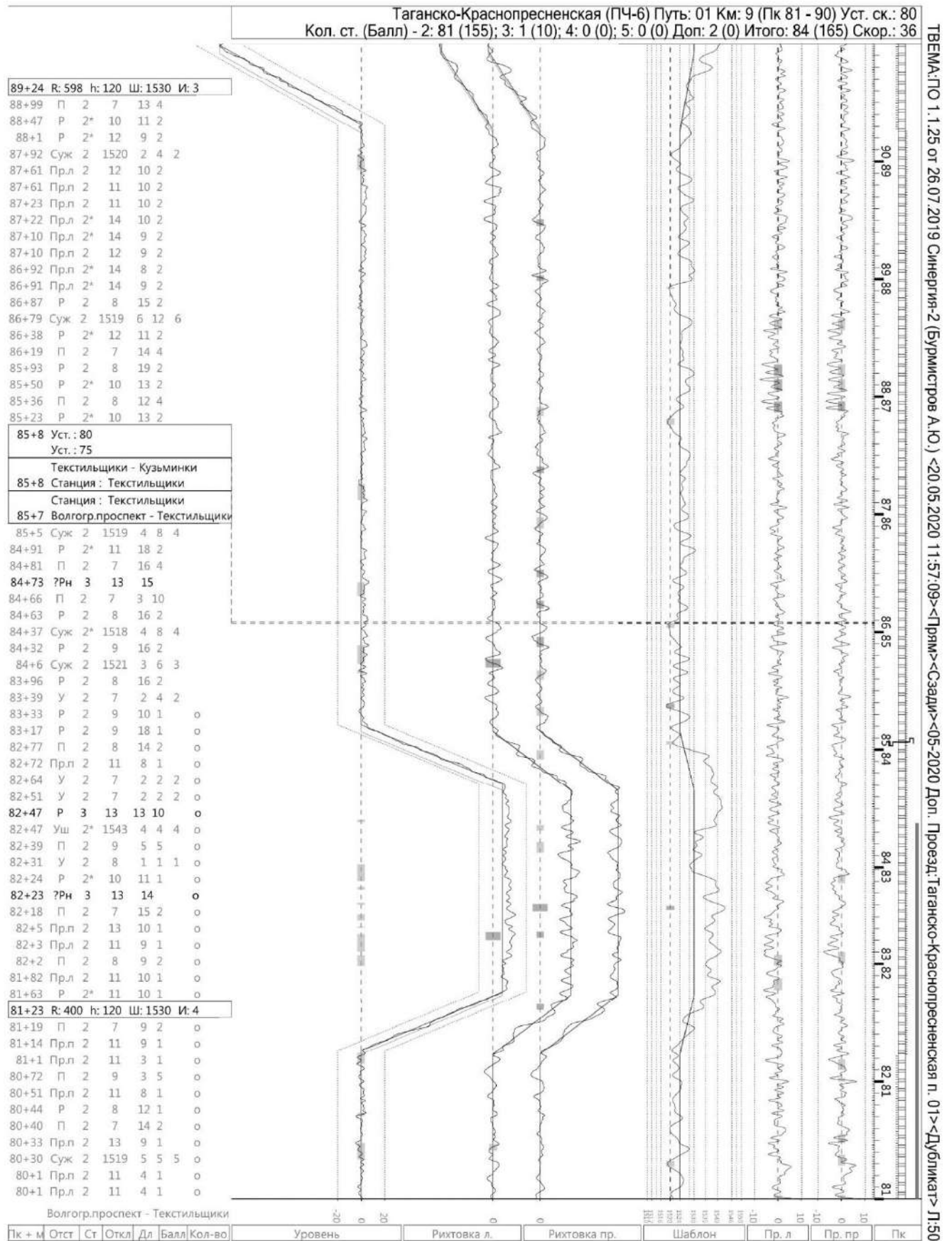


Рисунок В7 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-6, 1 путь, 9 км.

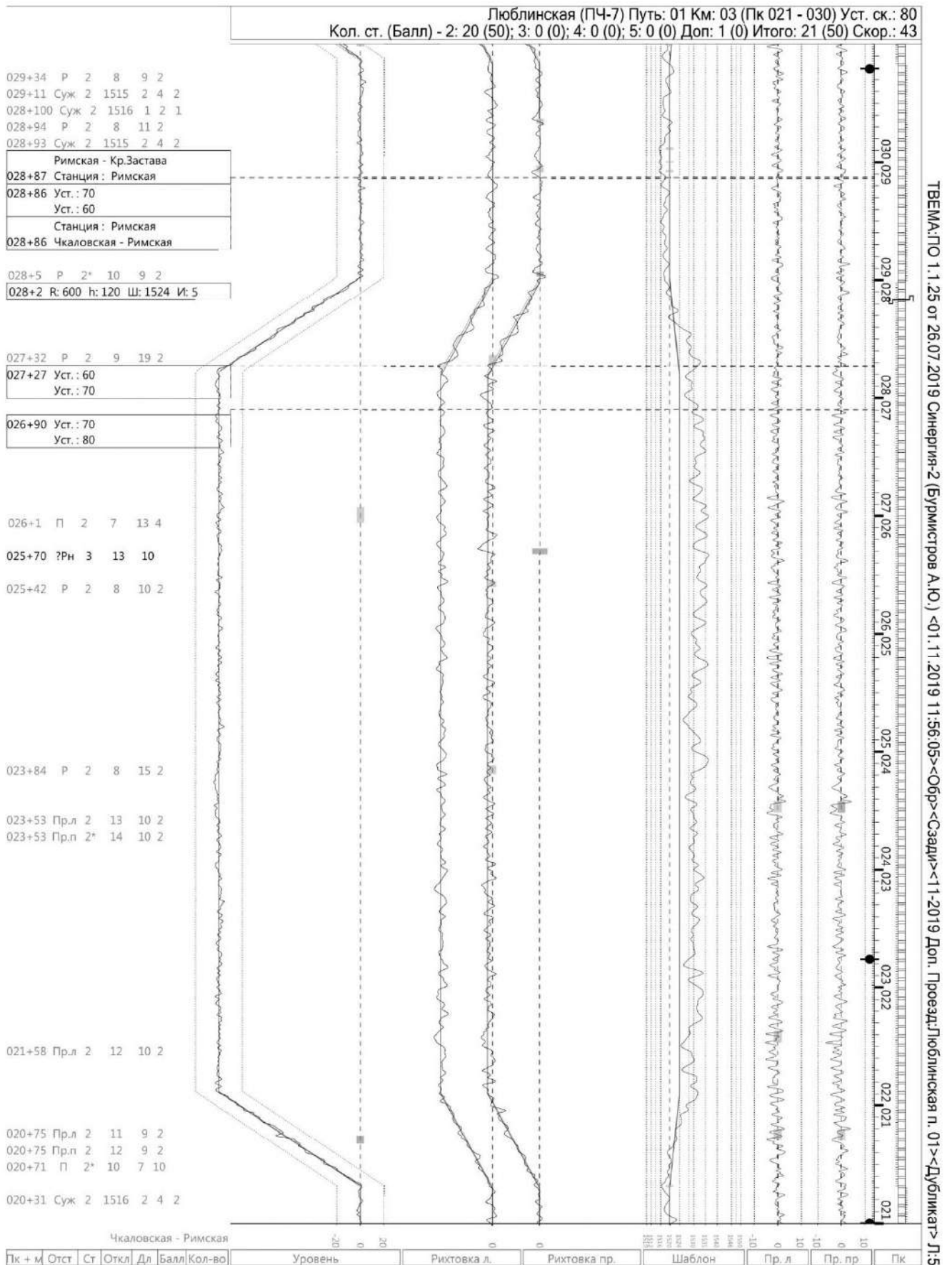


Рисунок В8 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 3 км.

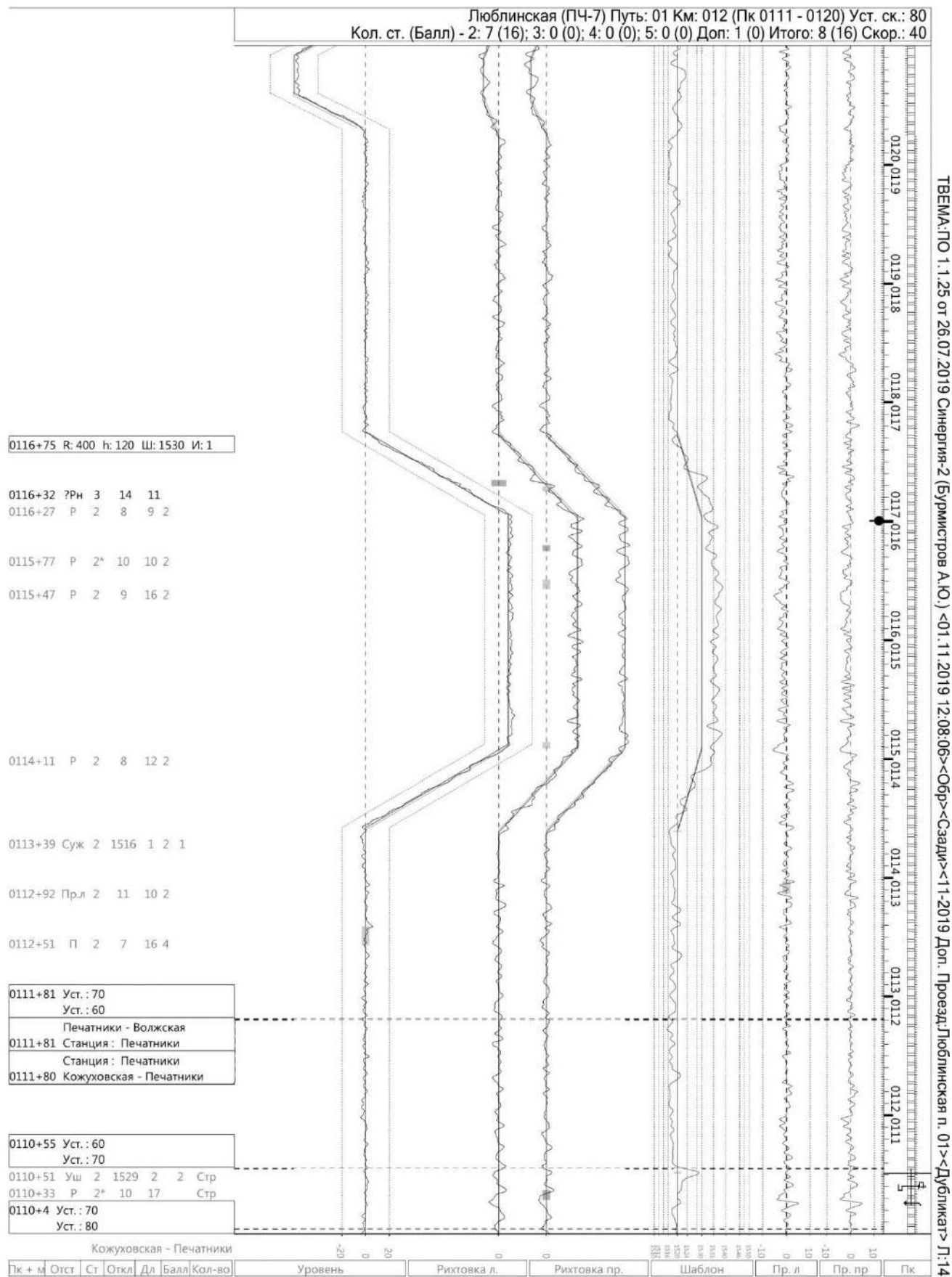


Рисунок В9 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 12 км.

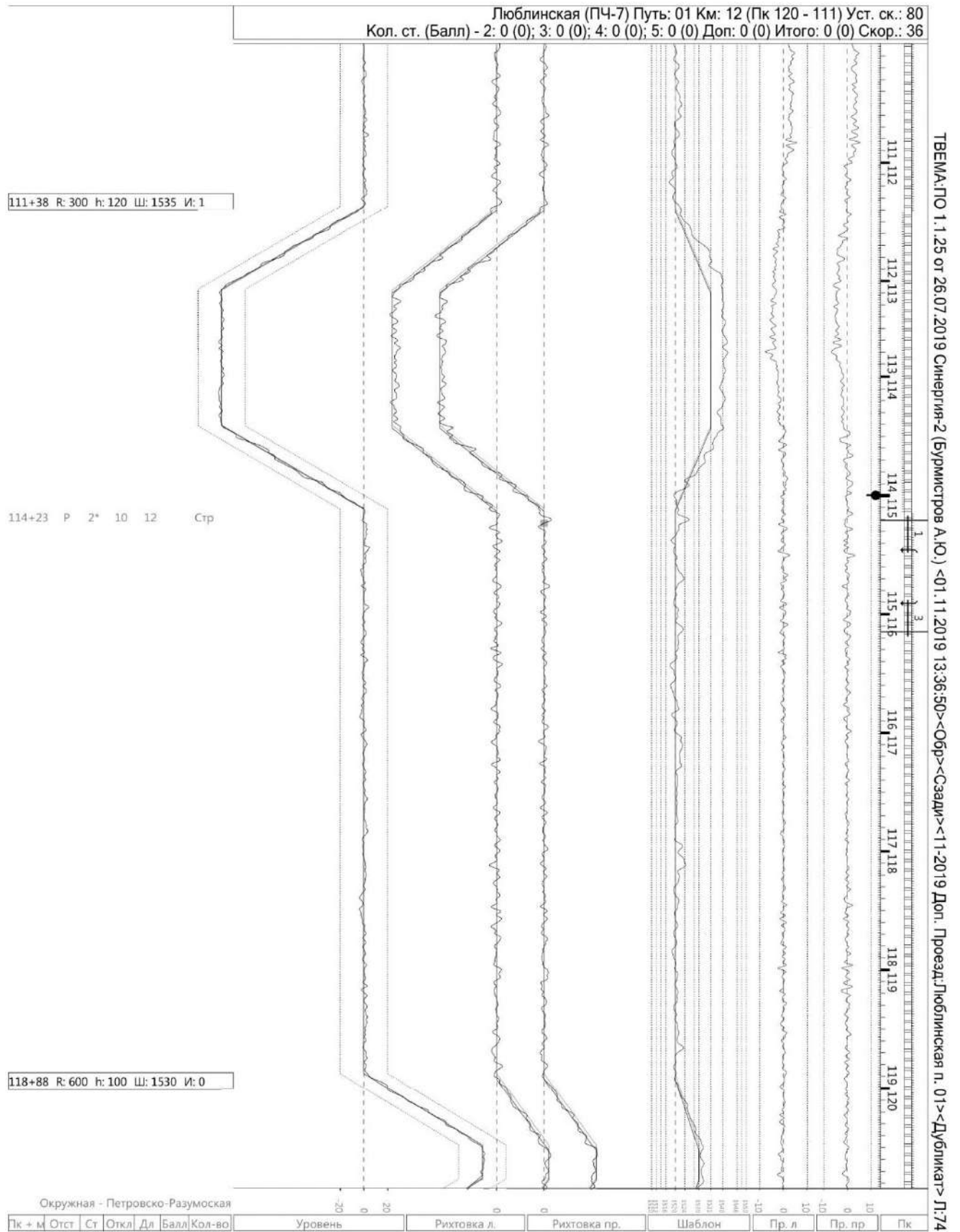


Рисунок В10 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 12 км.

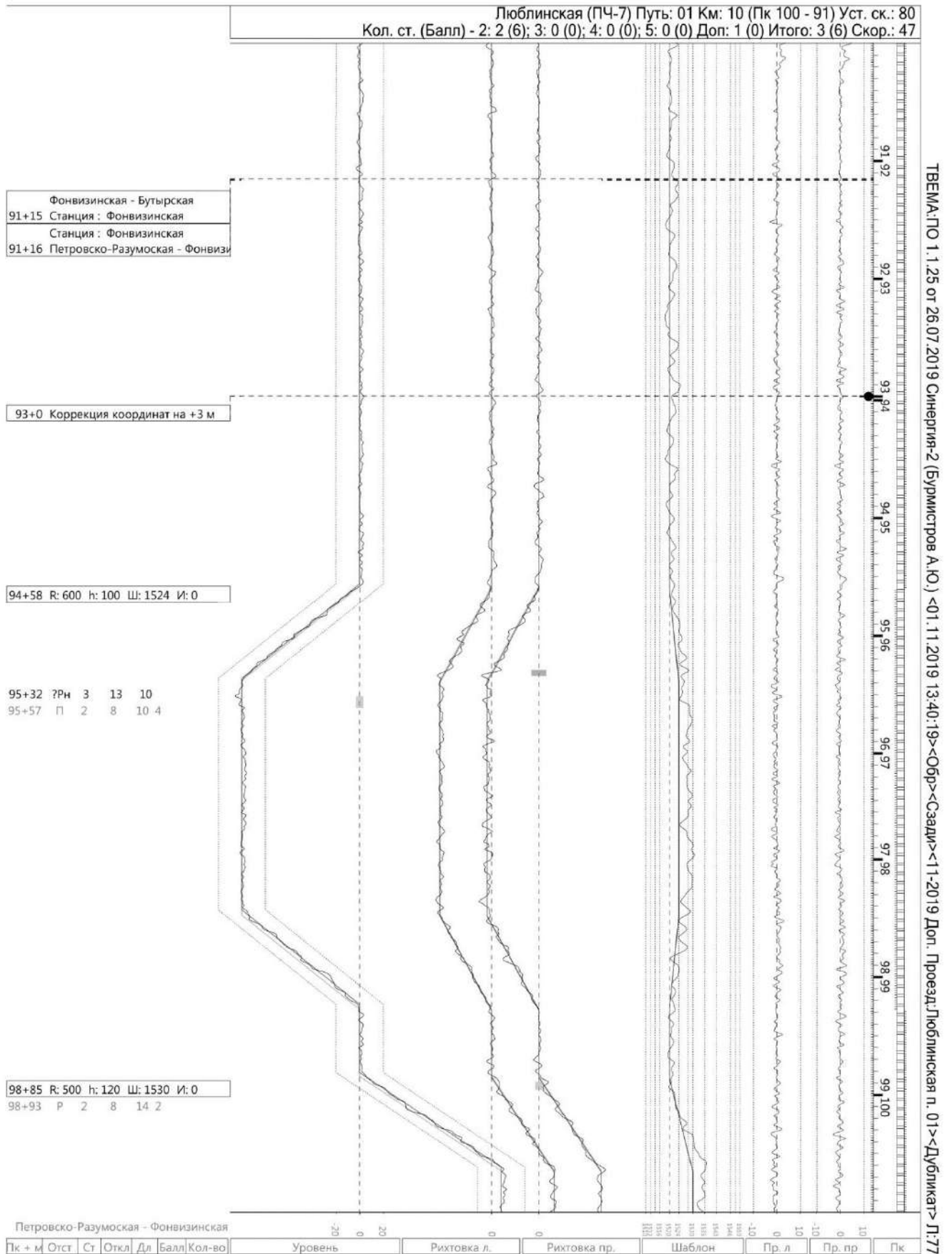


Рисунок В11 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 10 км.

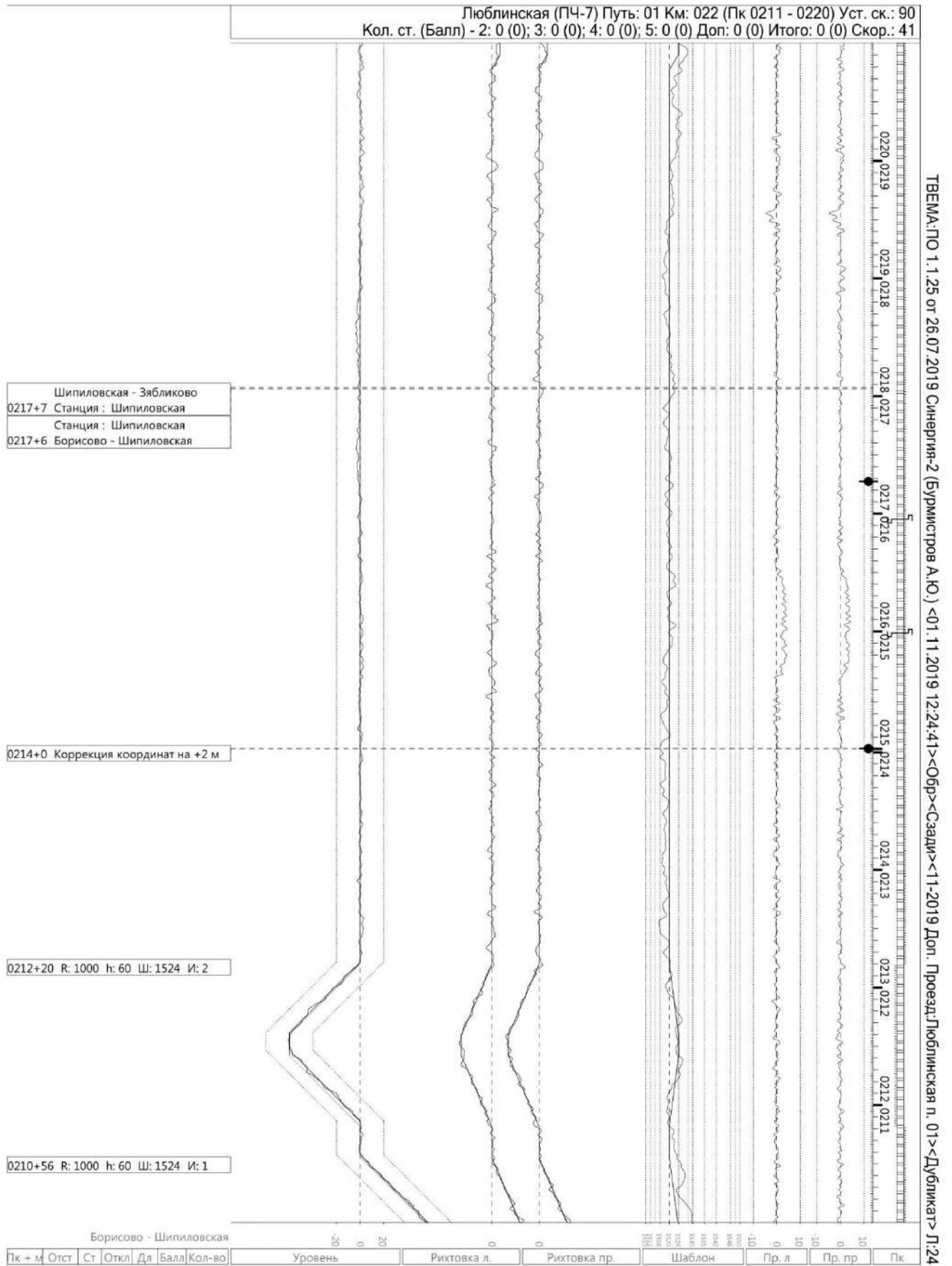


Рисунок В12 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 22 км.

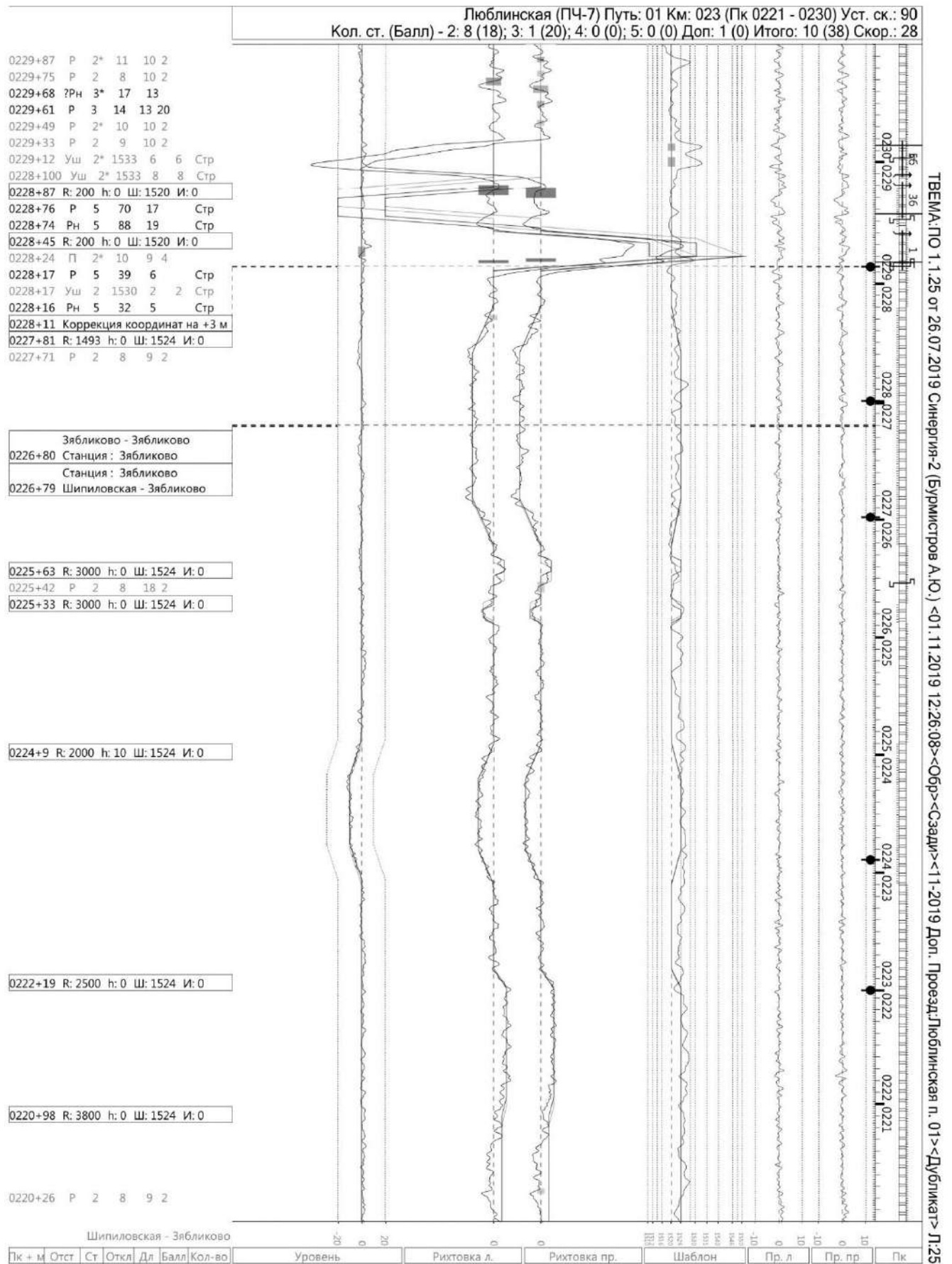


Рисунок В13 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 23 км.

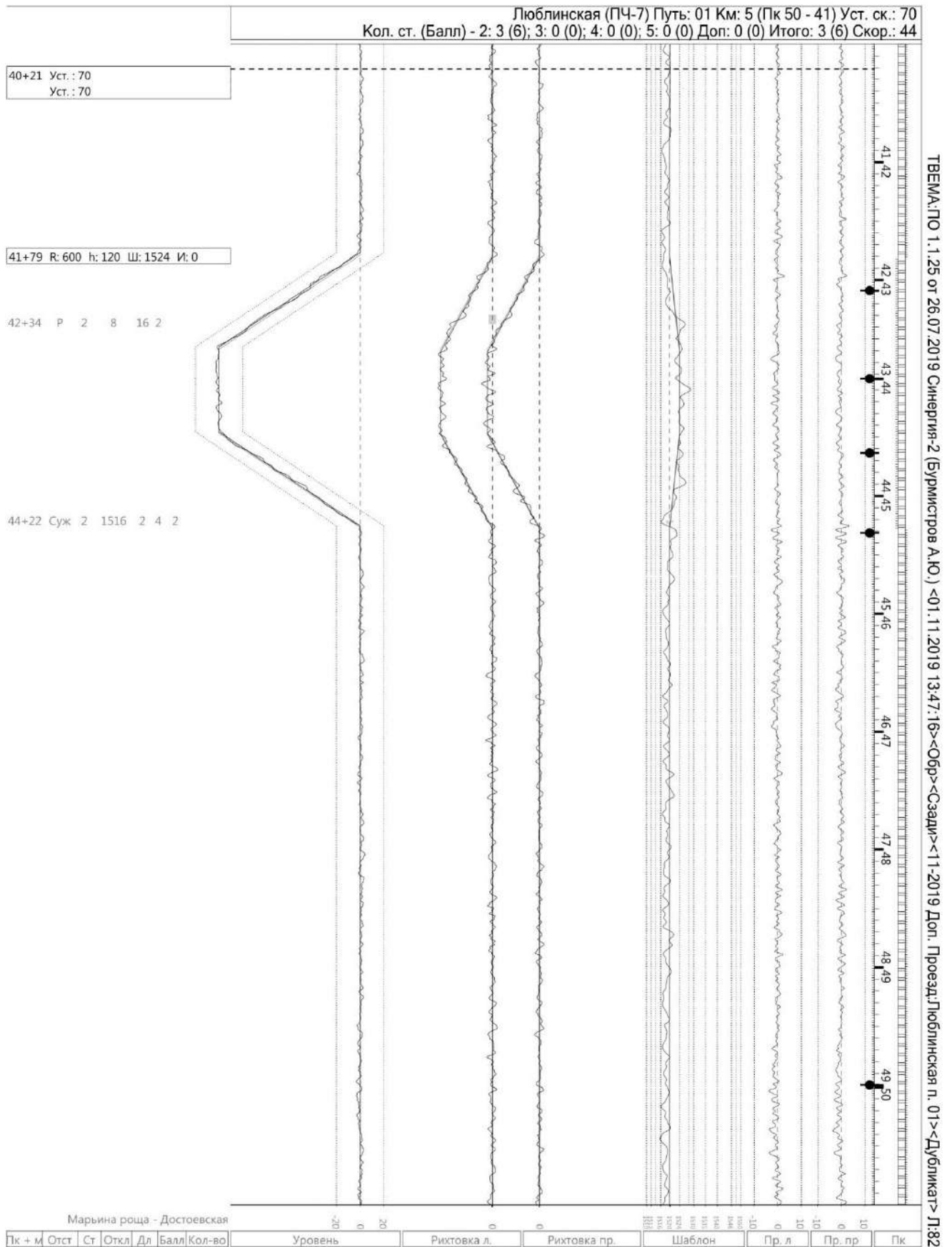


Рисунок В14 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 5 км.

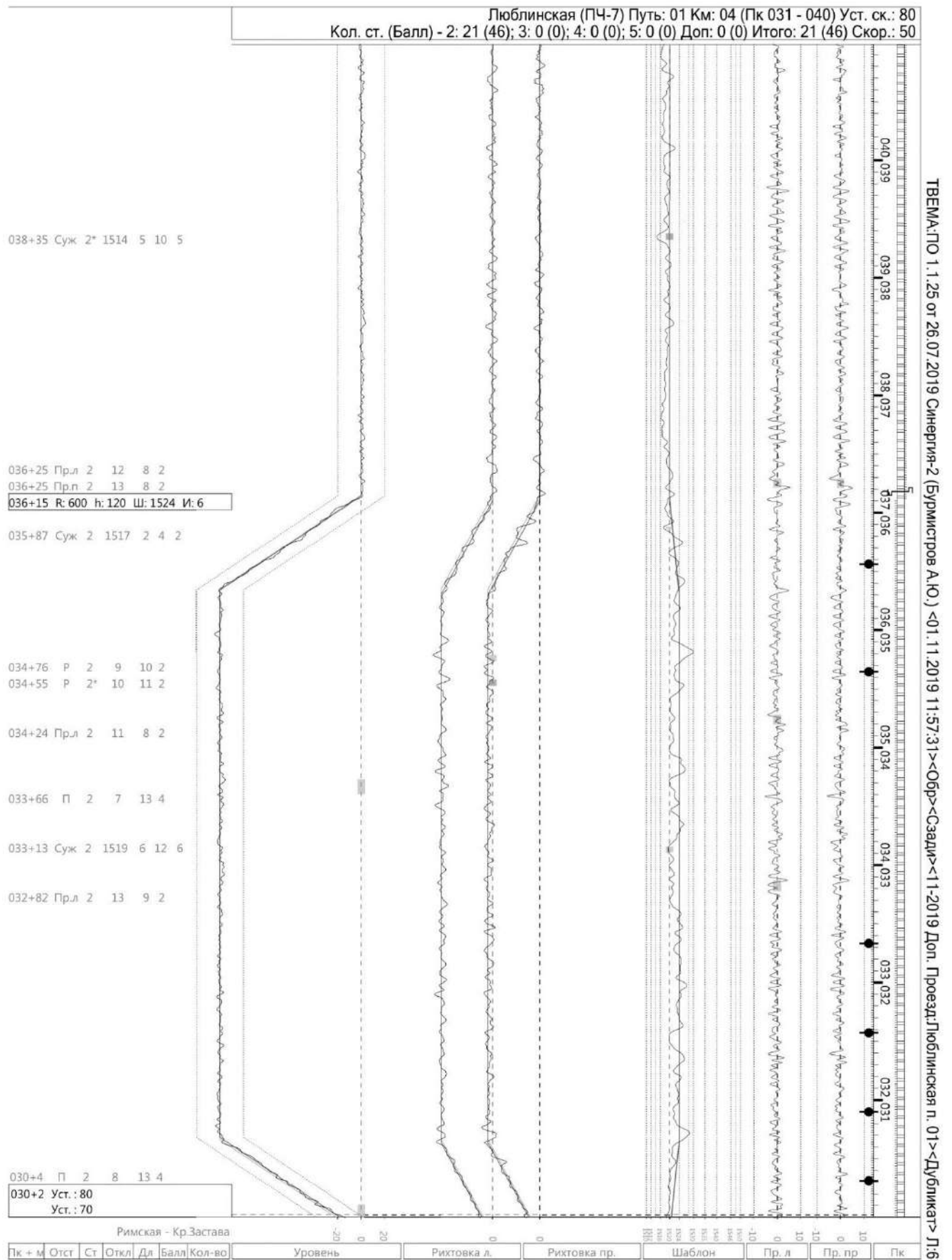


Рисунок В15 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 4 км.

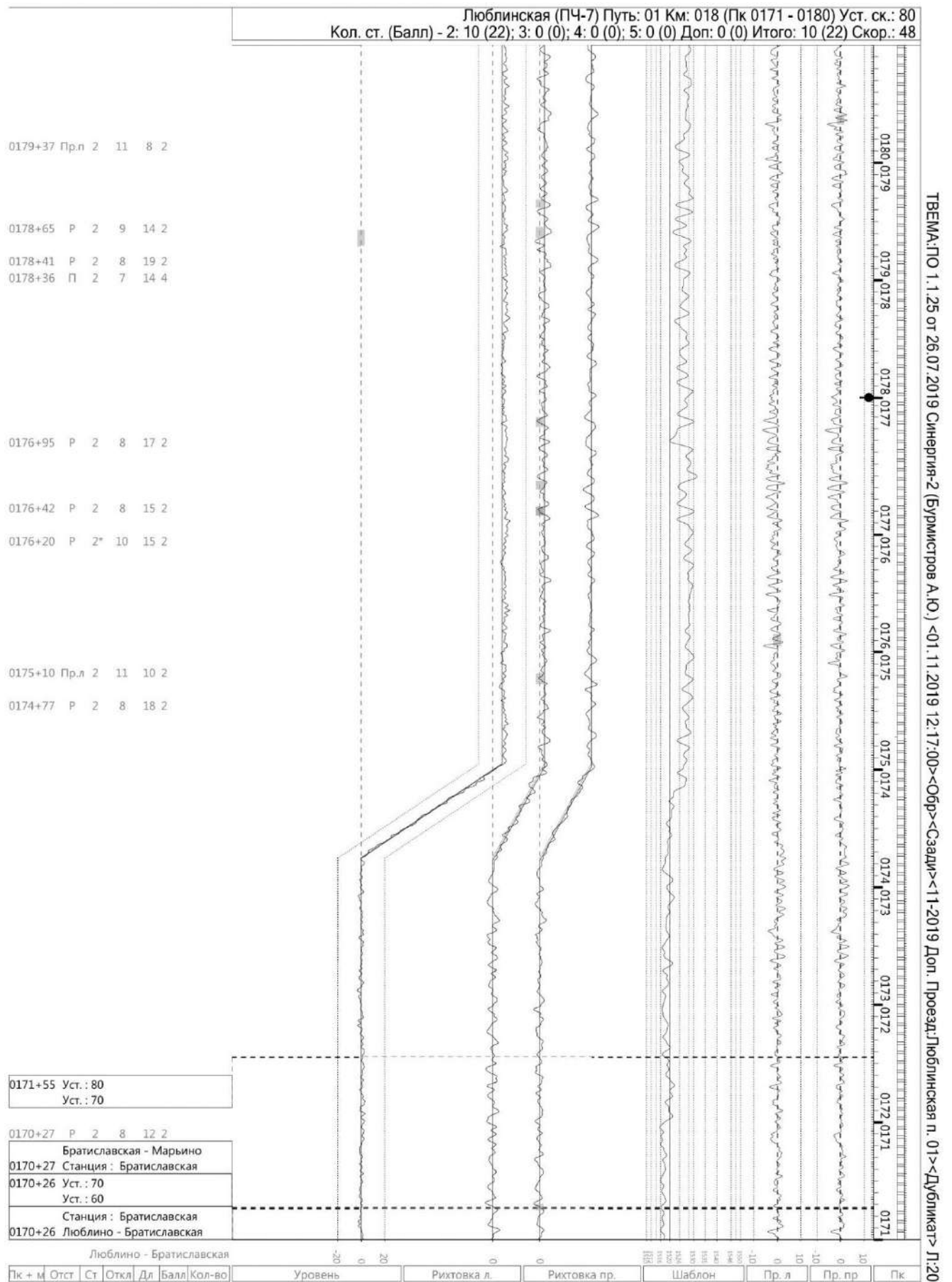


Рисунок В16 - Графическая диаграмма параметров ГРК. ПЧ-7, 1 путь, 18 км.

Приложение Г

Анализ центра диагностики и мониторинга Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен» за май и июнь 2020 года

Таблица Г1 – Распределение зарегистрированных отступлений по текущему содержанию геометрии рельсовой колеи по степеням (июнь и май 2020 года)

Отступления											
ПЧ	II ст.		Из них: II к III ст.		III ст.		IV / V ст.		Итого		
	Июнь 2020	Май 2020	Июнь 2020	Май 2020	Июнь 2020	Май 2020	Июнь 2020	Май 2020	Июнь 2020	Май 2020	+/- Июнь/ Май 2020
ПЧ-1	814	813	52	32	1	2	0	0	815	815	0
ПЧ-2	922	1046	29	35	3	1	0	0	925	1047	-122
ПЧ-3	539	513	19	18	3	0	1/0	0	543	513	+30
ПЧ-4	509	441	6	7	1	0	0	0	510	441	+69
ПЧ-5	925	983	32	29	0	1	0	1/0	925	985	-60
ПЧ-6	1259	1212	61	63	3	1	0	1/0	1262	1214	+48
ПЧ-7	120	120	3	3	0	1	0	0	120	121	-1
ПЧ-8	610	653	10	17	0	1	0	0	610	654	-44
ПЧ-9	626	537	23	23	5	3	0	0	631	540	+91
ПЧ-10	5	11	0	0	0	0	0	0	5	11	-6
П	6329	6329	235	227	16	10	1/0	2/0	6346	6341	+5

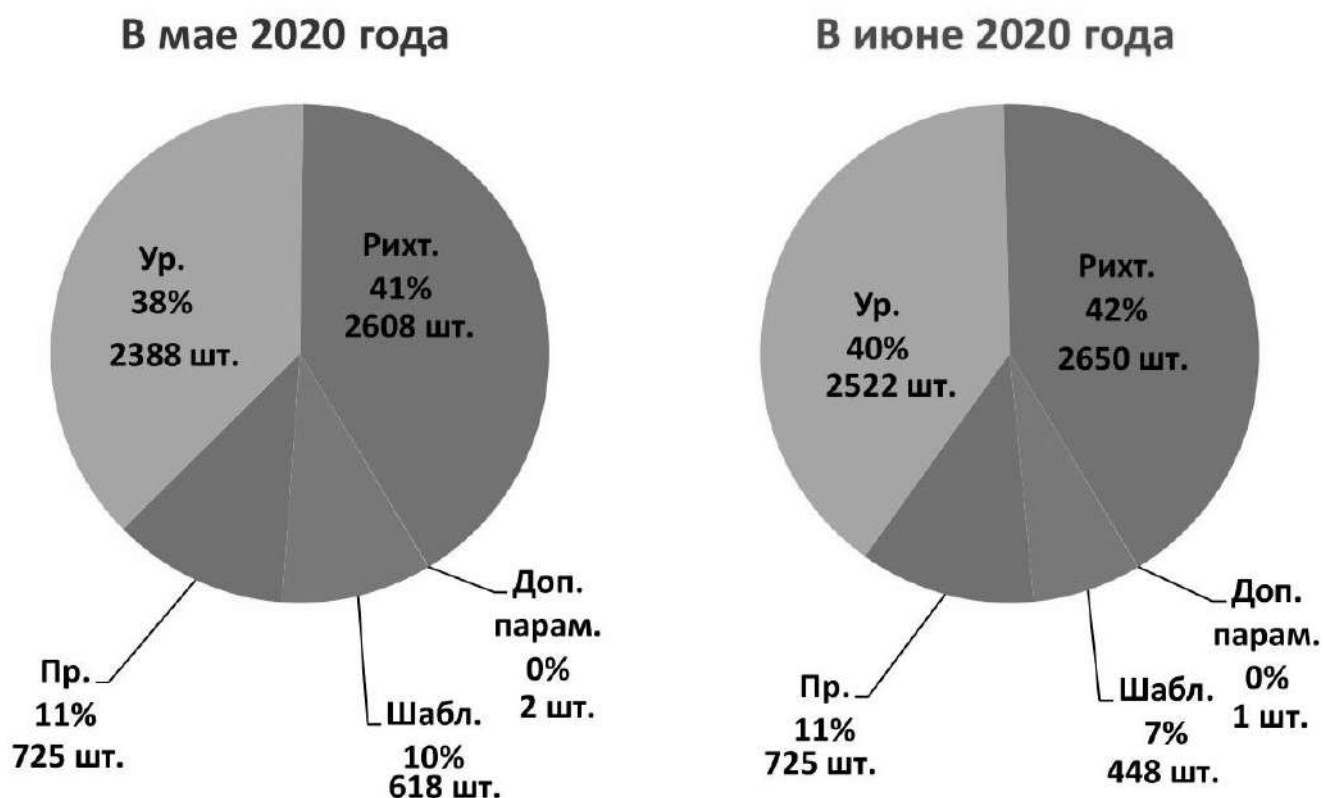


Рисунок Г1 – Процентное соотношение выявленных отступлений по текущему содержанию геометрии рельсовой колеи.



Рисунок Г2 – Распределение по видам отступлений по текущему содержанию геометрии рельсовой колеи.

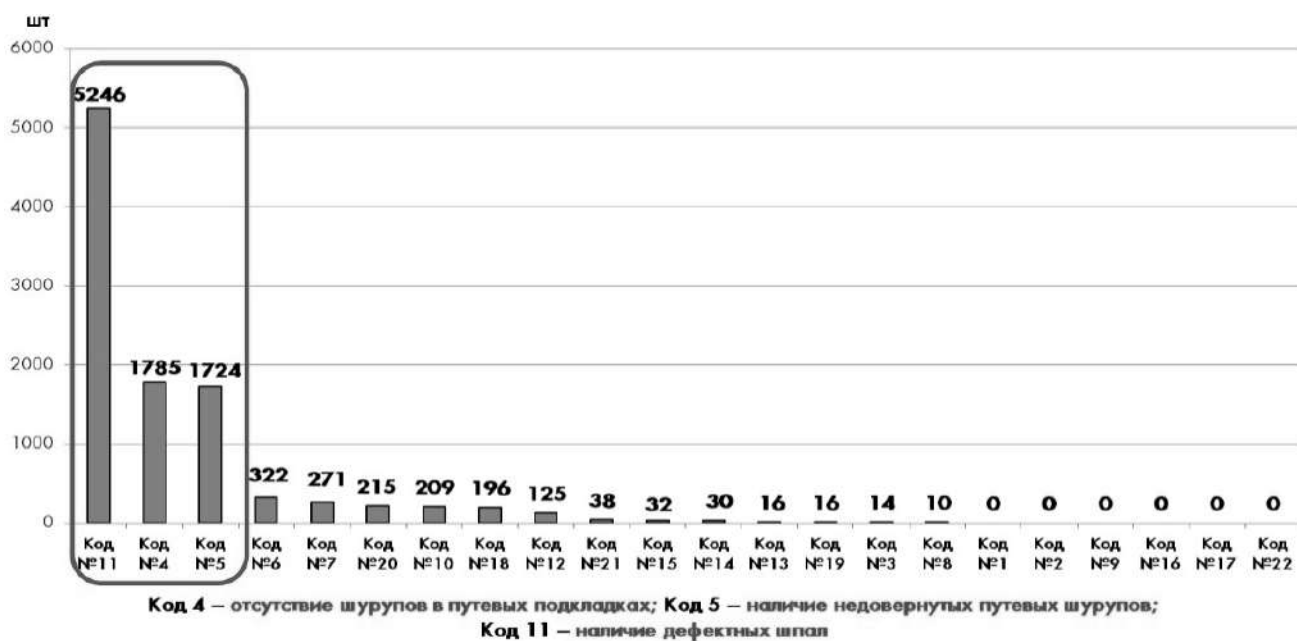


Рисунок Г3 – Распределение выявленных неисправностей на эксплуатационных дистанциях (ПЧ) по данным расшифровки системы «линейное видео» с разбивкой по кодам за 2 квартал 2020 г. Расшифровка кодов неисправностей приведена в приложении А.

Приложение Д

Письма в ГУП «Московский метрополитен» о предоставлении данных



МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**РОССИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА
РУТ (МИИТ)**

ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, ГСП-4, 127994
Тел./факс: (495) 681-13-40, e-mail: info@rut-miit.ru
ИНН/КПП 7715027733/771501001
ОГРН 1027739733922

16.10.2019г. № 32/130-19

На № _____ от _____

Начальнику Службы пути и
искусственных сооружений
ГУП «Московский метрополитен»

Д.В. Шумному



О предоставлении данных

Уважаемый Дмитрий Викторович!

Аспирант Погосян Давид Арменович работает над диссертацией на тему: «Критерии выбора верхнего строения пути метрополитена». Принятый в работе подход основан на «Концепции комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте» (УРРАН ОАО «РЖД»). Для определения возможности применения указанной концепции к пути метрополитена были обработаны данные Таганско-Краснопресненской дистанции пути, но оказалось, что для получения достоверных статистик одной дистанции пути недостаточно.

Прошу Вас оказать содействие в получении необходимых данных по Люблинско-Дмитровской дистанции, а именно:

- количество отступлений геометрии рельсовой колеи по контрольным проходам вагона-путеизмерителя на каждый километр пути по степеням 2-5 ежемесячно. Ретроспектива данных желательна не менее 3 лет;
- количество замененных негодных шпал и дефектных креплений ежемесячно;
- расположение различных типов ВСП с привязкой к пикетажу.

Научный руководитель аспиранта Д.А. Погосяна,
доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство» А.В. Замуховский

Исполнитель: Погосян Давид Арменович
8-915-437-51-68

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

**РОССИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА
(РУТ (МИИТ))**

ИПСС

ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, ГСП-4, 127994
Тел./факс: (495) 681-13-40, e-mail: info@rut-miit.ru
ИНН/КПП 7715027733/771501001
ОГРН 1027739733922

Исполняющему обязанности
начальника Службы пути и
искусственных сооружений
ГУП «Московский метрополитен»

Д.В. Шумному

24.06.2019 № 25/130-19

На № _____ от _____

О предоставлении данных

Уважаемый Дмитрий Викторович!

Аспирант Погосян Давид Арменович работает над диссертацией на тему: «Критерии выбора верхнего строения пути метрополитена». Принятый в работе подход основан на «Концепции комплексного управления надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте» (УРРАН ОАО «РЖД»). Для определения возможности применения указанной концепции к пути метрополитена необходимо обработать данные одной дистанции пути.

Учитывая, что Д.А. Погосян является работником Таганско-Краснопресненской дистанции пути прошу оказать содействие в получении необходимых данных по этой дистанции, а именно:

- количество отступлений геометрии рельсовой колеи по контрольным проходам вагона-путеизмерителя на каждый километр пути по степеням 2-5 ежемесячно. Ретроспектива данных желательна не менее 3 лет;
- количество замененных негодных шпал и дефектных скреплений ежемесячно.

Научный руководитель аспиранта Д.А. Погосяна,
доцент кафедры «Путь и путевое хозяйство»

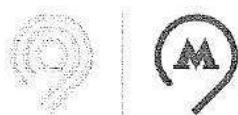
А.В. Замуховский

Исполнитель: Погосян Давид Арменович
8-915-437-51-68

Приложение Е

Протокол совещания начальника Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры ГУП «Московский метрополитен»

№ П-01-03/37 от 31.03.21 г.



Протокол

совещания начальника Службы
пути и искусственных сооружений
Дирекции инфраструктуры
Д.В. Шумного

от 31.03.2021 № П-01-03/37

Присутствовали:

Главный инженер Службы	– Зимин А.Б.
Заместитель начальника Службы	– Митрясов Д.В.
Начальник Производственно-технического отдела Службы	– Крикун А.В.
Заместитель начальника 6 дистанции Службы	– Суханов С.А.
Главный инженер 7 дистанции Службы	– Овчинников К.В.
Помощник мастера 6 дистанции Службы, аспирант ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)	– Погосян Д.А.
Кандидат технических наук ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)	– Замуховский А.В.
Аспирант ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ)	– Семёнов Е.В.

I. О повышении эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи и повышении эффективности рельсового хозяйства

(все присутствующие)

31.03.2021 состоялось совещание под председательством начальника Службы пути и искусственных сооружений Дирекции инфраструктуры (далее – Служба) по рассмотрению научных работ по темам «Повышение эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи» (далее – ГРК) и «Повышение эффективности рельсового хозяйства метрополитена».

В ходе совещания был заслушан доклад помощника мастера 6 дистанции Службы, аспиранта ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) Погосяна Д.А. о повышении эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи (далее – ГРК). Также были рассмотрены методика для определения показателей надежности конструкций

пути метрополитена на основе данных о состоянии ГРК и методика рационального распределения контингента работников эксплуатационных подразделений в зависимости от состояния ГРК на обслуживаемых участках пути.

В ходе совещания был заслушан доклад аспиранта ФГАОУ ВО РУТ (МИИТ) Семёнова Е.В. о повышении эффективности рельсового хозяйства Московского метрополитена за счет мониторинга обнаружения (замены) дефектных рельсов и прогноза интенсивности их образования.

II. Решения

В ходе совещания были приняты следующие решения:

1. Принять к сведению доклад Погосьяна Д.А. на тему: «Повышение эксплуатационной надежности подрельсового основания пути метрополитена на основе анализа геометрии рельсовой колеи».

2. Отметить, что предложенный подход, основанный на «Методике расчета показателей надежности и безопасности функционирования верхнего строения пути», являющаяся поддерживающим документом концепции УРРАН (Управление надежностью, рисками, стоимостью жизненного цикла на железнодорожном транспорте) ОАО «РЖД». Принципы определения показателей надежности в методике соответствуют правилам, установленным ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике. Термины и определения» и ГОСТ 33886-2016 «Железнодорожный путь. Номенклатура показателей надежности и функциональной безопасности».

Из множества показателей надежности, принятых в концепции УРРАН, в исследовании определены наиболее значимые для метрополитена показатели, представленные показатели безотказности, ремонтпригодности, готовности и функциональной безопасности. В исследовании в качестве «отказа» принято единичное отступление от норм содержания ГРК, определяемое действующими на метрополитене нормативно-техническими документами. При этом в исследовании принята гипотеза о том, что ГРК напрямую зависит от состояния подрельсового основания (элементов промежуточных рельсовых скреплений, подрельсовых опор и их оснований). Отказы рельсов, как элемента железнодорожного пути, не учитываются.

Разработан научно-обоснованный подход к определению участков железнодорожного пути метрополитена для проведения адресных (локальных) ремонтных работ. На его основе возможно определение и ранжирование участков пути, нуждающихся в первоочередном ремонте, в целях повышения

уровня обеспечения безопасности движения поездов и компенсации отсутствия капитальных ремонтных работ.

Показана возможность рационального распределения контингента работников эксплуатационных дистанций пути, в зависимости от фактического состояния ГРК и типа конструкции на обслуживаемых участках.

3. Рекомендовать при доработке методики для опытного применения на дистанции пути метрополитена ввести показатели текущего содержания геометрии контактного рельса и выхода отдельных элементов верхнего строения пути (за исключением рельсов).

4. Принять к сведению доклад Семёнова Е.В. на тему: «Повышение эффективности рельсового хозяйства метрополитена».

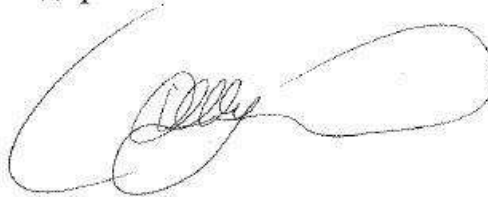
5. Отметить, что выполненный анализ замененных дефектных рельсов за 2017-2020 гг. позволяет сделать достоверный прогноз (степень достоверности – 95 %, при сверхнормативной наработке тоннажа до 40 %).

Отметить, что принятый в работе подход позволяет существенно продлить жизненный цикл рельсов в прямых и пологих кривых.

6. Рекомендовать продолжить исследования и анализ дефектности рельсов в Московском метрополитене с разработкой методики прогноза интенсивности выхода рельсов по дефектам, методики назначения периодичности неразрушающего контроля рельсов мобильными и съёмными дефектоскопными средствами.

7. Считать целесообразным рассмотреть возможность изменения нормативных наработок рельсов в зависимости от марки и категории качества на основе мониторинга их дефектности.

Начальник Службы



Д.В. Шумный