

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА»  
(АО «ВНИИЖТ»)

На правах рукописи

Шапетько Кирилл Вячеславович

Влияние неровностей продольного профиля на деформативность пути,  
безопасность движения и расход энергии на тягу поездов

2.9.2. Железнодорожный путь, изыскание и проектирование железных дорог

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Певзнер Виктор Ошеревич

Москва – 2022

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1 Деформативность пути и существующие методы её диагностики .....	8
1.1 Анализ отечественных нормативов по содержанию рельсовой колеи. 10	
1.2 Зарубежный опыт получения параметров геометрии рельсовой колеи 27	
1.3 Влияние накопления остаточных деформаций пути.....	30
Выводы по первой главе.....	46
Глава 2 Совершенствование системы диагностики пути для определения его деформативности.....	47
2.1 Способы оценки деформативности пути.....	47
2.2 Деформации земляного полотна .....	55
2.3 Способы определения параметров длинных неровностей. ....	60
2.4 Метод получения параметров неровностей продольного профиля .....	64
Выводы по второй главе.....	72
Глава 3 Апробация метода получения параметров длинных неровностей в профиле .....	73
3.1 Существующие средства диагностики пути в профиле.....	80
3.2 Влияние неровностей продольного профиля на подвижной состав .....	80
3.3 Недостатки существующих методов .....	81
3.4 Требования к диагностике, вызванные изменением условий эксплуатации.....	83
3.5 Возможные пути получения необходимой информации в частотной области .....	84
3.6 Анализ параметров длинных неровностей в профиле .....	85

3.7	Влияние длинных неровностей в профиле на динамические показатели подвижного состава .....	90
3.8	Влияние длинных неровностей в профиле на безопасность движения	99
3.8.1	Анализ схода 1 на Горьковской железной дороге.....	100
3.8.2	Анализ схода 2 на Горьковской железной дороге.....	102
3.8.3	Анализ схода 3 на Московской железной дороге.....	106
	Выводы по третьей главе.....	111
Глава 4	Технико-экономическое обоснование влияния длинных неровностей в профиле на инфраструктуру .....	112
4.1	Влияние отступлений геометрии пути на сопротивление движению.	113
4.2	Определение влияния параметров длинных неровностей в профиле на расход электроэнергии на тягу поездов.....	117
4.2.1	Анализ данных по выходным формам .....	127
4.3	Экономический эффект от устранения длинных неровностей .....	131
	Выводы по четвертой главе.....	143
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	144
	Список литературы .....	146
	Приложение А .....	168
	Приложение Б.....	170
	Приложение В.....	175
	Приложение Г .....	177
	Приложение Д.....	181
	Приложение Ж.....	183

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В современных условиях эксплуатации железных дорог под воздействием поездов повышенной массы и длины, состоящих в том числе из вагонов с повышенными осевыми нагрузками, деформации пути в продольном профиле происходят не только в элементах верхнего строения пути. А неравномерная осадка земляного полотна, вызванная такими воздействиями, способствует появлению длинных неровностей в пути.

Исследования отечественных и зарубежных специалистов позволили определить влияние повышения осевых нагрузок на накопление расстройств пути. Однако процесс определения деформативности железнодорожного пути по параметрам неровностей в профиле изучен не в полном объеме, из-за отсутствия инструментов и нормативов для определения их в реальном времени.

Актуальность работы вытекает из необходимости развития исследований по определению параметров неровностей продольного профиля и последующего мониторинга состояния пути по изменению характеристик этих неровностей на участках тяжеловесного движения, в том числе на участках обращения вагонов с повышенными осевыми нагрузками, а также влияния этих неровностей на безопасность движения и расход энергии на тягу поездов.

**Степень разработанности темы исследования.** Вопросам деформативности железнодорожного пути посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых. В их числе следует отметить: Г.Л. Аккермана, Й. Айзенмана, В.П. Бельтюкова, Л.С. Блажко, И.А. Бондаренко, М.Ф. Веригу, О.П. Ершкова, В.Б. Каменского, Н.И. Карпущенко, А.И. Кистанова, А.Я. Когана, А.Ф. Колосса, Г.Г. Коншина, М.А. Левинзона, В.С. Лысюка, В.О. Певзнера, С.П. Першина, Г.М. Стояновича, В.П. Титова, Г.М. Шахунянца и др.

Работ по определению неровностей продольного профиля относительно мало. Среди них необходимо отметить труды: Е.С. Ашпиза, А.Я. Когана, М.А. Левинзона, С.В. Малинского, В.О. Певзнера, Ю.С. Ромена, Н.Ю. Сергеевой, Ю.А. Седелкина, О.Б. Симакова.

Изученный автором опыт позволил реализовать способ получения параметров длинных неровностей для мониторинга железнодорожного пути по данным измерительных систем путеизмерителей с целью определения параметров длинных неровностей и деформативности пути, а также проведения расчетов и экспериментов по оценке влияния неровностей на безопасность движения и расход электроэнергии на тягу поездов.

**Целью диссертационной работы** является определение и мониторинг параметров длинных неровностей продольного профиля, наличие в пути которых оказывает существенное влияние на деформативность пути, безопасность движения и расход электроэнергии на тягу поездов.

**Задачи исследования:**

- 1) разработка предложения по оценке деформативности пути, на основе данных изменения параметров длинных неровностей в продольном профиле;
- 2) оценка влияния длинных неровностей на безопасность движения;
- 3) оценка влияния длинных неровностей продольного профиля на расход энергии на тягу поездов.

**Объектом исследования** являются участки железнодорожного пути с длинными неровностями продольного профиля, изменение параметров которых, может указывать на возможные (вероятные) места деформаций земляного полотна.

**Предметом исследования** является натурные неровности продольного профиля пути, полученные геодезическими методами от внешних по отношению к пути реперных систем, или аналогичные показатели, получаемые при числовой обработке данных с измерительных систем путеизмерителя, позволяющие определять изменения параметров неровностей во времени с учетом пропущенного тоннажа, их влияние на расстройства пути, вызванных деформативностью основания, безопасность движения и расход электроэнергии. Под «натурными» понимаются неровности, описывающие реальное положение пути в профиле в независимой системе координат и изменяющиеся при увеличении пропущенного тоннажа.

**Научная новизна исследования заключается:**

- 1) в разработке и внедрении методики мониторинга положения пути в профиле по параметрам длинных неровностей;
- 2) в использование характера изменения параметров неровностей продольного профиля для анализа и мониторинга состояния пути;
- 3) в оценке влияния параметров (длина, амплитуда, площадь) неровностей продольного профиля на показатели деформативности железнодорожного пути, безопасность движения и расход электроэнергии на тягу поездов.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

Результаты, полученные в ходе реализации, апробирования и верификации в исследовательских целях способа определения параметров неровностей продольного профиля, позволили доказать, что величины длинных неровностей могут являться элементами оценки деформативности пути.

Предложены и внедрены показатели оценки деформативности пути в продольном профиле.

Полученные данные, позволяют анализировать влияние длинных неровностей, вызванных деформативностью пути, на безопасность движения при сходах подвижного состава и дополнительный расход электроэнергии на тягу поездов.

**Методология и методы исследования.** Решение поставленных задач было осуществлено благодаря изученному отечественному опыту, а также исследованиям и методам используемым на железных дорогах разных стран ближнего и дальнего зарубежья, исследованиям проведенным на действующих участках пути и применения прикладных программ динамических расчетов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- 1) предложения по оценке деформативности пути по параметрам длинных неровностей в продольном профиле;
- 2) предложения по оценке влияния изменения параметров длинных неровностей на безопасность движения;

3) предложения по оценке влияния параметров длинных неровностей на расход электроэнергии на тягу поездов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Высокая степень совпадения результатов расчетов по определению параметров длинных неровностей, получаемых с путеизмерительных вагонов, и результатов, определения этих неровностей геодезическими методами с помощью сертифицированных (высокоточных) инструментов, а также применение в экспериментальных исследованиях апробированных методик.

## ГЛАВА 1 ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПУТИ И СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ЕЁ ДИАГНОСТИКИ

Изменение в последние годы условий эксплуатации железных дорог России ставит на повестку дня вопрос о необходимости соответствующего совершенствования методов и критериев оценки состояния пути.

Происходящие изменения определяются двумя группами факторов:

- системным несоответствием параметров развития инфраструктуры потребностям перевозочного процесса, что требует увеличения густоты движения поездов, повышения их масс и нагрузок на ось локомотивов и вагонов. Следствием является развитие остаточных деформаций пути и, в первую очередь, балластного слоя и земляного полотна;
- повышение скоростей движения пассажирских поездов, включая организацию скоростного и высокоскоростного движения, при которых расширяется диапазон неровностей, оказывающих влияние на динамику подвижного состава и комфортабельность перевозок пассажиров.

Первая группа факторов, влияющих на условия эксплуатации железных дорог, связана, по сути, с развитием тяжеловесного движения. Говоря о развитии тяжеловесного движения необходимо отметить, что в Российской Федерации железнодорожный транспорт играет важную роль в развитии экономики, так как на его долю приходится 84% грузооборота и 46% пассажиропотока транспорта общего пользования. Стоит заметить, что сеть железных дорог сильно дифференцирована по грузонапряженности – около 85% всего грузооборота выполняет примерно 50% эксплуатационной длины сети, а средняя грузонапряженность на сети составляет 50 млн. т км брутто.

В настоящее время разработка и внедрение системы массового обращения длиносоставных и тяжеловесных поездов, в том числе из вагонов с повышенными осевыми нагрузками – является одним из главнейших направлений научно-технического прогресса на железнодорожном транспорте, который реализуется на сети железных дорог ОАО «РЖД».



Необходимо отметить [1], что в настоящее время тяжеловесное движение осуществляется, на основных направлениях (Кузбасс – Запад, Кузбасс – Центр, Кузбасс – Юг, Кузбасс – Дальний Восток), которые охватывают практически всю сеть железных дорог. Развернутая длина путей на полигонах тяжеловесного движения составляет 34,6 тыс. км, из которых 9,1 тыс. км лежат на деревянных шпалах. Протяженность путей со сверхнормативным сроком эксплуатации на данных полигонах составило 18,7 тыс. км из которых 12,2 тыс. км пути 1-го и 2-го классов.

Было отмечено [2], что тяжеловесному движению в ОАО «РЖД» уделяется большое внимание, так как это сложная научная и инженерная задача, требующая постоянного наращивания знаний о процессах вождении тяжеловесных и длинносоставных поездов. В 2014 г. было принято решение Научно-технического совета о повышении унифицированной весовой нормы грузовых поездов до 7100 т при использовании вагонов с осевой нагрузкой 25 тс. По отчетным данным [3], средняя масса поезда увеличилась на 600 т с 2000 по 2016 гг. и составила 4000 т. Важнейшим фактором дальнейшего развития технологии тяжеловесного движения является внедрение вагонов с улучшенными характеристиками, а также повышенными осевыми нагрузками, что позволит повысить массу поезда до 7100 т и сохранить унифицированную длину состава – 71 вагон.

Необходимо отметить, что анализ [2] комплексной оценки состояния пути на основных направлениях тяжеловесного движения позволил выявить рост эксплуатационных затрат на текущее содержание пути. В течение трех лет на участке Табойла – Мурманск затраты на текущее содержание увеличились на 21,1%. Исследования [4, 5] позволили подтвердить увеличение затрат на текущее содержание на участке эксплуатации опытных составов из вагонов с повышенной осевой нагрузкой [6].

Необходимо помнить и о развитии пассажирского движения. Вторая группа факторов, определяющих изменения в области эксплуатации железных дорог, как было указано выше, связаны с ростом скоростей пассажирского движения. На сети ускоренными темпами развертывается скоростное и высокоскоростное движения.

Скорости 160 км/ч реализуются на ряде основных пассажирских направлений, а на линии Москва – Санкт-Петербург поезда «Сапсан» достигают скорости 250 км/ч. С 17 декабря 2009 года был положен старт национальному высокоскоростному движению в России на участке Санкт-Петербург – Москва [7], в 2010 году было организовано еще два высокоскоростных участка со скоростями до 200 км/ч: Москва – Нижний-Новгород и Санкт-Петербург – Хельсинки.

Несмотря на описанные процессы, происходящие в системе эксплуатации железнодорожного пути, подходы к оценке геометрии рельсовой колеи в существующих условиях не изменились.

Проанализируем нормативную документацию по оценке геометрии рельсовой колеи, что позволит определить текущее состояние и перспективы развития в этой области с учетом современных условий.

### **1.1 Анализ отечественных нормативов по содержанию рельсовой колеи**

Анализ нормативной документации [8-15] по оценке геометрии рельсовой колеи за последние 50 лет показал, что подход к оценке основных видов отклонений геометрии рельсовой колеи изменялся незначительно.

В инструкции ЦП-2023 [8] указывалось, что качество текущего содержания железнодорожного пути и его обустройств определяется их состоянием, установленным как по показаниям путеизмерительного вагона, так и по результатам натурных осмотров пути.

По показаниям путеизмерительного вагона путь считался в отличном состоянии, если соответствовал данным, приведенным в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения балловой оценки железнодорожного пути, соответствующие отличному состоянию

Тип рельсов	Род балласта		
	Щебень сортированный и карьерный, гравий, ракушка, асбестовый балласт	Крупно- и среднезернистый песчаный балласт	Мелкозернистый песчаный балласт
Р50 и тяжелее	0-15	0-15	0-20
Р43 и более тяжелые импортные рельсы	0-15	0-20	0-25
I-а и близкие к ним	0-20	0-25	0-30
II-а, III-а и легче, а также старогодные зарубежных стран	0-20	0-30	0-30

По показаниям путеизмерительного вагона путь считался в хорошем состоянии, если соответствовал данным, приведенным в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Значения балловой оценки железнодорожного пути, соответствующие хорошему состоянию

Тип рельсов	Род балласта		
	Щебень сортированный и карьерный, гравий, ракушка, асбестовый балласт	Крупно- и среднезернистый песчаный балласт	Мелкозернистый песчаный балласт
Р50 и тяжелее	16-30	16-30	21-40
Р43 и более тяжелые импортные рельсы	16-30	21-40	26-50
I-а и близкие к ним	21-35	26-50	31-60
II-а, III-а и легче, а также старогодные зарубежных стран	21-40	31-60	31-80

В удовлетворительном состоянии путь считался при наличии балловой оценки по показаниям вагона-путеизмерителя со значениями не более 250, неудовлетворительное состояние пути соответствует балловой оценке более 250.

В нормах 1960 г. [9] указывалось, что путеизмерительные вагоны, эксплуатирующиеся на сети дорог, записывали на ленте показания: содержание геометрии рельсовой колеи по ширине колеи, уровню, вертикальным и горизонтальным толчкам, а также просадкам и рихтовке рельсовой колеи. Неисправности пути оценивались баллами, которые для отступлений по шаблону и уровню определялись на протяжении неисправного пути. Перекосы, резкие односторонние просадки, вертикальные и горизонтальные толчки определялись путеизмерителями конструкции Ляшенко и оценивались поштучно.

Начиная с введения норм 1960 года и до сих пор к неисправностям пути по уровню относятся: перекосы, резкие односторонние просадки, плавные отклонения по уровню. К перекосам относились последовательные отклонения по уровню обеих рельсовых нитей в разные стороны при расстоянии менее 25 м между точками крайних отклонений по уровню. К резким односторонним просадкам относились отклонения по уровню в одну сторону при длине 10 м и менее. Длина отступления измерялась между точками, в которых начиналось резкое отклонение по уровню. Если длина отступления по уровню более 10 м, она относилась к плавным отклонениям. В таблицах 1.3–1.5 приведены размеры отступлений.

Таблица 1.3 – Оценка перекосов

Степень отступления	Размер отклонения, мм	Числовые значения балла при расстоянии в м между вершинами		
		1 – 7	8 – 14	15 – 24
I	От 1 до 6	0	0	0
II	>> 7 >> 10	30	15	10
III	>> 11 >> 15	300	150	100
IV	Более 15	2000	1500	1000

Расстояние между вершинами пик устанавливалось по ленте в масштабе записи по нулевой линии под вершинами пик, направленными в противоположные стороны, при этом длина перекоса в пределах от 0,5 до 3,5 мм, от 4 до 7 мм, от 7,5 до 12 мм соответствует расстоянию 1-7, 8-14, 15-24 метра.

Таблица 1.4 – Оценка резких односторонних просядок

Степень отступления	Размер отклонения, мм	Числовое значение балла	
		При длине отклонения 1- 5 м	При длине отклонения 6-10 м
I	От 1 до 6	0	0
II	>> 7 >> 10	10	5
III	>> 11 >> 15	100	50
IV	Более 15	1000	500

Резкие односторонние просядки оценивались не по протяжению их, а поштучно. Длина отклонения измерялась установлением. Такая неисправность являлась резкой односторонней просядкой или плавным отклонением по уровню (таблица 1.5).

Таблица 1.5 – Оценка плавных отклонений рельсовых нитей по уровню

Степень отступления	Размер отклонения, мм	Числовое значение балла
I	От 1 до 4	0
II	>> 5 >> 15	1
III	>> 16 >> 30	10
IV	>> 31 >> 50	100

Длина отклонения измерялась по ленте отдельно для каждой степени неисправности, причем измерения начинались с высшей степени отступления. Для меньших степеней протяженность неисправности уменьшалась на длину протяжения неисправностей высших степеней.

Для оценки просядок на ленте измерялись величины  $H$ , которые обозначают амплитуду просядок, по каждой нити отдельно. В таблице 1.6 приведены отступления просядок.

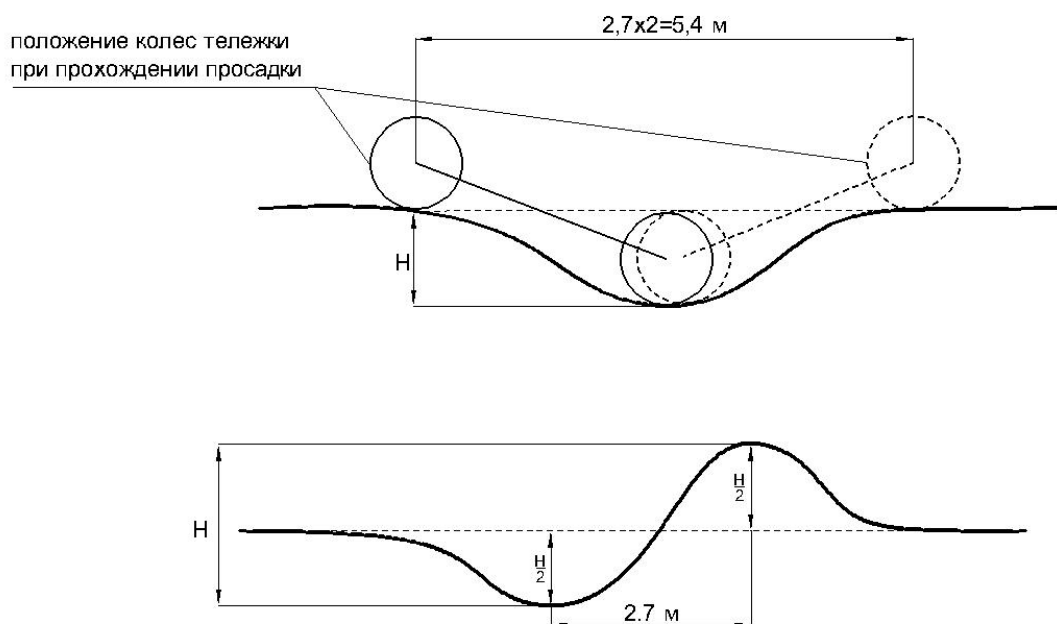
Таблица 1.6 – Оценка величины  $H$  просядок

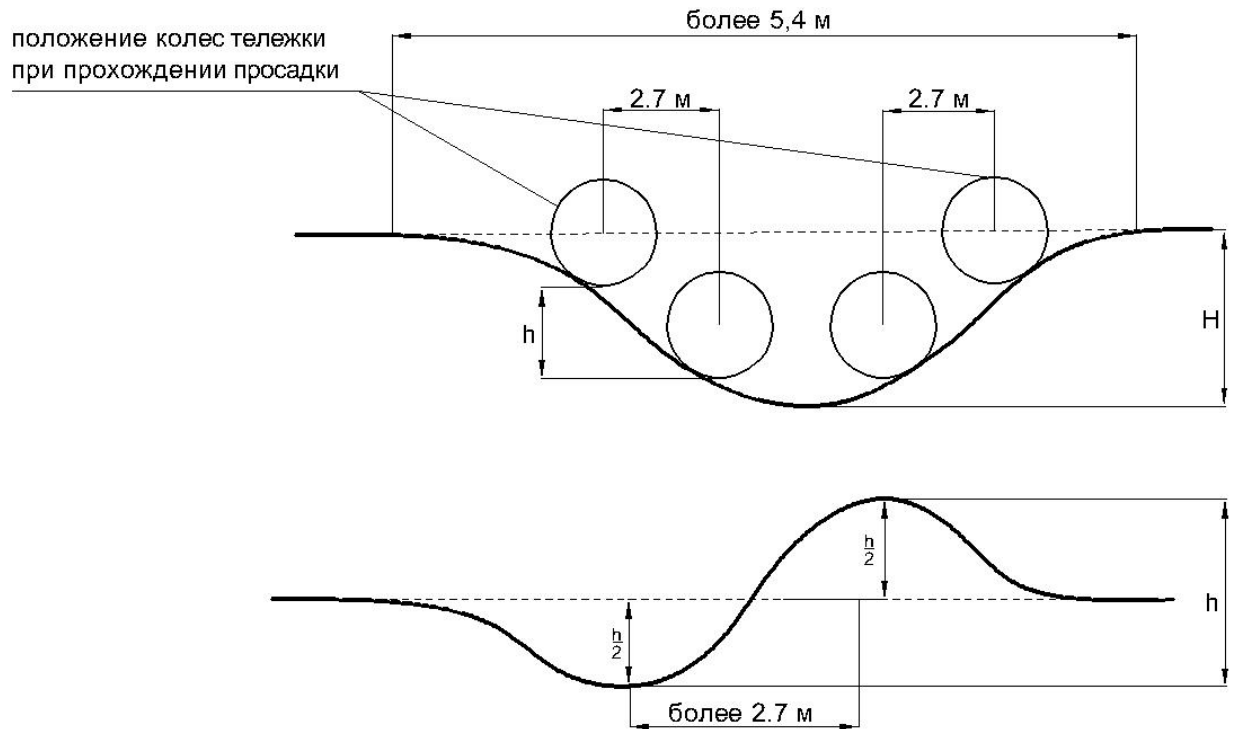
Степень отступления	Размер отклонения, мм	Величина $H$ на ленте путеизмерителя, мм	Числовое значение балла
I	От 0,5 до 5	1-10	0
II	>> 6 >> 7,5	11-15	1
III	>> 8 >> 12,5	16-25	10
IV	Более 12,5	Более 25	100

В Технических указаниях 1981 г. [10] отмечалось, что путеизмерительный вагон обеспечивал измерения и регистрацию на ленте геометрических параметров рельсовой колеи, которые влияют на плавность и безопасность движения поездов. Каждое отступление имело свою бальную оценку, связанную с динамическими взаимодействиями пути и подвижного состава, а также интенсивностью накопления остаточных деформаций. К ним относились следующие параметры [10]:

- ширина колеи;
- положение рельсовых нитей по уровню (плавные отклонения и перекосы);
- направление рельсовых нитей в плане;
- просадки рельсовых нитей по положению двух колес тележки по одной рельсовой нити.

Записи просадок на ленте отличаются по форме от фактического положения рельсовых нитей в местах просадок. Величина просадки записывается на ленте полностью только в тех случаях, когда длина просадки равна или меньше 5,4 м (две базы тележки) как изображено на рисунке 1.1. В случае, когда просадка большей длины, то на ленте записывалась величина просадки меньше фактической (рисунок 1.2).





Согласно инструкции [10], нулевая линия просадок соответствовала положению, когда на прямом участке все колеса вагона-путеизмерителя по одной рельсовой нити находятся на одной прямой. В таблице 1.7 приведена оценка рельсовых нитей по перекосам, оценка производилась поштучно.

Таблица 1.7 – Оценка просадок рельсовых нитей

Степень отступлений	Размер просадки, мм	Оценка в баллах за одну просадку
I	до 10 вкл.	0
II	более 10 до 15 вкл.	2
III	более 15 до 20 вкл.	10
IV	более 20 до 25 вкл.	50
V	более 25	500

Согласно Техническим указаниям [10] к оценке состояния пути по уровню относятся: перекосы и плавные отклонения по уровню.

К перекосам относятся резкие изменения положения рельсовых нитей по уровню в разные стороны при расстоянии между вершинами пик записи амплитуды отклонений 20 м и менее, независимо от того, пересекали запись

нулевую линию. В таблице 1.8 приведена оценка перекосов в зависимости от расстояния между пиками.

Таблица 1.8 – Оценка перекосов

Степень отступления	Величина перекосов, мм	Оценка в баллах при расстоянии в м между вершинами пик	
		до 10 м	более 10 до 20 м
I	до 8 вкл.	0	0
II	более 8 до 12 вкл.	2	1
III	более 12 до 16 вкл.	30	10
IV	более 16 до 20 вкл.	500	300
V	более 20	1000	1000

Если же расстояние между пиками более 20 м, то это отступление оценивается как плавный перекоп по уровню, при этом полуветви справа и слева перекопа не штрафуются. Перекоп оценивается по той части записи, которая дает большую оценку. В таблице 1.9 приведена оценка отклонений по уровню в зависимости от протяжения и степени отступления.

Таблица 1.9 – Оценка плавных отклонений по уровню

Степень отступления	Размер просядок, мм	Оценка в баллах за одну просядку
I	до 10 вкл.	0
II	более 10 до 15 вкл.	2
III	более 15 до 20 вкл.	10
IV	более 20 до 25 вкл.	50
V	более 25	500

Следует отметить, что на прямых участках длиной не менее 100 м, подверженных равномерному пучению или осадке земляного полотна, вторая степень отступления оценивается баллом ноль.

Согласно Инструкции 1996 г. [11] путеизмерительными вагонами контролировались и записывались параметры: ширина колеи, взаимное положение рельсовых нитей по уровню, просядки рельсовых нитей, положение рельсовых нитей в плане. Взаимное положение рельсовых нитей по уровню измеряется наклоном линии, соединяющей центр колес задней (со стороны салона вагона)



колесной пары относительно поперечного горизонта, создаваемого гиروطформой.

В инструкции [11] указано, что определение положения пути по уровню производится по величине отклонения линии записи на ленте от нулевой линии, соответствующей на прямом участке – нулевое положение. Перекос оценивается по той части его записи, которая имеет большую амплитуду между вершинами отклонений. Если расстояние между вершинами перекоса более 20 м, то такое отступление оценивается как плавное отклонение по уровню от нулевой линии.

Неровности рельсовой колеи, представляющие собой короткие (до 10 м) провалы (или бугры) рельсовых нитей в продольном направлении, измеряются и записываются на ленту в зависимости от изменения разности расстояний от центров первого и второго колёс задней тележки до кузова вагона. В настоящее время вагоны-путеизмерители работают хордальным методом (от хорды).

В таблице 1.10 представлены размеры отступлений в зависимости от установленных скоростей.

Таблица 1.10 – Отступления по уровню, перекосам и просадкам

Установленная скорость движения поездов (пасс/груз), км/ч	Степень отступления	Размеры отступлений, мм			
		уровень	перекосы	просадки	Разность стрел <sup>1</sup>
120-140/80-90	I	до 6	до 8	до 10	до 10
	II	6-16	8-12	10-15	10-20
	III	16-20	12-16	15-18	20-25
	IV	Более 20	Более 16	Более 18	Более 25
60-120/60-80	I	до 8	до 10	до 10	до 15
	II	8-20	10-16	10-18	15-25
	III	20-25	16-20	18-20	25-35
	IV	Более 25	Более 20	Более 20	Более 35
40-60	I	до 10	до 12	до 12	до 20
	II	10-25	12-20	12-25	20-35
	III	25-30	20-25	25-30	35-50
	IV	Более 30	Более 25	Более 30	Более 50
15-40	I	до 12	до 14	до 15	до 25
	II	12-30	14-25	15-30	25-50
	III	30-35	25-30	30-35	50-65
	IV	Более 35	Более 30	Более 35	Более 65
15	I	до 15	до 16	до 18	до 30
	II	15-35	16-30	18-35	30-65
	III	35-50	30-50	35-45	65-100
	IV	Более 50	Более 50	Более 45	Более 100

Следует отметить, что уже в инструкции [12] был внесен ряд изменений. Эти изменения позволили применить данные, получаемые путеизмерительными вагонами на базе путеизмерителей ЦНИИ-2, контролирующие и записывающие ряд параметров рельсовой колеи, а именно: ширина колеи, положение рельсовых нитей по уровню, просадки рельсовых нитей, положение пути в плане.

<sup>1</sup> При измерении стрел в середине хорды длиной 20 м.

Согласно инструкции [12], отклонения рельсовых нитей по уровню делятся на плавные отклонения и перекосы пути. К перекосам пути относятся резкие изменения положения рельсовых нитей по уровню в разные стороны при расстоянии между вершинами записи амплитуд отклонений 20 м и менее. К перекосам также относятся и его ветви по 5 м за вершинами перекосов.

Как было отмечено [12], просадки рельсовых нитей – это короткие просадки или бугры рельсовых нитей в продольном направлении. Величина просадки формируется из амплитуд ее записи на ленте. В таблице 1.11 представлены величины отступлений по уровню, перекосам и просадкам.

Таблица 1.11 – Величины степеней отступлений по уровню, перекосам, просадкам

Установленная скорость движения поездов (пасс/груз), км/ч	Степень отступления	Размеры отступлений, мм		
		уровень	перекосы	Просадки
120-140/80-90	I	6	8	10
	II	16	12	15
	III	20	16	18
	IV	Более 20	Более 16	Более 18
60-120/60-80	I	8	10	10
	II	20	16	20
	III	25	20	25
	IV	Более 25	Более 20	Более 25
40-60	I	10	12	12
	II	25	20	25
	III	30	25	30
	IV	Более 30	Более 25	Более 30
15-40	I	12	14	15
	II	30	25	30
	III	35	30	35
	IV	Более 35	Более 30	Более 35
15	I	15	16	18
	II	35	30	35
	III	50	50	45
	IV	Более 50	Более 50	Более 45

В 2000 г. были утверждены технические указания ЦПТ-55/22 [13], согласно которым используются вагоны-путеобследовательские станции (ВПС) ЦНИИ-4 для решения ряда задач, к числу которых относятся: оценка соответствия фактических параметров состояния и устройства пути установленным скоростям, оценка изменения состояния геометрии рельсовой колеи во времени, выявления отступления рельсовой колеи от норм содержания. В процессе поездки ВПС ЦНИИ-4 определяются параметры: ширина рельсовой колеи, просадки рельсовых нитей, взаимное положение рельсовых нитей по высоте, перекосы пути на базе тележки и кузова, а также ряд других параметров.

Согласно техническим указаниям [13] к просадкам рельсовых нитей относятся неровности рельсовых нитей в продольной плоскости от 2 до 6 м. Определяются с помощью датчиков по каждой рельсовой нити по разности вертикальных перемещений ходовых колес относительно кузова.

Взаимное положение рельсовых нитей по уровню определяется с помощью инерциальной навигационной системы по наклону кузова вагона к плоскости горизонта и двух датчиков вертикальных перемещений букс относительно кузова, определяющих наклон цилиндрической колесной пары относительно кузова вагона в поперечной плоскости.

Короткие перекосы на базе тележки пропорциональны углу между осями 3й и 4й колесных пар в вертикальной поперечной плоскости, описывают неровности длиной до 5 м, вызывающие непараллельность колесных пар тележки. Определяются с помощью 4-х датчиков, установленных на нектловой тележке.

Длинные перекосы на базе кузова пропорциональны углу между осями 1й и 4й колесных пар в вертикальной поперечной плоскости. Описывают крутизну отвода уровня и неровности длиной до 30 м. Определяются с помощью 4-х датчиков.

Анализ инструкции [14] 2019 года и инструкции [15] 2020 года, показал, что инструкция регламентирует порядок контроля, автоматизированной расшифровки, оценки и регистрации геометрических параметров рельсовой колеи, принимаемых мер по обеспечению безопасности движения поездов при проверке состояния

рельсовой колеи с номинальной шириной 1520 (1524 мм) на сети железных дорог ОАО «РЖД» путеизмерительными средствами, кроме путеизмерителей на базе ЦНИИ-2, осевой нагрузкой на путь от 5 до 20 тонн: путеизмерительными вагонами всех типов, путеобследовательскими станциями и лабораториями, автомотрисами, диагностическими поездами.

Согласно [14, 15] вагонами-путеизмерителями контролируются, регистрируются и оцениваются следующие параметры:

- ширина колеи (сужения и уширения);
- положение рельсовых нитей по уровню (перекосы и отклонения уровня);
- положение рельсовых нитей в плане (горизонтальные стрелы изгиба от хорды длиной 21,5 м в точке, расположенной на расстоянии 4,1 м от ее конца) – рихтовка;
- просадки рельсовых нитей в вертикальной плоскости (стрелы изгиба рельсовых нитей от хорды длиной 17 м в точке, расположенной на расстоянии 2,7 м от ее конца);
- сочетания отступлений по рихтовке с перекосами и просадками, параметры устройства кривых в плане и по возвышению наружного рельса;
- длинные неровности в плане и профиле (на участках скоростного движения поездов).

Как показывают нормативы, приведенные в инструкциях [14, 15] к перекосам относятся отклонения по уровню от нулевой линии при расстоянии между вершинами (экстремальными значениями) отклонений до 20 м; они оцениваются в зависимости от величины отклонения и его длины. Отклонение от нулевой линии длиной более 20 м и до 30 м оценивается как перекос с величиной, измеренной на расстоянии 20 м от той из вершин, где величина перекоса наибольшая.

К отклонениям по уровню от проектной (паспортной) величины относятся отклонения средней линии уровня от паспортной линии в одну сторону длиной не менее 20 м. К отклонениям уровня от нулевой линии относятся отклонения фактического уровня от нулевой линии в одну сторону.

Приведенные нормативы (таблица 1.12) для оценки перекосов и отклонений по уровню от нулевой и паспортной линий позволяют определять просадки рельсовых нитей, характеризующие неровности железнодорожного пути в продольном направлении, которые определяются по каждой рельсовой нити как половина разности пиковых значений стрелы изгиба от хорды длиной 17 м. Изгиб рельсовых нитей определяется под нагрузкой, по вертикальным перемещениям ходовых колес относительно кузова путеизмерителя.

Таблица 1.12 – Степени отступлений по перекосам и уровню

Установленная скорость пассажирских / грузовых поездов, км/ч	Степень	Величина отклонения уровня, мм		Величина перекоса, мм	
		От нулевой линии	От паспортной линии <sup>1)</sup>	Длиной до 10 м	Длиной более 10 м до 20 м
121 – 140 / до 90	I	от 8 до 10	от 8 до 10	от 7 до 9	
	II	до 16	до 16	до 12	
	III	до 20	до 20	до 14	до 16
	IV	более 20	более 20	более 14	более 16
101 – 120 / 81-90	I	от 8 до 11	от 8 до 11	от 9 до 10	
	II	до 18	до 18	до 14	
	III	до 25	до 25	до 16	до 20
	IV	более 25	более 25	более 16	более 20
61 – 100 / 61-80	I	от 9 до 12	от 9 до 12	от 10 до 12	
	II	до 20	до 20	до 16	
	III	до 25	до 25	---	до 20
	IV	более 25	более 25	более 16	более 20
60 и менее	I	от 11 до 16	от 11 до 16	от 11 до 16	
	II	до 25	до 30	до 20	
от 41 до 60	III	до 30	до 40	до 25	
от 16 до 40		до 35		до 30	
15		до 50		до 50	
от 41 до 60	IV	Более 30	Более 40	Более 25	
от 16 до 40		Более 35		Более 30	
15 (закрытие движения)			Более 50	---	Более 50

Величина просадки длиной до 6 м включительно определяется суммой амплитуд двух полуволн, оценка производится по нормативам таблицы 1.13. Просадки длиной более 6 м до 10 м оцениваются по максимальной величине, на расстоянии 6 м от той из вершин, где величина просадки наибольшая.

Таблица 1.13 – Степени отступлений по просадкам

Установленная скорость пассажирских/ грузовых поездов, км/ч	Степень	Величина просадки, мм
121 – 140/ до 90	I	от 10 до 11
	II	до 15
	III	до 20
	IV	более 20
101 – 120/ 81-90	I	от 10 до 12
	II	до 18
	III	до 25
	IV	более 25
61 – 100 / 61-80	I	от 12 до 14
	II	до 20
	III	до 25
	IV	более 25
от 41 до 60	I	от 12 до 16
	II	до 25
	III	до 30
	IV	более 30
40 и менее	I	от 12 до 16
от 16 до 40	II	до 30
15		до 35
от 16 до 40	III	до 35
15		до 45
от 16 до 40	IV	более 35
15 (закрытие движения)		более 45

Стоит отметить, что все эти параметры относятся к движению грузовых поездов, состоящих из 2-х и 4-х осных вагонов для скоростей движения 80-90 км/ч.

Скоростное движение потребовало оценки длинных неровностей пути в плане и профиле, согласно требованиям [16]. Стоит отметить, что длинные неровности пути в профиле и в плане относятся к характеристикам устройства пути. Они вызваны нарушениями при проектировании и выполнении работ по ремонту пути, а также осадками земляного полотна.

Согласно инструкциям [14, 15] оценка неровностей в плане и профиле длиной до 200 м, влияет на плавность хода скоростных поездов. При движении по длинноволновым неровностям должно обеспечиваться не превышение величин, при которых расчетное динамическое ускорение вызываемое ими, достигает значения  $0,2 \text{ м/с}^2$ . Необходимо отметить, что в [16], отмечая норматив  $0,2 \text{ м/с}^2$ , речь идет о неровностях в плане длиной от 40 до 200 м. Исходя из этого значения, были произведены расчеты, для определения величин неровностей указанных в [14,15], приведенных в таблицах 1.14-1.16, которые позволили определить изменение ускорений от увеличения амплитуды неровности по стандартной формуле вида (1.1) для расчета непогашенного ускорения ( $a_{\text{нп}}$ ).

$$a_{\text{нп}} = \frac{V^2}{13 \cdot R} - 0,00163 \cdot h, \quad (1.1)$$

где:  $V$  – скорость, км/ч;

$R$  – радиус кривой, м;

$h$  – высота возвышения, мм.

Таблица 1.14 – Значения параметров стрелы изгиба при  $a_{\text{нп}}$ ,  $\text{м/с}^2$  при длине неровности 70 м

	При скорости движения, км/ч			
	140	160	180	200
$R$ , м	7538,46	9846,15	12461,54	15384,62
$f$ , мм	81,3	62,2	49,2	39,8
EN 13848, мм		>33	>33	>33



Таблица 1.15 – Значения параметров стрелы изгиба при увеличении параметра  $f$  на 5 мм

	При скорости движения, км/ч			
	140	160	180	200
$f$ , мм	86,3	67,2	54,2	44,8
$R$ , м	7111,76	9116,81	11328,67	13675,21
$a_{нп}$ , м/с <sup>2</sup>	0,212	0,216	0,220	0,225
EN 13848, мм		>33	>33	>33

Таблица 1.16 – Сравнение  $a_{нп}$  м/с<sup>2</sup> при увеличении  $f$  на 5 мм

	При скорости движения, км/ч			
	140	160	180	200
Начальное $a_{нп}$ , м/с <sup>2</sup>	0,2	0,2	0,2	0,2
Пересчитанное $a_{нп}$ , м/с <sup>2</sup>	0,212	0,216	0,220	0,225
Увеличение, %	6	8	10	12,5

Следует обратить внимание, что в приказе [17] были установлены критерии, устанавливающие допустимые скорости движения и использующие показатели взаимодействия пути и подвижного состава. Одним из таких показателей было вертикальное ускорение кузова, для груженого пассажирского вагона, оно соответствовало  $0,2g$ . Необходимо обратить внимание, что в нормах [18] данный показатель уже отсутствует. Анализируя дополнительные показатели динамических качеств подвижного состава [18], можно отметить, что из всех показателей остались только значения коэффициента вертикальной динамики второй степени подвешивания для пассажирских вагонов, который соответствует  $0,2$ .

Таким образом согласно инструкциям [14, 15], количественными характеристиками длинных неровностей являются: величина неровности –  $A$ , крутизна отвода величины неровности –  $i_{нер}$ .

Величины неровностей  $A$  для каждого диапазона длин имеют пороговые значения:  $A_l$  – предельно допустимая величина, при превышении которой

требуется обследование на месте и последующая выправка пути,  $A_2$  – величина, при превышении которой производится выправка пути в плановом порядке.

Нормативы [14,15] по оценке длинных неровностей плана и профиля приведены в таблице 1.17.

Таблица 1.17 – Нормативы длинных неровностей в плане и профиле

Параметры	Характеристики неровностей в зависимости от скорости, км/ч			
	121 – 140	141 – 160	161 – 200	201 – 250
Длина неровностей (м)	До 70	До 100	До 150	До 200
Величина дополнительного ускорения, вызываемого неровностями в профиле / плане, м/с <sup>2</sup>				
Неровности, требующие срочной выправки или снижения скорости движения поездов	Более 0, 25 / 0,15			
Неровности, требующие выправки в плановом порядке	0, 15 / 0,1			

Анализ инструкций [14, 15] показал, что инструкция может быть применима к участкам высокоскоростного движения, а поскольку высокоскоростное движение реализуется на одном направлении (линия Москва – Санкт-Петербург), применение для остальных участков имеет значительные ограничения.

Анализируя нормативную документацию, стоит обратить внимание на работу [19], в которой автор обращает внимание на то, что же является конечным продуктом путеизмерителя (оценка километра пути). Отмечено, что для оценки важен не весь километр, а конкретное место, где зафиксировано отклонение в геометрии рельсовой колеи, влияющее на безопасность движения.

Анализ нормативной документации [8-15] показывает, что оценка пути по неровностям продольного профиля не производилась, в инструкциях [14, 15] заложены предпосылки для оценки пути по этим критериям, но также есть вопросы с определением этих параметров. Как показывает анализ, в нормативной документации заложена концепция на оценку единичных отступлений превосходящий определенный уровень, который соответствует предельному с точки зрения безопасности движения, но не показывает общей картины.

## 1.2 Зарубежный опыт получения параметров геометрии рельсовой колеи

Для получения исходной информации широко используются автоматические средства регистрации и расшифровки измеряемых параметров пути на базе бортовых ЭВМ. В ряде случаев производится измерение показателей взаимодействия пути и подвижного состава.

Стоит отметить, что на зарубежных железных дорогах проблеме оценки состояния пути уделяется большое внимание. Европейские нормативы [20, 21] предусматривают учёт значительно более широкого диапазона неровностей (таблица 1.18), которые при высоких скоростях оказывают существенное влияние на динамику подвижного состава.

Таблица 1.18 – Диапазоны неровностей продольного профиля (просадки)

Диапазон	Диапазон неровности, м
D1	$3 < \lambda < 25$
D2	$25 < \lambda < 70$
D3	$70 < \lambda < 150$

Диапазон D3 с длиной неровностей до 150 м, используемых для измерения отклонения геометрии рельсовой колеи посредством больших длин волн. Обычно этот диапазон используется только для линейных скоростей свыше 250 км/ч.

Для получения данных о неровностях продольного профиля можно использовать данные проходов вагонов-путеизмерителей с инерциальными системами измерения, применяя различные методы программного обеспечения позволяющего преобразовывать выходные данные путеизмерителей [22-27] с последующим получением параметров неровностей продольного профиля.

В работе [22] было выявлено, что причиной колебаний подвижного состава на скоростных магистралях Японии, являются неровности пути с длиной волны 40-60 м. При существующем методе измерения профиля пути с 10 метровой хордой обнаруживается лишь часть неровностей с большой длиной волны.

Исследования, проводимые на железных дорогах Нидерландов [23] показали, что с помощью путеизмерителя, основанного на французской системе Mauzin можно получать данные неровностей в диапазоне от 2 до 16 м, а при использовании специальных методов обработки данных, основанных на преобразовании Фурье, можно получать параметры неровностей в диапазоне 16–35 м.

Исследования [24] показали, что длина волны неровностей пути в вертикальной плоскости тесно связана с колебаниями тележек и изгиба кузова вагона. Это позволило разработать и внедрить в 1983 г. на Нидерландских железных дорогах систему регистрации и измерения основных параметров пути на базе стандартного вагона-путеизмерителя BMS. Эта система имела ряд преимуществ перед французской системой Mauzin, поскольку в ней удалось применить бесконтактные инерционные датчики, что позволило увеличить диапазон измерения длинноволновых неровностей до 70 метров.

На железных дорогах ФРГ в 90-х гг. использовался путеизмерительный вагон OMWE [26], который позволял производить бесконтактные измерения геометрии рельсовой колеи на скорости до 280 км/ч, в том числе неровностей с длиной волны более 40 м. Для более точного отображения геометрии рельсовой колеи был использован инерционный принцип измерения. В координатах инерционной системы по измеренным величинам ускорений, после их двойного интегрирования, можно получить положение регистрирующего датчика. При регистрации расстояния между датчиком и рельсом можно получить и пространственное положение точки измерения на рельсе.

В работе [27] обращалось внимание на то, что безопасность движения и плавность хода подвижного состава во многом зависят от фактического состояния пути, которое в результате интенсивной эксплуатации подвергается постоянным неблагоприятным воздействиям, снижающим его качества. Следует отметить, что положение пути в плане и профиле следует проверять через установленные промежутки времени и оценивать их геометрическую точность, влияющую на беспрепятственный и плавный ход подвижного состава, а также на стабильность верхнего строения пути.

Исследования [28] позволили отметить, что наличие неровностей пути вызывает рост силового воздействия со стороны подвижного состава с увеличением сил в нижней части неровностей и снижением на вершинах. Вследствие чего возрастает неравномерность осадок балласта и основной площадки земляного полотна.

В работе [29] профессор Е.С. Ашпиз указал степень расчетных величин упругих осадок, определяющихся сравнением с нормируемыми значениями упругих осадок в зависимости от скорости движения (таблица 1.19).

Таблица 1.19 – Нормируемые значения упругих осадок

Максимальная скорость движения по участку, км/ч	160	200	250
Нормируемое значение упругой осадки, мм	3,8	3,4	3,0

Таким образом, данные, приведенные в таблице 1.19, позволяют использовать величину осадок пути для фиксирования их появления на ранней стадии, что позволит обеспечить своевременное выполнение работ.

Исследования [30] позволили отметить, что определенное поведение нижнего строения пути, а именно земляного полотна, может привести к длинноволновым деформациям пути, что особенно актуально для участков с высокой интенсивностью движения и высокой эксплуатационной скоростью движения.

Профессором Е.С. Ашпизом в работе [29] отмечалось, что при длительной эксплуатации земляного полотна могут возникнуть сложности с разделением слоёв (балластным и грунтами земляного полотна). На данный процесс также указывал и профессор В.О. Певзнер [31] отмечая, что происходит процесс вдавливания щебня в тело основной площадки земляного полотна, что подтверждено в ходе испытаний вагонов с повышенными осевыми нагрузками. В результате этого возникают деформации, способствующие образованию неровностей продольного профиля.

Таким образом, для приведения системы технического обслуживания пути в соответствие с современными условиями эксплуатации, необходимо расширять подходы к системе мониторинга состояния пути в соответствии со специализацией линий и расширить существующие методы наблюдения за состоянием пути, что в

свою очередь требует внесения изменений и дополнений в действующую нормативную базу оценки и содержания железнодорожного пути.

### **1.3 Влияние накопления остаточных деформаций пути**

При наличии деформаций пути необходимо учитывать, что типовые конструкции пути имеют необходимый запас прочности для недопущения их разрушения под поездами. Железнодорожный путь, в отличие от искусственных сооружений, работает в условиях накопления местных пластических деформаций во всех его элементах, поскольку напряжения, возникающие в балластном слое и земляном полотне значительно меньше предельной величины по обеспечению устойчивости разрушению.

В 1931 году Б.Н. Сергеевым было установлено [32], что однократный пропуск тяжеловесного состава не нарушал прочности элементов верхнего строения пути и проходил без особых последствий, но при постоянном обращении таких поездов, в особенности при большом количестве пар поездов, возникали значительные расстройства общего состояния пути. Так как остаточные деформации пути происходят не только под паровозом, но и под большегрузными вагонами, вызывающими просадки того же порядка, для таких деформаций наиболее правильным показателем должен быть пропущенный тоннаж на участке. При разрешении практических вопросов нельзя пренебрегать неизбежными в пути неупругими, остаточными деформациями. Необходимо отметить, что игнорирование этих показателей неминуемо ведет к неверным выводам и противоречащим фактам. В исследованиях [33] отмечалась необходимость в своевременном устранении остаточных деформаций, иначе путь быстро приходит в состояние, при котором возникает прямая опасность, способствующая возникновению излома рельса, на что также обращал внимание профессор Г.М. Стоянович [34].

Специалистами ГДР [35] было отмечено, что ухудшение состояния пути зависит не только от действующих на путь сил и конструкции верхнего и нижнего строения, а также от вида неровностей, оставшихся после производства ремонтных работ. Причём важное значение имеет не только амплитуда, но и форма неровностей.

Надежность основания пути оказывает решающее влияние на поддержание его устойчивости и заданных геометрических параметрах. В тех случаях, когда силы, обусловленные поездной нагрузкой, не гасятся в достаточной мере основанием пути и нижерасположенными грунтами, возникает необходимость восстановления земляного полотна [36]. Многие проблемы, связанные с текущим содержанием и модернизацией пути на европейских железных дорогах, которые предстоит решать в настоящее время, являются следствием неудовлетворительного качества земляных работ, проведенных более 100 лет назад, а также роста осевых нагрузок и скоростей движения. В процессе эксплуатации железных дорог осевая нагрузка и скорость движения постоянно увеличивались. В Германии с 1835 по 1910 гг. осевая нагрузка увеличилась с 2 до 14 тс, а скорости с 25 до 100 км/ч, что привело к деформациям и другим нарушениям несущей способности пути [27], а в работе Б.А. Евдокимов [37] обратил внимание, что важно учитывать не столько сами остаточные деформации, сколько их неравномерность по длине пути.

В 1984 году в работе [38] отмечалось, что в результате увеличения нагрузки на путь на некоторых участках Британских железных дорог, которые ранее были стабильными стали проявляться расстройство пути и остаточные деформации, что требовало проведения дополнительных путевых работ. Основной причиной данных явлений оказалось то, что в земляном полотне возникали превышающие предельные значения напряжений, по условию устойчивости грунтов.

Исследования [39] позволили авторам обратить внимание на то, что балластный слой и земляное полотно в конструкции железнодорожного пути являются относительно слабыми элементами. Их недостатки вызывают нарушения геометрических параметров пути. При осадке рельсошпальной решётки различают две фазы: начальную и консолидации. Для сохранения длительной стабильности

пути большое значение имеет процесс осадки на начальном этапе. В фазе консолидации ухудшение положения пути в основном зависит от давления на балластный слой. Превышение допустимой нагрузки приводит к проникновению грунта в балластный слой, вследствие чего геометрия пути быстро ухудшается.

Исследования [40] показали, что большая часть существующей железнодорожной инфраструктуры Германии была построена в XIX в., и качество пути на большей части линий не соответствовало современным требованиям. Большое значение придается сохранению существующей инфраструктуры, так как реконструкция существующих и строительство новых дорог достаточно сложны и требуют больших затрат из-за ограниченных возможностей использования дополнительных площадей для их строительства. В связи с этим производилось целенаправленное устранение повреждений в основании пути, вызывающие ограничения движения поездов, что позволило увеличить срок службы пути и гарантировало оптимальную плавность хода подвижного состава. Авторы указывали, что необходимо анализировать данные на базе численного моделирования в соответствии с результатами измеряемых сил, чтобы определять локальную неустойчивость пути заблаговременно и без больших затрат. Например, локальная деформация на ранних этапах определяется как короткая неровность пути продольного профиля в диапазоне 3-25 м при относительной просадке пути под действием поездной нагрузки [40]. С повышением скоростей движения возрастает динамическое воздействие на всю конструкцию пути, что может спровоцировать более интенсивное распространение колебаний внутри железнодорожного полотна. Было выявлено, что при беспорядочном заполнении мест осадки земляного полотна щебнем смещается опора постели шпал, в результате чего происходит сконцентрированная локальная передача сил на нижнее строение пути, что приводит к увеличению пластических деформаций, вызывающих еще большее оседание шпал по мере возрастания поездной (в том числе осевой) нагрузки. Взаимодействие колеса и рельса зависит от комплекса локального дефекта в пути (наличия в пути неровностей различной длины и величины), что в свою очередь приводит к увеличению упругих и пластических



деформаций на основной площадке земляного полотна, увеличению нагрузки на рельсы вплоть до изломов. Причинами локального ухудшения пути (в зависимости от периода времени, когда возникают деформации) приведены в таблице 1.20 [40]. По причине таких конструктивных недостатков, как отсутствие защитных слоев, слабое уплотнение земляного полотна, а также в результате некачественных работ по текущему содержанию и ремонту пути, за короткий период времени между осмотрами деформации могут значительно увеличиться. Положение пути ухудшается медленно, в том случае, если медленно растут деформации основной площадки земляного полотна.

Таблица 1.20 – Ухудшение состояния пути во времени и его причины

Причины	Ухудшение состояния пути	
	Короткий период	Длительный период
Избыточные нагрузки	–	Повышение осевых нагрузок, увеличение кол-ва поездов, повышение скоростей движения, изменение типа/конструкции подвижного состава
Конструкционные недостатки	Неправильный расчет конструкции, недоброкачественное производство работ, отсутствие защитных слоёв	Неправильный расчет системных компонентов, недоброкачественное производство работ, неравномерная жесткость земляного полотна
Характер выполнения работ текущего содержания пути	Неудовлетворительное качество дренажных работ	Дефекты пути и подвижного состава, отсутствие или некачественная выправка пути, отсутствие или некачественная очистка балласта

Исследования [41] проведенные на британских железных дорогах, установили тенденцию повторного появления расстройств железнодорожного пути в вертикальном профиле, на которые мало влияло проведение ремонтных работ

разной сложности. Причина таких деформаций пути оказалась в качестве выполняемых работ при строительстве или капитальном ремонте.

Применительно к условиям работы Российских железных дорог, профессор З.Л. Крейнис отмечал, что на многих участках Транссиба при строительстве в целях экономии ширина основной площадки земляного полотна принималась 4,6 м [42].

Доктором технических наук С.П. Першиным отмечалось [43], что традиционная оценка прочности пути сравнением с допускаемыми величинами напряжений во всех его элементах, имевшая важное значение при явной слабости конструкции по отношению к действующей на неё осевой нагрузке, никогда не преследовала цели внедряться в область эксплуатации. При расчетах рассматривалась единая нагрузка от локомотива или вагона, конструкционная скорость и, если прочность обеспечивается, то это считается залогом нормальной работы пути определенное время. Однако путь претерпевает не только упругие, но и накапливающиеся остаточные деформации, для устранения которых требуются дополнительные затраты на текущее содержание.

Профессором М.Ф. Вериго был описан эксперимент накопления остаточных деформаций балластного слоя под шпалой при действии повторяющихся нагрузок [44]. Эти исследования показали, что по мере повторения приложения нагрузки происходит накопление остаточных деформаций в балластном слое и изменение изгибающих моментов, в результате чего возникают напряжения изгиба. В полном соответствии с теоретическими исследованиями остаточные деформации основания и изгибающие моменты, изменяясь, асимптотически приближаются к предельному значению. Исследования показали, что при приложении пульсационной нагрузки возможны различные расстройств балластного слоя в различных точках опирания шпалы. Причинами таких деформаций могут служить неровности [45].

Кандидат технических наук В.С. Лысюк в работе [46] указывал, что балластная призма – это зернистая среда, и её сопротивление поездным нагрузкам проявляется в основном через контактные деформации зерен, а также через силы

трения и зацепления между ними. При этом в местах контактов зерен образуются пластические деформации, износ и разрушения, что является одной из причин накопления остаточных деформаций рельсошпальной решетки, на что также обращалось внимание в работе [47].

Исследования [48] показали работу глинистых грунтов железнодорожного земляного полотна под влиянием вибродинамических воздействий поездной нагрузки. Было отмечено о снижении прочности при поездной нагрузке и восстановлении уровня прочности при её отсутствии. При этом если интервалы между поездами меньше, чем время необходимое для восстановления нарушенной прочности (упругая осадка), то земляное полотно будет работать в стадии недостаточной прочности, что будет способствовать образованию недопустимых деформаций. Проведенные исследования позволили установить, что при проходе грузового поезда массой 3800-4500 т со скоростью 70-80 км/ч, прочность глинистых грунтов при влажности более 30% может снизиться на 40-45%, порожние грузовые поезда снижают прочность грунтов в среднем на 15-21%, пассажирские на 8-16%. Восстановление нарушенной прочности грунтов протекает интенсивно в первые минуты после прохода поезда, но первоначальный уровень достигается спустя 60-75 минут. Исследования [49] проводимые профессором Г.М. Стояновичем, подтвердили, что повторяемость приложенной малой нагрузки способствует деформациям в большей степени, чем разовое приложение большей нагрузки. Проведенные исследования [50] позволили выявить, что большая интенсивность движения поездов в сочетании с другими отрицательными факторами (повышенная влажность грунтов, высокие скорости движения, повышенные осевые нагрузки) может быть источником возникновения и развития недопустимых деформаций железнодорожного пути.

С похожей проблемой [51] столкнулись на железной дороге Shuo Huang в Китае, занимающей пятое место по общей протяженности 1765 км и принадлежащей крупнейшей в КНР угледобывающей компании Shenhua Group. В 2009 г. для увеличения перевозимых объемов угля стали увеличивать длину поездов и долю вагонов с осевой нагрузкой 25 тс (эксплуатировались вагоны с

осевыми нагрузкой 20 и 23,2 тс). К середине 2013 г. железная дорога работала на пределе, пропуская по 115 пар поездов, включая 36 пар массой 10000 т. Чтобы поддерживать пропускную способность линии на нужном уровне, был разработан план повышения осевых нагрузок до 30 тс. Для этого была поставлена задача по усилению инфраструктуры для пропуска вагонов с осевыми нагрузками 30 тс, так как специалисты компании были уверены, что повышение допустимой осевой нагрузки, эксплуатации поездов большой длины и массы приведёт к ускоренному износу всех элементов инфраструктуры. Обследования показали удовлетворительные показатели состояния пути при эксплуатации 25 тс, но детальный анализ выявил проблемы, которые могут возникнуть при повышении осевой нагрузки до 30 тс. Одной из проблем, являлось состояние земляного полотна на ряде участков в силу неблагоприятных геологических условий, отличающихся нестабильностью и постепенным ухудшением характеристик. По оценке специалистов, железная дорога Shuo Huang была готова к эксплуатации вагонов с осевой нагрузкой 30 тс, но недостаточно для длительной стабильной работы, что полностью подтверждает исследования [34, 49].

Проведенные во ВНИИЖТ исследования [52] показали, что между величиной нагрузки на ось вагона и упругими деформациями земляного полотна существует практически линейная зависимость. Интенсивность силовых воздействий нагрузки на земляное полотно характеризуется величиной напряжений и деформаций, скоростью нагружения и деформирования грунтов, повторяемостью нагрузок, уменьшается с глубиной и практически линейно возрастает с повышением скоростей движения.

Профессор Г.Г. Коншин указывал [53] на опыт эксплуатации отечественных железных дорог в 70-80-х гг. прошлого столетия, когда в условиях интенсификации перевозочного процесса и повышения осевых нагрузок количество участков с деформациями земляного полотна неуклонно увеличивалось. Стоит отметить и увеличение количества участков с интенсивным накоплением остаточных деформаций из-за несоответствия плотности и сопротивления грунтов величинам максимальных динамических напряжений, что приводит к искажению профиля

пути и ведет к образованию углублений на основной площадке. Повышенные динамические воздействия подвижного состава при определенных условиях могут также привести к подвижкам откосов насыпей и увеличению упругих осадок земляного полотна.

Исследования, проведенные специалистами ДИИТа [54], позволили установить влияние осевой нагрузки вагонов на динамические показатели напряженно-деформированного состояния элементов пути на Приднепровской железной дороге, показали, что вагоны с осевой нагрузкой до 280 кН не вызывают напряжений и деформаций, превышающих допустимые и рекомендуемые в элементах пути с рельсами Р65 на деревянных шпалах и щебеночном балласте. Определяющим фактором при этом является не разовое воздействие вагонов с повышенными осевыми нагрузками, а усталостные процессы, являющиеся следствием длительного воздействия.

Исследования [55] показали, что на остаточные деформации пути существенное влияние оказывают условия его эксплуатации. Выявлять изменения остаточных деформаций железнодорожного пути можно экспериментальным путем с помощью геодезических или специальных инструментов, позволяющих в течение межремонтного периода через определенный период времени производить измерения деформаций. Увеличение динамического воздействия колес подвижного состава за счет повышения осевой нагрузки и числа циклов нагружения вызывает интенсивное расстройство железнодорожного пути. Расстройства железнодорожного пути рассматриваются как необратимые деформации, изменяющие геометрию рельсовой колеи. Исследования воздействия тяжеловесных поездов с вагонами с повышенными осевыми нагрузками в условиях Целинной железной дороги, показали, что на всех участках, где обращались поезда повышенного веса с повышенными осевыми нагрузками до 250 кН, деформации накапливаются быстрее. После пропуска 250 млн. т. брутто величина остаточных деформаций в 1,11 раза больше, чем на контрольном участке, где обращались поезда массой до 4000 т и осевой нагрузкой до 230 кН. После пропуска 492 млн. т брутто, эта разница возросла до 1,45 раза. Анализ работы [55] элементов верхнего

строения пути показал, что в начальный период эксплуатации (до пропуска 250 млн. т. брутто) интенсивность износа и выход их в дефектные невелик. Интенсивность износа элементов и выход в дефектные начинается после пропуска 400-500 млн. т брутто.

В 2003 году на специализированной угольной линии Датун – Циньхуандао в Китае проводились испытания по пропуску тяжеловесных поездов массой 10000 т [56]. Исследования показали, что воздействие динамических нагрузок на путь, возникающих при проходе поезда массой 10000 т весьма значительны, что подтвердило проводимые ранее исследования [48, 49]. В отдельных случаях предельно допустимые значения были превышены. При этом стали появляться остаточные деформации, но следует учесть, что это при проходе одного-двух поездов массой 10000 т, проход же достаточно большого количества поездов массой 10000 т может привести к тому, что большое количество параметров будут выходить за пределы допустимых значений.

В 2005 г. профессором В.О. Певзнером отмечалось [57], что соблюдение критериев прочности и устойчивости пути, которые устанавливают условия обращения подвижного состава, не исключает выхода из строя отдельных элементов верхнего строения пути, а главное, не ограничивает интенсивность накопления в нём расстройств и износов. Вследствие чего, должны быть разработаны показатели деформативности пути. В данном случае под деформативностью стоит понимать способность пути, работать при ограниченном до определенного предела в темпе нарастания амплитуд и количества остаточных деформаций.

Стоит отметить, что в большинстве вышеупомянутых исследованиях, оценка данных по численным величинам деформаций и характеристики образующихся неровностей не приводилось. На это обращал внимание профессор Е.С. Ашпиз [58] отмечая, что иногда происходит путаница между понятиями «мониторинг» и «диагностика» или их отождествление. Действующая система контроля состояния пути, включающая в себя в основном, периодические проверки геометрии рельсовой колеи, по сути, является системой диагностики, так как в ней

практически отсутствует функция накопления информации об изменении состояния во времени и анализе, оценивающем приближение к предельному состоянию. Профессором В.О. Певзнером было отмечено [59, 60], что система мониторинга состоит из следующих критериев:

- ретроспективного анализа;
- прогноз состояния пути;
- выработки управленческих решений;
- оценки эффективности принятых решений.

Мировой опыт [61] демонстрирует эффективность проведения работ по текущему содержанию, используя данные постоянного мониторинга данных, что позволяет воздействовать на состояние железнодорожного пути, применяя данные геометрии рельсовой колеи, получаемой путеизмерителями.

Одной из первых отечественных работ по оценке деформативности пути в реальных условиях эксплуатации были исследования [62] проведенные в отделение «Комплексных испытаний» ВНИИЖТ под руководством д.т.н. О.П. Ершкова. Было отмечено расстройства железнодорожного пути, которые не нормируются при эксплуатации. К таким расстройствам относится положение рельсовых нитей в вертикальной плоскости. При проходе путеизмерителей производилась проверка относительного положения рельсовых нитей в вертикальной плоскости, но не в сопоставлении с профильным их положением. Исследования позволили показать, что уклоны небольшой длины 5–20 м, могут достигать больших значений и превышать профильные уклоны, что способствует увеличению поездной нагрузки на путь, а это может оказывать влияние на режимы вождения грузовых поездов и способствовать увеличению тяговых расходов.

Целенаправленные исследования по накоплению деформаций пути при повышенных осевых нагрузках вагонов и весов поездов были проведены в 2014-2016 гг. на участке Ковдор – Пинозеро Октябрьской железной дороге [5].

Факт накопления осадок, под тяжеловесными поездами, установленный в ходе испытаний на участке Ковдор – Пинозеро – Мурманск [63, 5] показал, что эти осадки представляют собой длинные неровности, параметры которых изменяются

в процессе увеличения пропущенного тоннажа. Результаты этих исследований позволили выявлять наличие длинных неровностей, параметры которых изменялись и на которые накладывались относительно короткие неровности.

В работе [4] обращалось внимание, что цель расчётов по предельному состоянию второй группы – определить перемещения и деформации (упругие, остаточные), при которых гарантируется нормальная эксплуатация объектов и не снижается их долговечность. Испытания показали, что увеличение массы поездов с 4000 до 8000 т приводит к росту средних значений сил, действующих на рельсовую нить под составом на 6%.

В работах [5, 31, 64] отмечалось, что после пропуска 2 млн. т. брутто в вагонах с повышенной осевой нагрузкой за период с июня 2014 по октябрь 2015 гг. на участке Ковдор-Пинозеро, суммарная осадка на опытных участках составила от 8,5 до 12,8 мм. Также стоит обратить внимание на то, что в процессе нивелировок было выявлено наличие неровностей в продольном профиле длиной более 100 м, параметры которых не являются постоянными.

Полученные данные [5] позволили вывести формулу для расчёта коэффициента расстройства пути в зависимости от характеристик поездопотока (1.2):

$$K = \frac{P_{\text{баз}}(1-\alpha-\beta) \cdot c + \alpha \cdot P_{\text{пов}} \left( \frac{\sigma_{\text{пов}}}{\sigma_{\text{баз}}} \right)^n k + \beta \cdot P_{\text{баз}} \cdot k}{P_{\text{баз}} \cdot c}, \quad (1.2)$$

где:

$P_{\text{баз}}$  – базовая расчетная осевая нагрузка, принимается 23,5 т/с;

$P_{\text{пов}}$  – повышенная осевая нагрузка;

$\alpha$  – доля вагонов с повышенной осевой нагрузкой;

$\beta$  – доля вагонов в тяжеловесных поездах;

$n$  – показатель степени;

$k$  – коэффициент влияния тяжеловесных поездов;

$c$  – коэффициент приведения к средней осевой нагрузке на участках;

$\sigma_{\text{баз}}$  – напряжение в балласте под шпалой при базовой осевой нагрузке;

$\sigma_{\text{пов}}$  – напряжение в балласте под шпалой при повышенной осевой нагрузке.



При оценке влияния длинных неровностей на показатели динамики при скоростном движении необходимо отметить исследования [65,66]. Исследования [66], проводимые в ходе сертификационных испытаний электропоездов «Сапсан» [67]. Эти исследования позволили показать, что неровности продольного профиля, не выявляемые штатными средствами путеизмерения, как правило, вызваны деформациями подбалластного слоя и земляного полотна. Неровности пути в профиле в наибольшей степени оказывают влияние на колебания кузова вагона, что в ряде случаев приводит к резкому росту амплитуд колебаний кузова на пневмоподвешивании второй степени и касанию аварийных упоров.

В работе [68] отмечалось, что сложившаяся методика оценки пути базируется на определении величины неровностей рельсовых нитей, а реакции подвижного состава на неровности в плане и профиле имеют разную степень запаздывания относительно места их появления. При повышении скоростей движения это несоответствие увеличивается из-за различия частот вертикальных и боковых колебаний экипажей. В результате чего, приобретает большую ценность получение общей картины на определённом участке, а не отдельные всплески неровностей.

В работе [69] указывалось на недостатки Инструкции [8], в которой отсутствуют четкие определения основных понятий, что в свою очередь приводит к неоднозначной интерпретации результатов оценки состояния пути.

Принципиальным шагом в оценке геометрии рельсовой колеи с использованием спектральных методов оценки состояния пути являются работы [70-73]. Под руководством профессора А.Я. Когана, была разработана математическая модель для расчётов фоновой составляющей показателей напряженно-деформированного состояния пути, учитывающая взаимодействие при колебаниях галоупирования и подпрыгивания. В качестве возмущающей функции в этих моделях рассматривалась спектральная плотность неровностей пути в продольном профиле. Для получения использовался механизм записей просадок ЦНИИ-2, это позволяло учесть неровности в продольном профиле под нагрузкой, которые не фиксировались геодезическими измерениями не нагруженного пути.

Профессор Е.А. Ашпиз [29] отмечал, что для мониторинга и прогнозирования деформативности земляного полотна одним из способов является метод оценки земляного полотна на основе показателей вагонов-путеизмерителей, поскольку они регулярно контролируют геометрию рельсовой колеи на сети железных дорог, что позволяет на основе получаемой информации следить за деформативностью пути, учитывая, что основная функция земляного полотна определена именно в обеспечении стабильности верхнего строения пути. Рассматривая функцию просадок рельсовых нитей как функцию, описывающую случайный процесс, можно получить частотные характеристики, используя преобразование Фурье [74].

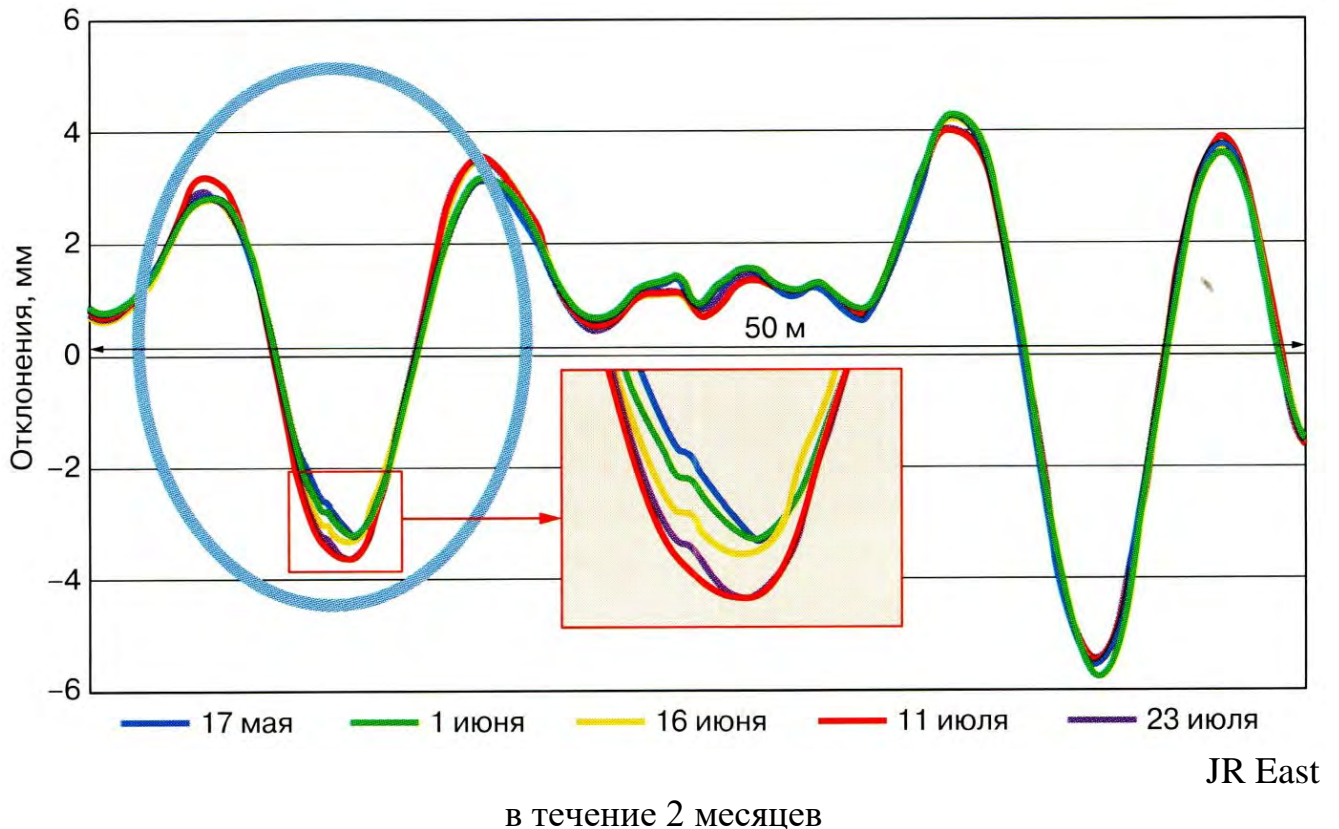
Процессы, описывающие вертикальные неровности пути и измеряемые серийным вагоном-путеизмерителем ЦНИИ-2 представляют собой первую разность положения рельсовых нитей в профиле, измеренную на базе ходовой тележки вагона [73] При этом характеристики неровностей для каждой рельсовой нити определяются отдельно.

Опыт применения и получения параметров неровностей продольного профиля обобщен в европейских нормативах [20, 21]. Как было отмечено в работах [29,75] для получения неровностей в профиле пути обычно используют данные проходов вагонов-путеизмерителей, которые используют геометрическую систему для промеров от хорды, образованной ходовыми колесами и измерительными роликами, и инерциальную систему, применение которой основано на двойном интегрировании ускорений кузова вагона и вычитании перемещения буксы относительно кузова [65]. Спустя 30 лет в работе [66], было подтверждено, что получение параметров натуральных неровностей возможно двумя методами:

- 1) с использованием преобразования Фурье и передаточных функций данных вагонов-путеизмерителей хордального типа [62,73,76];
- 2) с применением двойного интегрирования сигналов датчиков вертикальных ускорений установленных на необрессоренных частях подвижного состава [65, 77].

Компания East Japan Railway (JR East) в 2012 года начала разрабатывать новую концепцию текущего содержания и ремонта инфраструктуры [61], что

позволило перейти к проведению работ по текущему содержанию и ремонту железнодорожной инфраструктуры на основе данных постоянного мониторинга. На рисунке 1.3 представлен пример анализа данных за 2 месяца проведенной JR East, на котором отмечен процесс ухудшения параметров пути в продольном профиле.



Немецкие специалисты в работе [78], которая производилась в рамках проекта ЕС DynoTRAIN показала, что линейные зависимости между качеством геометрии пути и реакциями подвижного состава невозможна, так как при больших отклонениях в положении железнодорожного пути и высоких значениях реакций подвижного состава зависимости как раз нелинейная. Для описания отклонений в положении пути на фиксированном участке существует несколько методов. При этом в качестве основной переменной лучше использовать параметры изменения величины амплитуд, нежели длину волны и форму дефекта. Это позволяет в выбранном частотном диапазоне получать данные о частотных спектрах, возникающих при прохождении подвижного состава над дефектом. Для этого данные о геометрии пути преобразуют в частотную область через преобразование

Фурье. Однако следует отметить, что получаемый спектр не позволяет сделать выводы о местоположение тех или иных отступлений. Из этого следует, что для оценки сигналов, дающих представление о состоянии пути по его параметрам (амплитуда, длина волны, форма дефекта) необходимо исключить недостатки и одновременно использовать достоинства соответствующих методов.

Любое увеличение (скорости и массы поездов, повышение осевых нагрузок) влечет за собой сокращение ресурса пути. Чтобы поддерживать путь в исправном состоянии, необходимо вовремя принимать меры для оздоровления проблемных участков. Как отмечено выше, даже участки со стабильным состоянием имеют свои предельные границы при повышении масс поездов и осевых нагрузок. Это говорит о необходимости мониторинга состояния пути на участках обращения поездов повышенной массы и длины, в том числе из вагонов с повышенными осевыми нагрузками для определения деформативности пути. Но как было отмечено [79], сопоставление расчетных показателей напряженного состояния пути, полученных по Правилам расчета пути на прочность, с балльной оценкой соответствующих километров по просадкам и поперечному уровню по данным вагонов-путеизмерителей, сумма баллов слабо влияет на рассмотренные показатели деформативности пути. В работе [80] указывалось, что использование только геометрических характеристик отдельных неровностей не может дать полной оценки состояния пути, поскольку при одинаковой геометрии жесткость может быть существенно различной.

Приведенные данные показывают, что на отечественных железных дорогах не применяются стандартизированные методы оценки параметров неровностей продольного профиля и мониторинга состояния пути по параметрам таких неровностей. Следовательно, нет нормативов для получения и нормирования неровностей продольного профиля, в отличие от мирового опыта, где практикуется оценка состояния пути по параметрам неровностей продольного профиля для определения деформативности пути.

В первой главе рассмотрены и проанализированы вопросы оценки содержания железнодорожного пути по показаниям вагонов-путеизмерителей, изучен мировой

опыт определения геометрии рельсовой колеи. Рассмотрены вопросы влияния деформаций пути на динамическое взаимодействие подвижного состава.

## **ВЫВОДЫ ПО ПЕРВОЙ ГЛАВЕ**

Из вышеизложенного следует, что при действующих нормах оценки состояния геометрии рельсовой колеи в современных условиях при развитии тяжеловесного, скоростного и высокоскоростного движения необходимо использовать параметры неровностей продольного профиля для получения более полной картины состояния пути.

В данной работе рассмотрены вопросы апробации методов оценки деформативности пути по параметрам неровностей продольного профиля, полученным как по показаниям геодезической съемки, так и путем программного преобразования информации геометрии рельсовой колеи, получаемой со штатных средств диагностики.

## **ГЛАВА 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПУТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ДЕФОРМАТИВНОСТИ**

Для повышения провозной способности линий требуется повышение осевых или погонных нагрузок грузовых вагонов, внедрение тяжеловесных и длинносоставных поездов или строительство дополнительных путей и линий. Реализация повышения скоростей движения грузовых поездов приводит к возрастанию величины нагрузки на путь, а также продолжительности вибродинамического воздействия, передающегося грунтам земляного полотна. Эти эксплуатационные факторы способствуют интенсивному накоплению остаточных деформаций, особенно в неблагоприятных условиях. В местах более сильного воздействия колес вагонов и локомотивов, остаточные деформации накапливаются гораздо интенсивнее. Всё это оказывает влияние на расстройство пути в плане и профиле, вызывает уменьшение межремонтных сроков и увеличение объемов ремонтных работ, что в свою очередь приводит к снижению пропускной и провозной способности железнодорожных линий.

### **2.1 Способы оценки деформативности пути**

В статье [81] отмечено, что с марта 2016 г. в хозяйстве диагностики внедряются мобильные средства проверки состояния пути позволяющие регистрировать большое количество параметров пути. К 2016 году на сети дорог, используя данные средства диагностики, работало 14 вагонов-путеизмерителей, охватывая основные направления сети. Это позволяло рассчитывать на введение новых технологий контроля длинных неровностей, вызванных деформациями земляного полотна, на широком полигоне сети. Другим важным направлением работы является изменение действующих нормативных документов.

Согласно Европейским нормативам [20, 21], геометрия рельсовой колеи определяется как пространственное положение двух рельсов. Необходимо различать:

- спроектированная форма (геометрия пути или выравнивание пути);
- отклонение от проектного положения (неровности).

Последнее относится к «качеству геометрии пути». Часто используются другие термины «неровность пути» и «соосность пути».

Положение или геометрия пути могут быть описаны следующими характеристиками [82]:

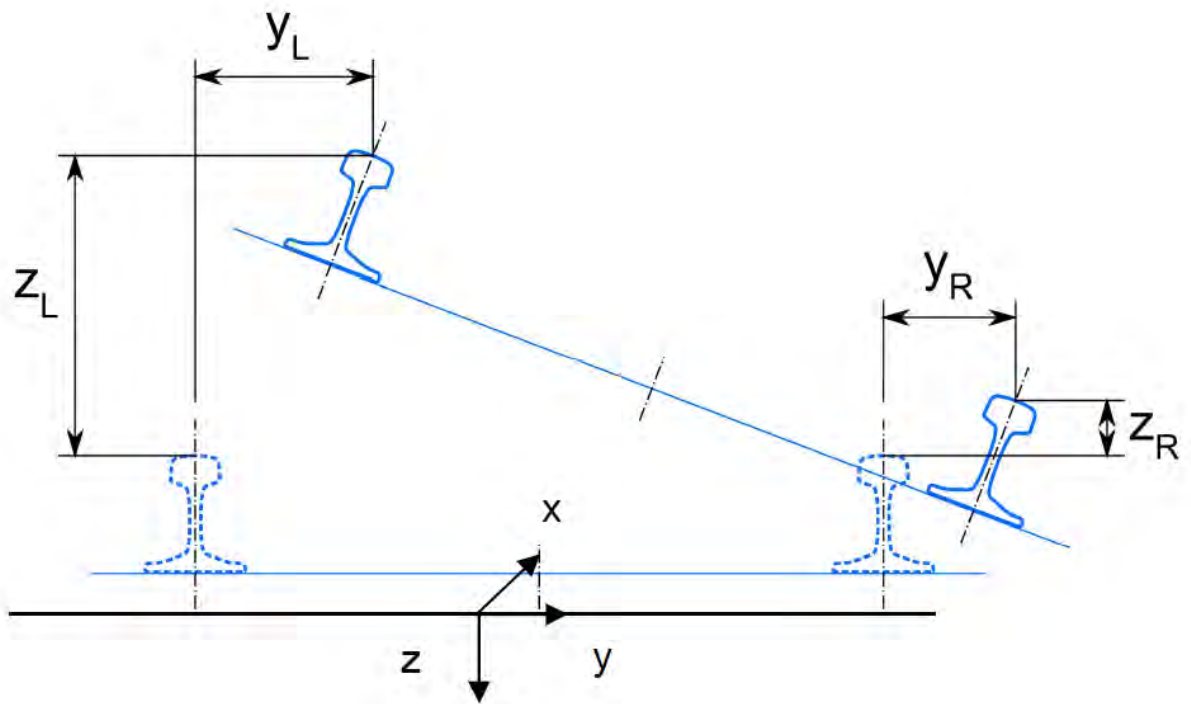
- шириной колеи;
- параметрами горизонтальных круговых кривых с определенным радиусом и наклоном;
- параметрами переходных кривых и сверхвысокими уклонами;
- продольным градиентом пути и вертикальными кривыми.

В нормах [83] описаны требования к параметрам выравнивания пути, нормы [84] охватывают кривые и переходные кривые, и сопоставимые расчетные ситуации выравнивания с резкими изменениями кривизны. Из этих нормативов следует, что железнодорожный путь определяется четырьмя величинами положения рельсов вдоль оси пути  $x$ :  $y_L(x)$ ,  $z_L(x)$  для левого и  $y_R(x)$ ,  $z_R(x)$  для правого рельса со ссылкой на выравнивание траектории конструкции [85] (рисунок 2.1).

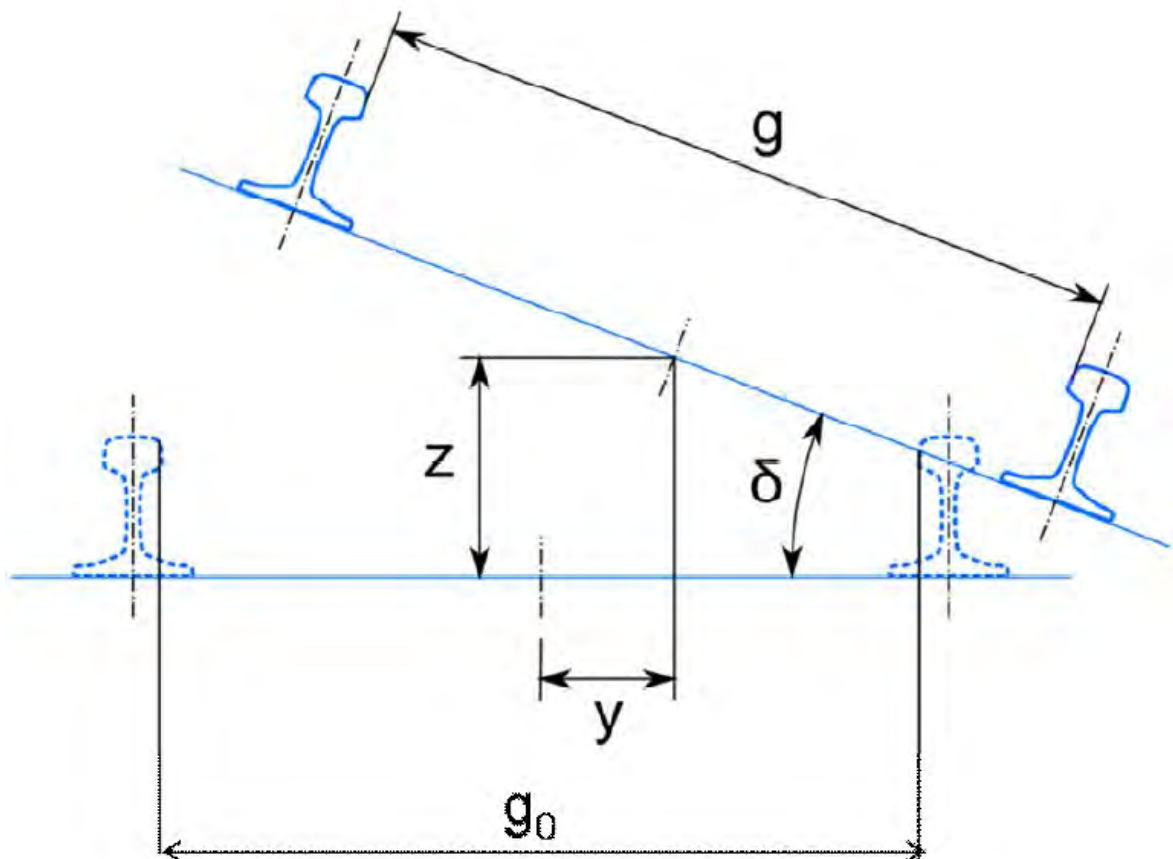
Так же стоит отметить четыре величины, определяющие положение рельсов вдоль оси пути  $x$ :  $y_L(x)$ ,  $z_L(x)$  для левого и  $y_R(x)$ ,  $z_R(x)$  правого рельсов со ссылкой на выравнивание траектории конструкции (рисунок 2.2).

Система координат рельса ориентирована с осью  $X$  в направлении движения,  $y$  параллельно рабочей поверхности и  $z$ , указывающие вниз на нормальную рабочую поверхность (рисунок 2.1).





Следует отметить, что положение рельсов также может быть определено и в так называемой системе координат железнодорожного пути, где пространственное положение рельсов связано с осью пути (рисунок 2.2).



Часто используемые термины не всегда четко относятся к одной из этих систем координат и соответствуют следующим терминам:

- продольный уровень (профиль вертикальной поверхности)  $z(x)$  центральной линии пути или  $z_L(x)$ ,  $z_R(x)$  двух рельсов;
- выравнивание  $y(x)$  центральной линии пути или  $y_L(x)$ ,  $y_R(x)$  двух рельсов;
- перекрестный уровень  $cl(x) = 2b_A \cdot \delta(x)$  поверхности катания;
- ширина колеи  $g(x)$ .

Обе системы координат эквивалентны [85], и могут легко описываться уравнениями типа (2.1-2.4):

$$z(x) = \frac{z_L(x) + z_R(x)}{2}; \quad (2.1)$$

$$y(x) = \frac{y_L(x) + y_R(x)}{2}; \quad (2.2)$$

$$\delta(x) = \frac{z_L(x) - z_R(x)}{2b_A}; \quad (2.3)$$

$$g(x) = g_0 + y_R(x) - y_L(x); \quad (2.4)$$

И уравнениями (2.5-2.8):

$$z_L = z(x) - b_A \delta(x); \quad (2.5)$$

$$z_R = z(x) + b_A \delta(x); \quad (2.6)$$

$$y_L(x) = y(x) + \frac{g_0 - g(x)}{2}; \quad (2.7)$$

$$y_R(x) = y(x) - \frac{g_0 - g(x)}{2}. \quad (2.8)$$

В работе [86] авторами отмечалось, что существующие нормативы, используемые на сети железных дорог ОАО «РЖД» очень сильно отличаются от европейских тем, что отечественные нормативы основываются на хордальных промерах (просадки, стрелы изгиба в плане) (рисунок 2.3), а европейские – помимо оценки при измерении от хорд характеризуют и сами неровности, получаемые с помощью передаточных функций, либо двойным интегрированием ускорений на буксе (вертикальная плоскость), и уже исходя из этого формируются требования для различных измерительных систем, которые основаны на промерах хорд различной длины (рисунок 2.4). Проведенные исследования [86] позволили разработать проект совершенствования системы оценки пути с использованием

натурных неровностей, требования которого были гармонизированы с европейскими нормами, представленными в таблице 2.1.

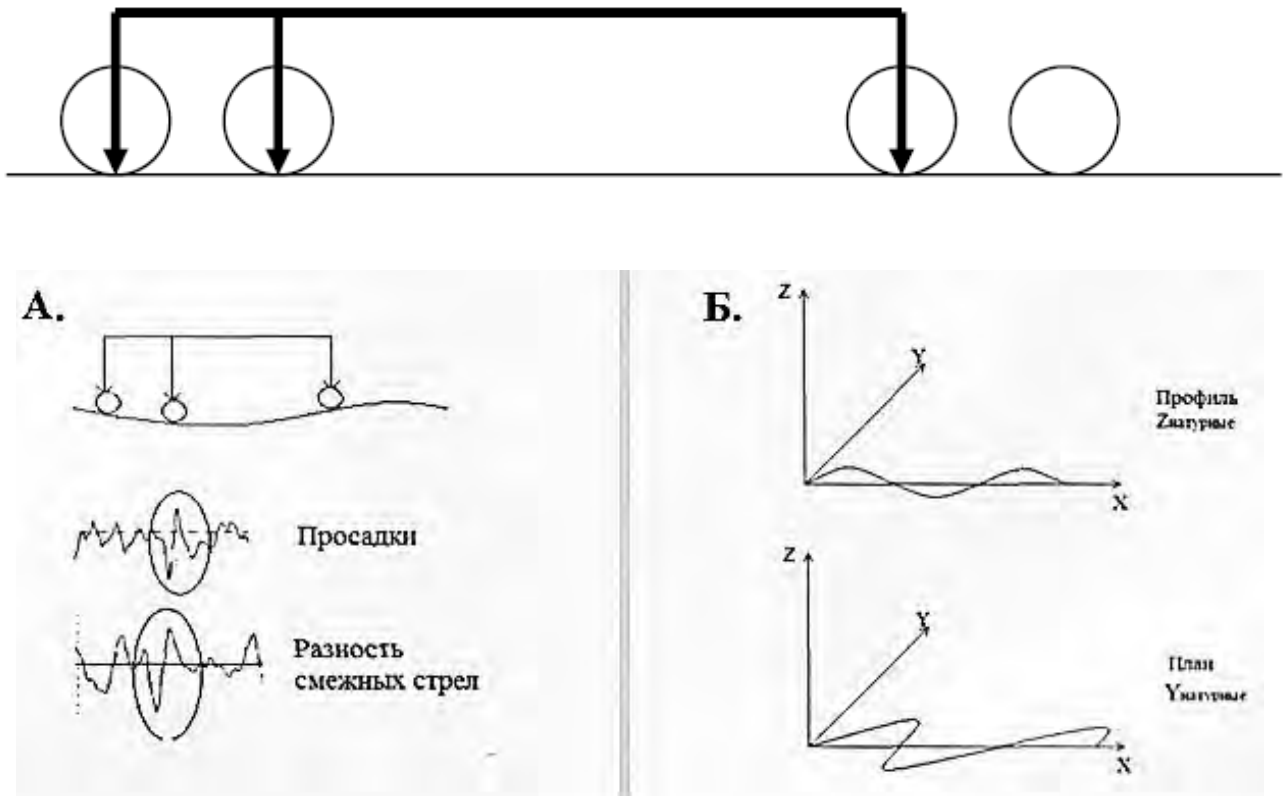


Таблица 2.1 – Гармонизированные с европейскими нормами нормативы длинных неровностей в профиле

Скорость, км/ч	Гармонизированные			Европейские					
	Планового устранения	Немедленного реагирования	Предельно допустимые	EN			DB		
				Планового устранения	Немедленного реагирования	Предельно допустимые	Планового устранения	Немедленного реагирования	Предельно допустимые
<b>Неровности в профиле длиной 3-25 м</b>									
141-160	14-16	16-25	>25	15-17	17-23	>23	8-10	10-23	>23
161-200	12-14	14-20	>20	12-14	14-20	>20	7-9	9-20	>20
201-230	12-14	14-20	>20	12-14	14-20	>20	7-9	9-20	>20
231-250	10-12	12-16	>16	10-12	12-16	>16	6-8	8-16	>16
<b>Неровности в профиле длиной 25-70 м</b>									
141-160	22-30	30-35	>35	-	-	-	-	-	-
161-200	20-25	25-35	>35	20-23	23-33	>33	14-18	18-33	>33
201-230	20-25	25-35	>35	20-23	23-33	>33	14-18	18-23	>33
231-250	18-20	20-30	>30	18-20	20-28	>28	12-16	16-20	>28

Стоит отметить, что на европейских железных дорогах принят порядок нормирования как натуральных неровностей, так и результатов промеров пути другими средствами диагностики, причем нормативы точно соответствуют особенностям каждой измерительной системы, чего в настоящее время нет на российских железных дорогах.

Специалистами НПЦ Инфотранс [87] отмечалось, что эффективное и рациональное содержание железнодорожной инфраструктуры складывается из ряда факторов, среди которых основными являются:

- получение информации о фактическом состоянии;
- прогноз развития образующихся нарушений;
- своевременное принятие мер по их устранению.

Основными поставщиками такой информации являются автоматизированные диагностические средства, полнота и объем получаемой информации постоянно увеличивается. Для упрощения восприятия полученной информации необходимо иметь возможность наглядно визуализировать информацию о диагностируемом объекте. Технология анализа верхнего строения пути и земляного полотна, разработанная специалистами НПЦ Инфотранс, позволяет выявлять участки, на которых длительное время проявляется нестабильность геометрии рельсовой колеи, а также нарушения, связанные с состоянием балластного слоя и земляного полотна на основе программ ПГРК УРРАН и StabWay.

В статье [88] автором указывалось, что: «Для принятия обоснованных и эффективных решений по управлению железнодорожной инфраструктурой необходимо знать её фактическое состояние, правильно определять тенденции развития, чтобы вкладывать ресурсы, где и когда это действительно требуется. Помочь в этом может современная система диагностики». Теперь основной целью диагностики, наряду с фиксацией отдельных нарушений, влияющих на безопасность движения, становится переход к непрерывному наблюдению за состоянием инфраструктуры – к мониторингу. Согласно [88], можно выделить три составные части диагностики инфраструктуры железнодорожного транспорта как системы:

- нормативно-техническая документация – «правовое поле», на котором осуществляется функционирование всей системы диагностики и мониторинга;
- инструментальная база диагностики, которая осуществляет непосредственный контроль состояния объектов инфраструктуры в необходимом и достаточном объеме;
- интеллектуальным ядром системы диагностики и мониторинга становится информационно-аналитическая система, ведущая сбор, контроль кондиционности и достоверности, приведение к стандартному виду и синхронизацию получаемой информации, ее накопление и углубленный анализ.

Нормативно-техническое обеспечение, которое должно быть отражено в нормативно-технической документации, должно быть принципом единства измерений. Необходима разработка или уточнение технических регламентов на измерение параметров различных объектов железнодорожной инфраструктуры. В этих регламентах должны быть даны четкие определения всех параметров, которые необходимо измерять и оценивать, условия выполнения измерений и их периодичность.

Следует помнить о замечаниях профессора Е.С. Ашпица [58], обращавшего внимание на путаницу понятий «мониторинг» и «диагностика» или их отождествлении.

Как показывает накопленный опыт эксплуатации железных дорог, многие деформации земляного полотна зарождаются и развиваются с основной площадки. Профессор В.П. Крачковский в работе [89] отмечал, что при определении напряжений в рельсах и других составных частях пути обычно принимают, что все шпалы вполне доброкачественные, равномерно подбиты и дают при равных нагрузках одинаковую осадку, однако, на практике это не так. Следует отметить, что профессор Г.М. Шахунянц в 1946 г. указывал [90], что деформации раньше болезней существовать не могут, но они могут проходить совместно, а не только заканчивать собой болезнь. Мало того, уже прошедшая (устраненная) деформация может послужить причиной возникновения новой болезни или дальнейшего развития существующей. При повышении грузонапряженности, скоростей

движения и осевых нагрузок, проверка расстройств рельсовой колеи в вертикальной плоскости осложняется. Исследования [62] позволили выявить существование таких видов расстройств железнодорожного пути, которые не нормируются, а, следовательно, не проверяются в эксплуатации. К ним могут относиться отклонения положения рельсовых нитей в вертикальной плоскости. Проведенные исследования показали увеличение поездной нагрузки на путь от наличия таких расстройств, которые способствуют нарушению плавности хода пассажирских поездов, особенно скоростных, а также способны вызывать спонтанное изменение сопротивления движению и влиянию на режим движения грузовых поездов.

Исследования [28] специалистов из Технического университета Дрездена показали, что вследствие «плавания» рельсошпальной решетки в балласте положение пути невозможно четко зафиксировать. Как показывает опыт, ухудшение положения пути связано с возрастанием пропущенного тоннажа. Это вызывает неравномерные местные осадки. В свою очередь наличие неровностей пути вызывает рост силового воздействия со стороны подвижного состава с увеличением сил в нижней части неровностей и снижением на вершинах. Вследствие этого возрастает неравномерность осадок, как балласта, так и основной площадки земляного полотна.

Наличие вертикальных неровностей вызывает не только рост динамических сил, но и рост ускорений кузова, ведущий к нарушению показателей комфорта с ростом скоростей движения. Величины допустимых вертикальных неровностей в зависимости от скорости, разработанные немецкими специалистами [28] приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Величины скоростей и амплитуд вертикальных неровностей.

Скорость, км/ч	Допускаемая величина неровностей, мм
$\leq 80$	15
$\leq 120$	13
$\leq 160$	11
$\leq 230$	9
$>230$	7

Из вышеизложенного следует, что исследования по определению накопления остаточных деформаций рельсовых нитей в продольном профиле, бесспорно, имеют очень важный показатель для состояния железнодорожного пути, который необходимо учитывать при эксплуатации как скоростного, высокоскоростного, так и при тяжеловесном движении. Поскольку получение и мониторинг этих отклонений характеризуют не только общую картину расстройств пути, но и дают материалы для оценки и прогнозирования состояния пути, это позволит принимать меры на ранних этапах отклонений геометрии рельсовой колеи, а для этого необходимо их нормировать. Способом оценки и получения таких неровностей посвящена данная глава.

## 2.2 Деформации земляного полотна

Наряду с неисправностями, накапливающимися вследствие силовых воздействий подвижного состава, в земляном полотне возникают повреждения, связанные с недостаточной прочностью грунта, заболоченностью территорий и др. Обращают на себя внимание опубликованные данные по ширине основной площадки земляного полотна (таблица 2.3) [91].

Таблица 2.3 – Ширина основной площадки принимаемой при строительстве

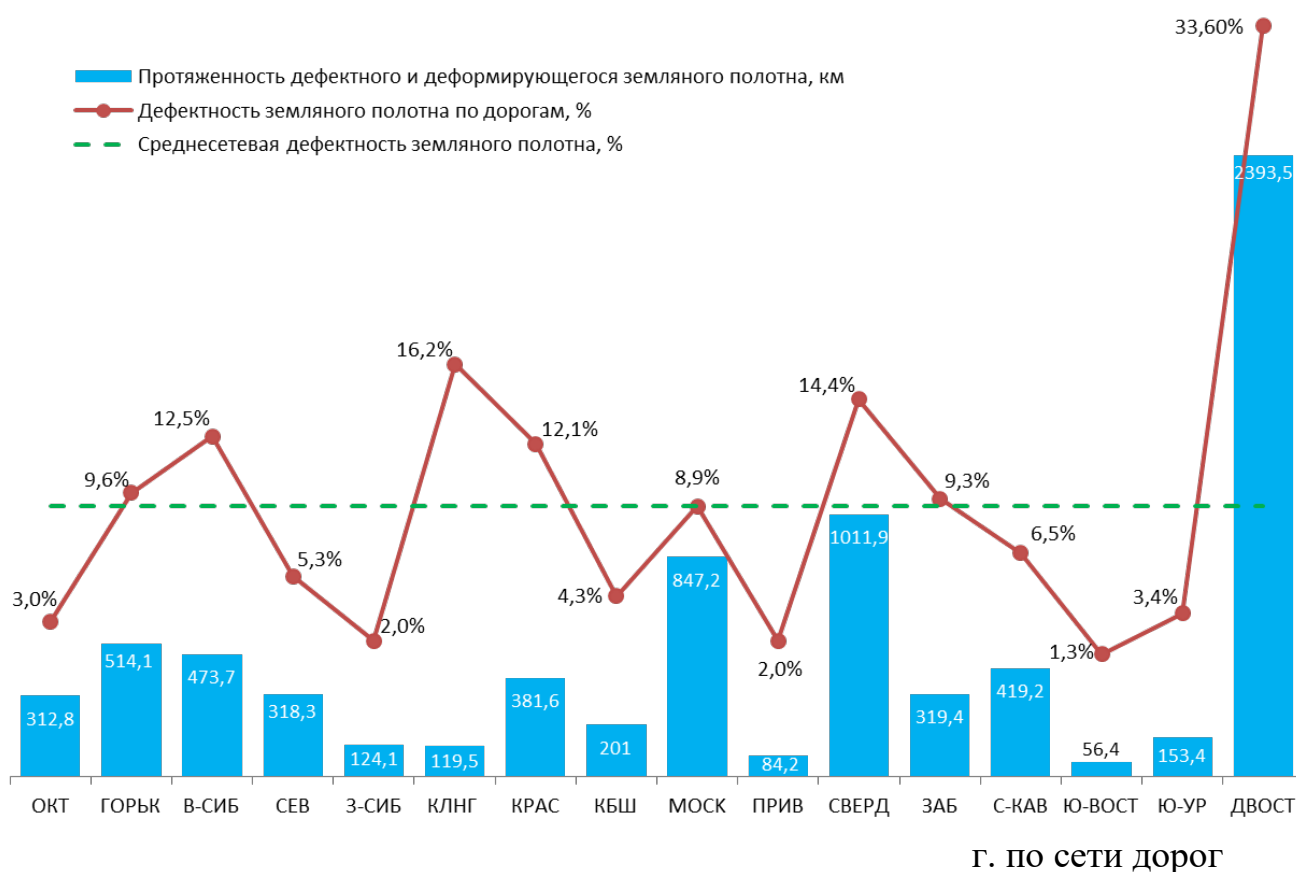
Период строительства, года	Ширина основной площадки на прямых участках, м	
	однопутные	двухпутные
1835-1859	5,65-6,05	9,4-9,8
1860-1893	4,5-5,6	8,25-9,35
1894-1900	4,7-5,5	8,35-9,15
1901-1925	5,55	9,2
1925-1933	4,6-6,0	8,7-10,1
1934-1946	5,0-5,8	9,1-9,9
1947-1958	5,0-5,8	9,1-9,9
После 1959	5,5-7,5	9,6-11,6

В работе [92] к.т.н. А.Ф. Колос отмечал, что земляное полотно один из элементов конструкции пути, который по своим конструктивным особенностям является практически самым долговечным сооружением, от состояния и целостности которого зависит работа и надёжность всего верхнего строения пути.

В 2009 г. статистические данные Центра обследования и диагностики инженерных сооружений ОАО «РЖД» [93] показали, что дефектам и деформациям подвержено 6,1% земляного полотна сети железных дорог. Основное количество дефектов земляного полотна связано с нарушением его геометрических очертаний – 31,8% от протяженности дефектного и деформирующегося земляного полотна. Деформации тела насыпи (осадки, сплывы) составляют 30,2%. Дефекты и деформации основной площадки (балластные корыта, пучины) составляют 15,2%. Необходимо отметить, что основная доля подобных деформаций вызвана осадкой основной площадки земляного полотна, сложенного из слабых грунтов.

Статистические данные о состоянии земляного полотна за 2016 г. [94] показывают, что из общей протяженности земляного полотна сети дорог ОАО «РЖД» 8,9% приходится на дефектные и деформирующиеся участки, по дорогам они распространяются не равномерно (рисунок 2.5), а исследования [95] позволили отметить, что на сети железных дорог ОАО «РЖД» имеются перегоны, на которых присутствуют от 2 до 4 мест с «больным» земляным полотном.





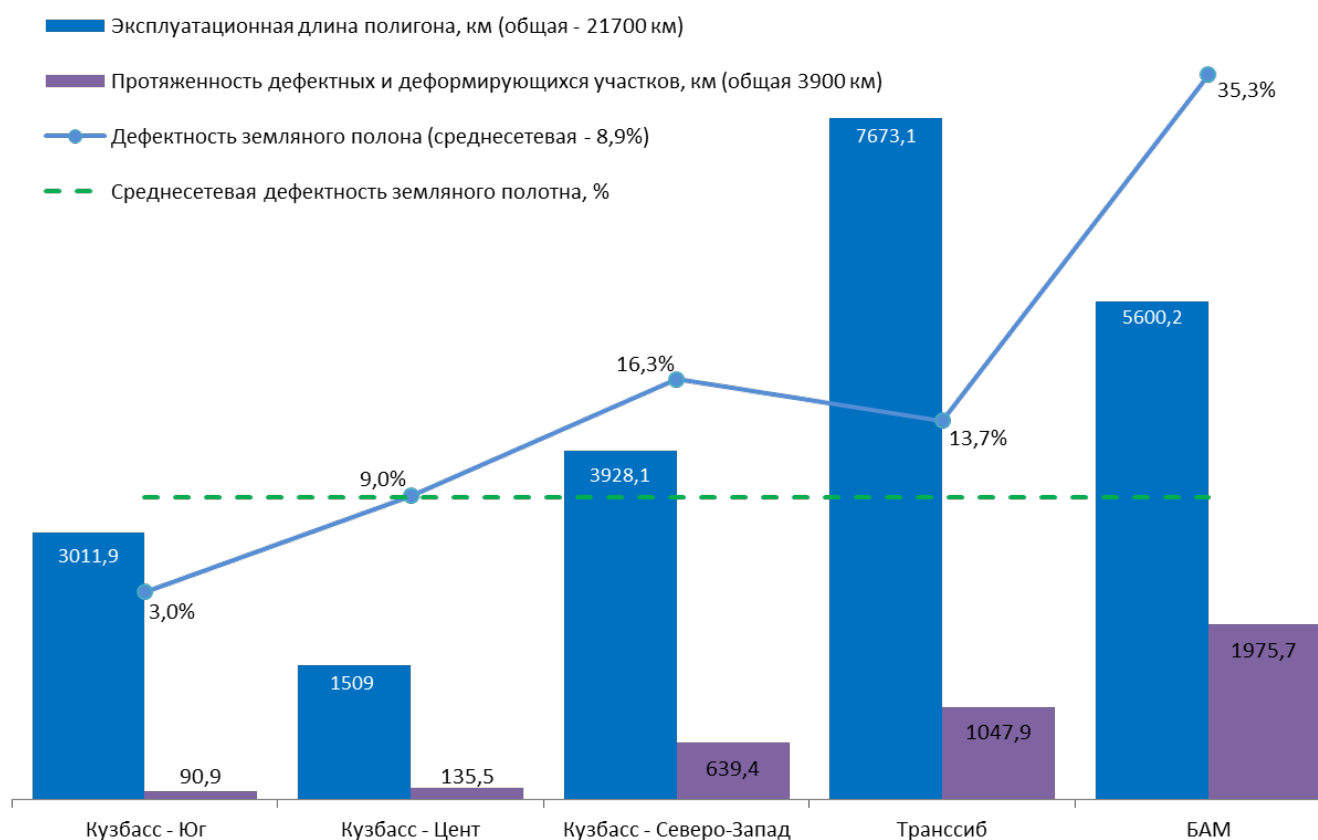
Наиболее распространёнными дефектами и деформациями являются нарушения геометрических очертаний земляного полотна и балластных углублений – 54,5%, осадки и пучины – 26,1%.

Оценка изменения дефектности земляного полотна за 2003-2016 гг., показывает снижение в период с 2003 по 2008 гг. с 7,8% до 5,9% с последующим ростом до 8,9%.

Из статистических данных [96] отмечалось, что Забайкальская железная дорога составляет почти 25% длины Транссиба и имеет самую высокую среднюю грузонапряженность по сети железных дорог. К тому же просрочен капитальный ремонт на 37,6% протяженности путей. По вине дирекции инфраструктуры ежегодно задерживается порядка 25% поездов, из которых 50% составляют эксплуатационные отказы. Стоит отметить, что повышение осевых нагрузок до 245 кН, а в перспективе до 294 кН, повышение масс поездов может пагубно сказаться на инфраструктуре дороги.

Исследования [94] позволили отобразить статистические данные по деформации земляного полотна на участках тяжеловесного движения на

01.01.2017 г. (рисунок 2.6). Из данных, представленных на рисунке 2.6 видно, что восточный полигон «Кузбасс – Восток» имеет наибольшую деформативность земляного полотна по сети.



Для повышения пропускной способности на участке Маленга – Обозерская Северной железной дороги [97] реализуется проект «Белкомур», в рамках которого будут увеличиваться веса поездов с 5200 до 6000 т. На данном участке с 2001 г. производилось повышение весов грузовых поездов с 4800 до 5200 т, что повлияло на интенсивность осадок насыпей на болотах. Это подтверждают исследования [98], которые показали, что на участках, где были отсыпаны мощные отложения слабых водонасыщенных грунтов, продолжают фиксироваться осадки пути, вызванные деформациями основания, что требовало ограничения скоростей движения [95]. Ликвидация просадок и перекосов в этом случае не устраняет основной причины деформаций.

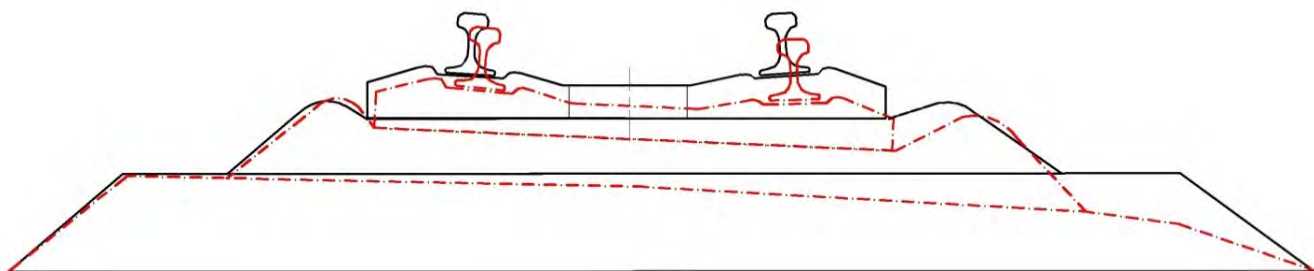
В работе [99] А.В. Козлов отмечал, что одной из причин деформаций основной площадки земляного полотна является вдавливание балластного материала в грунт

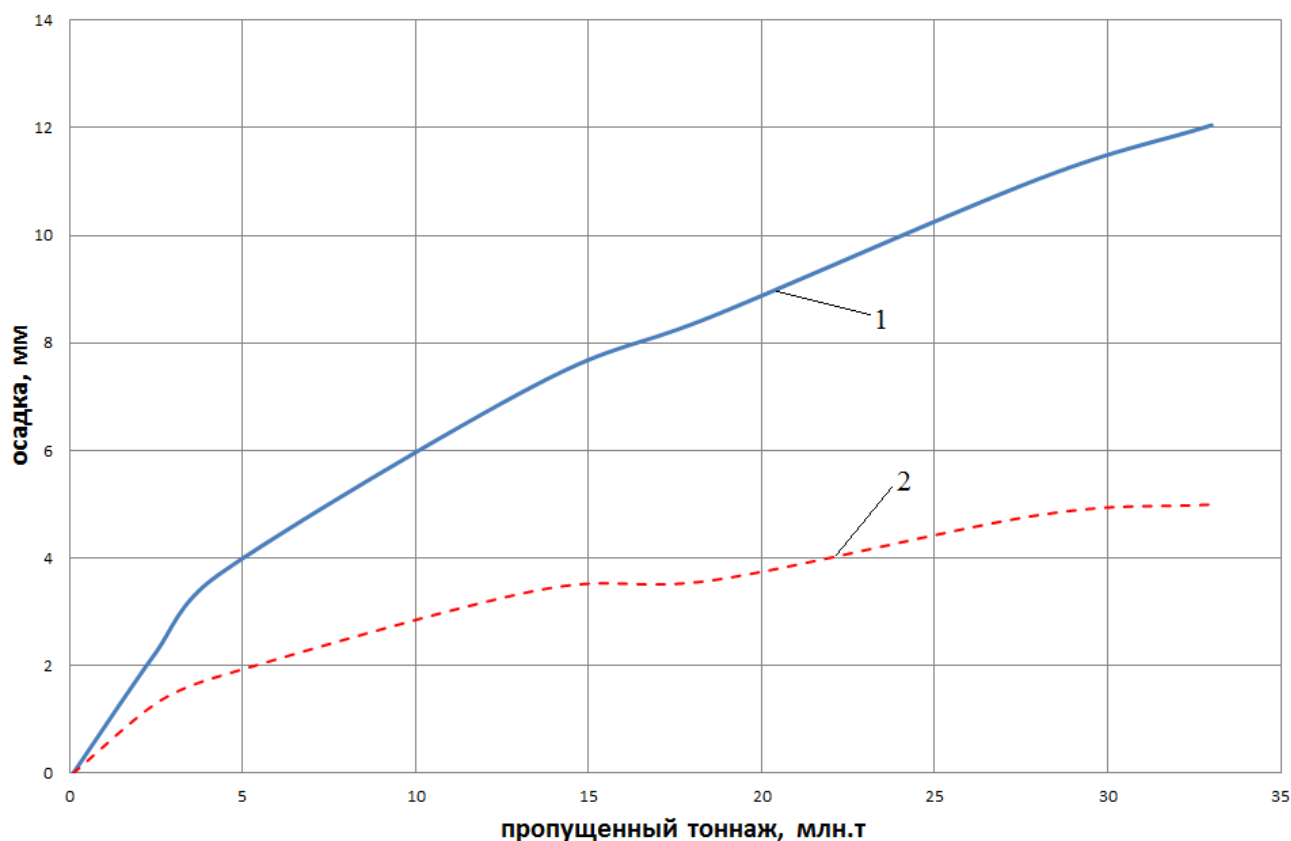
земляного полотна, вследствие чего понижается несущая способность грунтов вызванными следующими причинами [100]:

- переувлажнение при неудовлетворительном состоянии балластного слоя, земляного полотна и водоотводных устройств;
- поступление воды в насыпь или на нулевое место со стороны выемки;
- слабые или плохо уплотненные грунты в зоне основной площадки;
- недостаточная толщина балластной призмы;
- использование непригодных грунтов;
- пучины и весенние пучинные просадки и т.д.

Все это способствует нарушению геометрии рельсовой колеи, её искажению, развитию в подбалластном основании пути углублений и застою в них воды.

В работе [101] описан опыт выявления нестабильных участков насыпей, имеющих деформации, причинами которых явилось то, что участки были спроектированы более 100 лет назад, а также использование при ремонтах некачественных материалов и несоблюдения технологии работ [41], что может приводить к процессу вдавливания щебня в основную площадку земляного полотна. На рисунке 2.7 представлена схема деформации насыпи в результате вдавливания балластного материала в грунт земляного полотна. В работе [102] автором отмечалось, что в ходе испытаний инновационных вагонов [6] на тележках 18-9800 с осевой нагрузкой 27 тс на участке Ковдор – Мурманск в 2014-2016 гг. [4] была зафиксирована зависимость изменения уровня головки рельса и основной площадки земляного полотна от пропущенного тоннажа (рисунок 2.8). Полученные данные подтвердили процесс вдавливания щебня в основную площадку земляного полотна при эксплуатации вагонов с повышенными осевыми нагрузками.



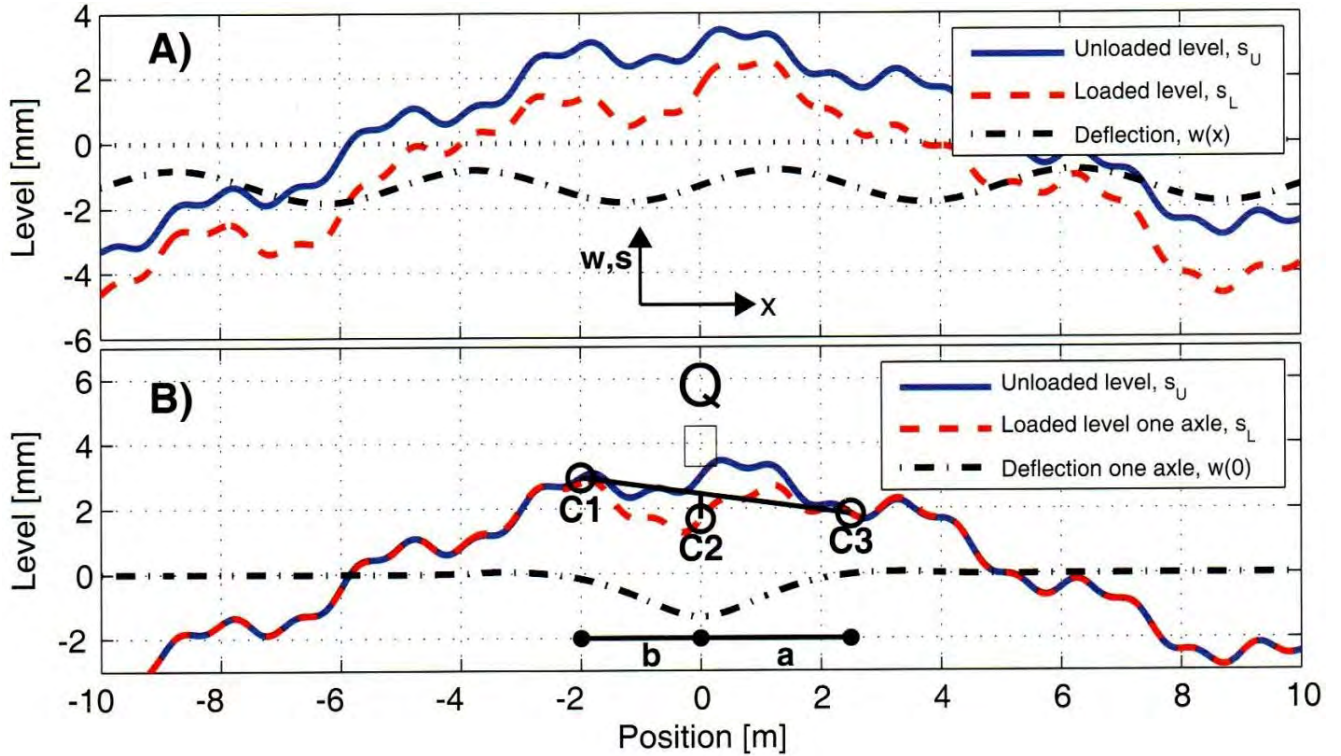


Из приведенных материалов следует, что в условиях роста объема перевозок, весовых норм, повышения осевых нагрузок, совершенствование методов мониторинга и диагностики приобретает важное значение. Поэтому необходимо этому вопросу уделять большее внимание, а также необходимо развивать методы диагностики и мониторинга, в том числе за счёт расширения диапазона измеряемых неровностей, поскольку деформации земляного полотна, как правило, имеют большую протяженность, чем контролируются в настоящее время неровности продольного профиля.

### 2.3 Способы определения параметров длинных неровностей

Проведенные исследования на железных дорогах Швеции [103] показали, что точное определение жесткости пути может нести информацию о потенциальных

источниках деградации и возникновении в верхнем строение пути неисправностей задолго до того, как они приведут к проблемам. Метод контроля жесткости пути позволяет наблюдать за изменениями параметров неровностей в ненагруженном пути и под нагрузкой изображен на рисунке 2.9.



В исследованиях [104, 105] отмечалось наличие связи между содержанием пути и качеством пути (рисунок 2.10). Переменная жесткость пути может оказывать влияние на параметры деформации, вызывая колебания подвижного состава, что подтверждает исследования [37]. Этот способ позволяет определять неровность под колесом.

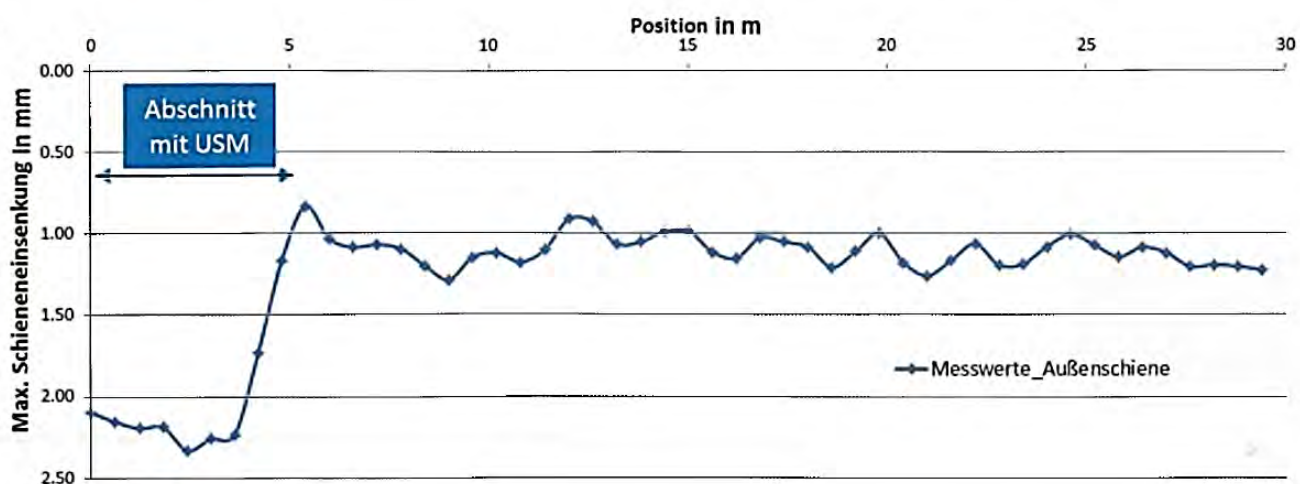


Рисунок 2.10 – Упругие осадки по рельсу (осевая нагрузка 20 т/с)

Профессор З.Л. Крейнис в работе [106] отмечал, что исследования статистическими методами динамики подвижного состава, силового взаимодействия подвижного состава и пути – связано с изучением и статистическим анализом случайных полей очертаний рельсовых нитей железнодорожного пути. Случайное поле, изменяющееся в пространстве  $(x, y, t)$  и во времени  $(T)$ , можно рассматривать как поле, движущееся в пространстве. В основе спектрального разложения лежит, преобразование Фурье.

В работе [75], для получения неровностей в профиле пути под нагрузкой был применен метод преобразования данных по просадкам вагона-путьеизмерителя ЦНИИ-2. Измеренные просадки представляли собой первую разность положения рельсовых нитей в профиле, полученных на базе ходовой тележки вагона длиной 2,7 м, с дальнейшим применением передаточной функции [107]. Данная система была проста в использовании, поскольку измерительным механизмом было линейное перемещение троса на выходе суммирующего механизма просадок путьеизмерителя, а остальные преобразования производились с помощью ЭВМ. Проведенные расчёты показали, что система достаточно точно получала спектры неровностей от 0,6 до 54 м.

Исследования [72, 107-109], позволили разработать метод анализа амплитудной и спектральной оценке неровностей пути на основе преобразования Фурье. Данный метод был реализован на известных формулах теории выбросов случайных процессов. В работе [108] авторы отмечали, что с помощью

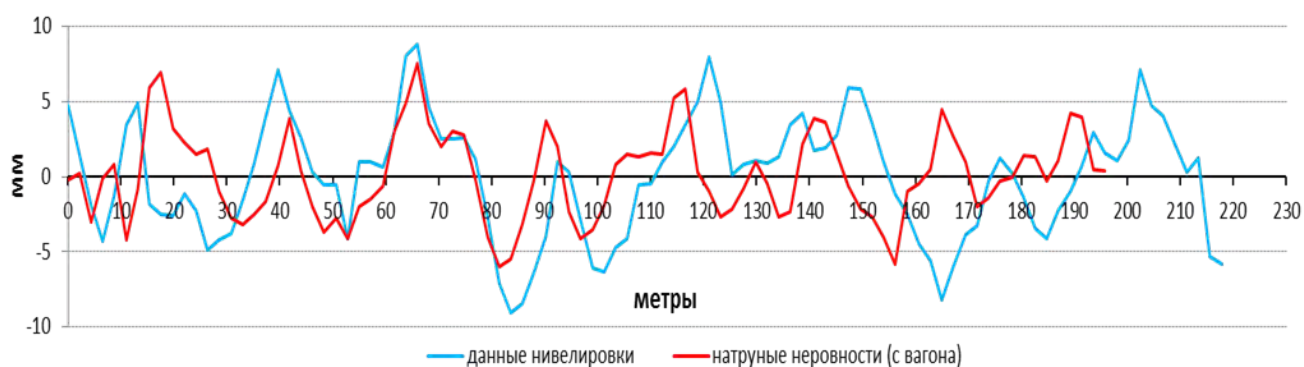
спектральной плоскости можно определять неровности в диапазоне волн от 1 до 40 м.

Однако у рассмотренного метода имеются свои недостатки. Спектральные характеристики неровностей позволяют решать общую оценку состояния пути на анализируемом участке и не могут характеризовать вопросы безопасности движения определенных неровностей.

В работе [66] авторы использовали способ получения неровностей с помощью двойного интегрирования сигналов датчиков ускорений, установленных на буксах пассажирского подвижного состава для получения неровностей в диапазоне 0-25 м, данный метод использовался в исследованиях к.т.н. А.Д. Кочнова [65] и показал хорошую сходимость результатов для звеньевого и бесстыкового пути.

Исходя из опыта получения параметров неровностей продольного профиля, автор воспользовался идеей, основанной на опыте [107, 108, 74] преобразования данных проходов штатных вагонов-путеизмерителей КВЛ-П с помощью передаточных функций для получения и анализа параметров неровностей продольного профиля. Это объясняется простотой получения данных и отсутствием дополнительного оборудования для сбора информации, на что указывал профессор Е.С. Ашпиз [29]: «наблюдение за изменением геометрии рельсовой колеи по показаниям вагонов-путеизмерителей позволяет охватить значительное протяжение направлений железных дорог».

Нужно сказать, что способ получения параметров длинных неровностей в исследовательских целях с использованием выходных данных вагонов-путеизмерителей был апробирован на участке Ковдор – Мурманск, в ходе испытаний [4, 5, 110], что позволило сопоставить получаемые неровности с данными геодезической съемки (рисунок 2.11). Поэтому для анализа параметров длинных неровностей в первую очередь на участках обращения тяжеловесного движения, автору пришлось разработать механизм расчёта для получения параметров длинных неровностей [102]. Разработанный метод не претендует на глобальное использование, но позволяет решать прикладную задачу. Далее будет рассмотрен метод получения неровностей продольного профиля.



## 2.4 Метод получения параметров неровностей продольного профиля

Главная цель обработки физических сигналов заключается в необходимости получения содержащейся в них информации. Это ведет нас к ключевой проблеме обработки физических аналоговых сигналов – проблеме извлечения информации. Как только желаемая информация будет извлечена из сигнала, она может быть использована различными способами [111, 112].

Анализ Фурье закладывает основы многих методов, применяющихся в области цифровой обработки сигналов. По сути дела, преобразование Фурье позволяет сопоставить сигналу, заданному во временной области, его эквивалентное представление в частотной области, и наоборот, если известна частотная характеристика сигнала, то обратное преобразование Фурье позволяет определить соответствующий сигнал во временной области [111].

Единственный член семейства Фурье, который имеет отношение к цифровой обработке сигналов, дискретное преобразование Фурье (ДПФ), которое оперирует дискретной по времени выборкой периодического сигнала во временной области. В качестве набора входных данных для ДПФ доступно только конечное число отсчетов ( $N$ ). Фундаментальное уравнение для получения  $N$ -точечного ДПФ имеет вид (2.9):

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi nk/N} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \left[ \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) - j \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right], \quad (2.9)$$



где:  $X(k)$  – представляет собой частотный выход ДПФ в  $k$ -ой точке спектра, где  $k$  находится в диапазоне от 0 до  $N-1$ ;

$N$  – представляет собой число отсчетов при вычислении ДПФ;

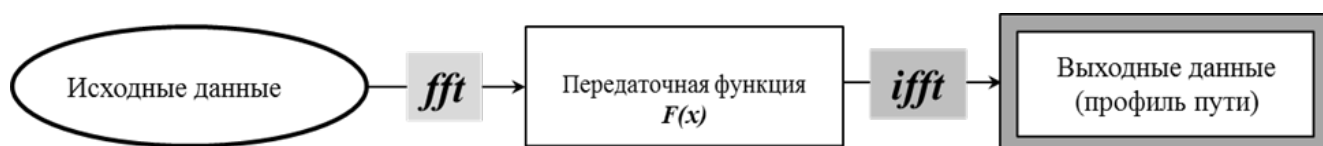
$x(n)$  – представляет собой  $n$ -ый отсчет во временной области,

где  $n$  также находится в диапазоне от 0 до  $N-1$ .

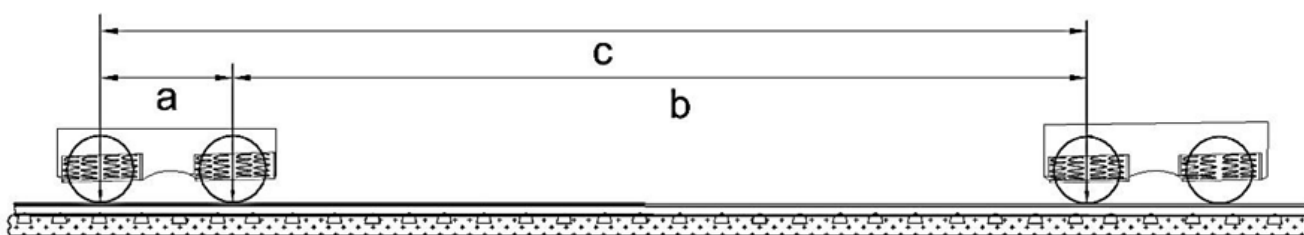
Для ускоренного вычисления ДПФ используют – быстрое преобразование Фурье (БПФ), путем сокращения требуемого числа операций умножения и сложения. Результатом переработки выражений для ДПФ является БПФ, которое требует только  $\left(\frac{N}{2}\right) \log_2(N)$  умножений комплексных чисел. Вычислительная эффективность БПФ по сравнению с ДПФ становится весьма существенной, когда количество точек БПФ увеличивается до нескольких тысяч [112].

Алгоритм БПФ по основанию 2 разделяет полное вычисление ДПФ на комбинацию 2-точечных ДПФ. Каждое 2-точечное ДПФ содержит базовую операцию умножения с накоплением называемой «бабочкой».

Для получения параметров неровностей по данным проходов вагонов-путьеизмерителей (просадок) используется БПФ ( $fft$ ) и передаточная функция  $F(x)$  [112,113] согласно схеме, представленной на рисунке 2.12.



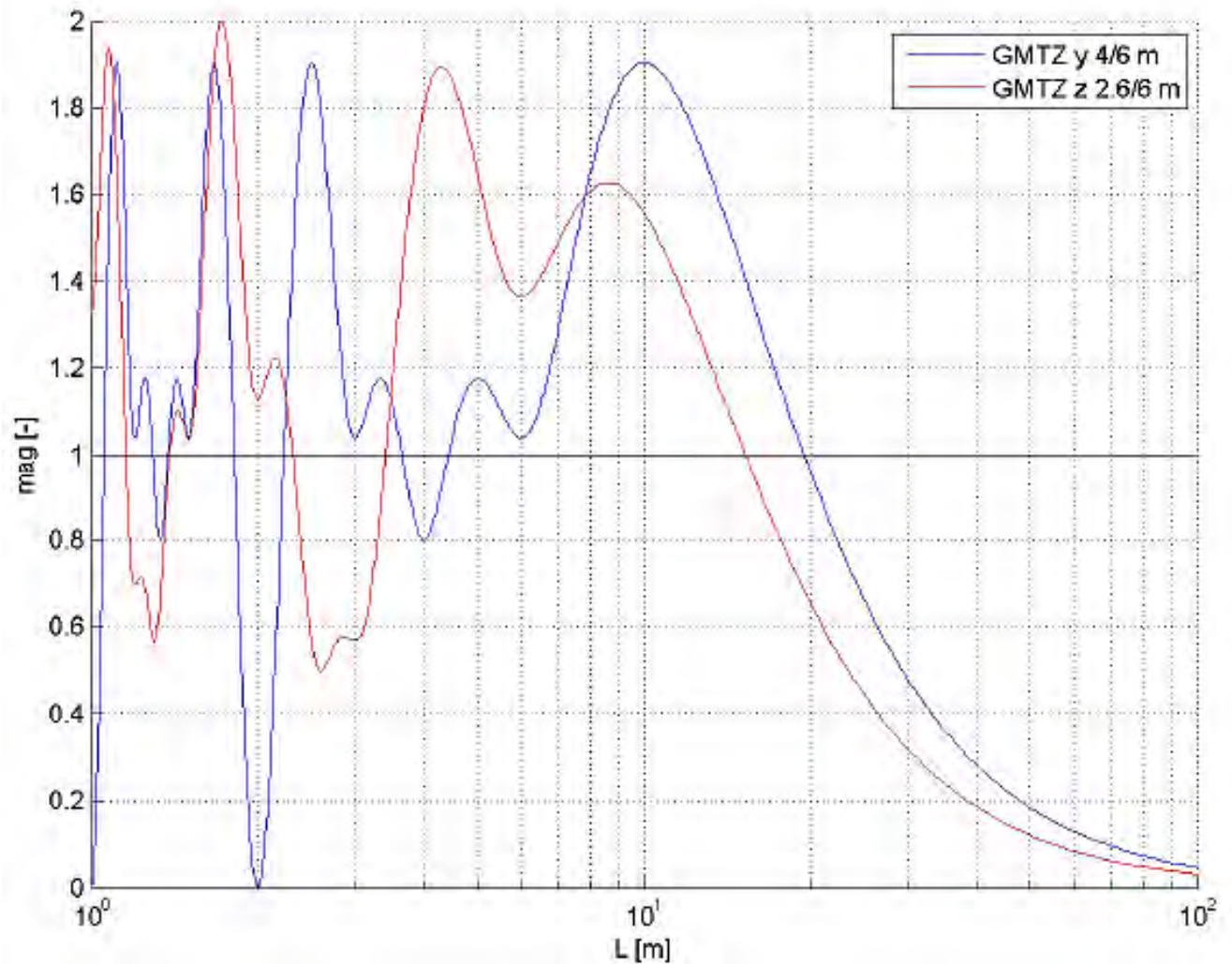
Если геометрия пути регистрируется хордальной системой (рисунок 2.13), измеренные сигналы положения пути в профиле должны обрабатываться с помощью передаточных функций с последующей аппроксимацией для выравнивания сигнала. Процесс восстановления «натурной» формы этих сигналов называется «преобразование».



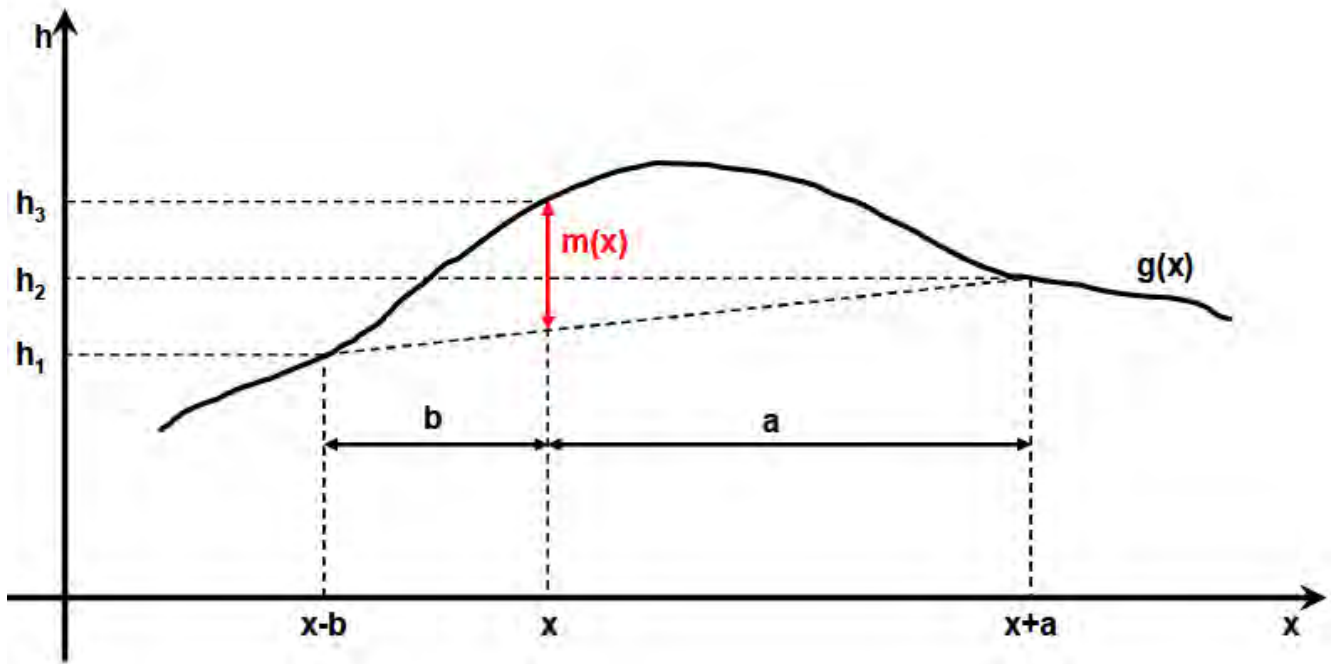
$a, b, c$  – измерительные хорды

Фильтрация частот, соответствующая диапазону неровностей требующаяся, если геометрия пути должна оцениваться в соответствии с [20, 83]. Кроме того, если данные трека должны использоваться в целях моделирования, они не должны быть искажены из-за характеристик хорд.

Искажение амплитуд можно описать с помощью передаточной функции измерительной системы. Величина передаточной функции представляет собой коэффициент искажения как функцию длины волны. Этот коэффициент лежит между 0 и 2. В качестве примера рисунок 2.14 показывает передаточную функцию путеизмерителя GMTZ [114], с хордовым делением 4 и 6 м для выравнивания и 2,6 и 6 м для продольного уровня. Нулевой коэффициент, видимый для выравнивания на длине неровности 2 м, означает, что эта длина неровности вообще не регистрируется и не может быть восстановлена. Длинные неровности также сильно уменьшены; максимальная длина неровности, которая может быть разумно восстановлена, составляет от 40 до 70 м.



Передаточная функция может быть вычислена из геометрии хорды. Хорда с фиксированной длиной  $L$  движется вдоль пути [105,107]. Смещение хорды измеряется в промежуточной точке от прямолинейной хорды. На хорде имеют промежуточные расстояния  $a$  и  $b$  до конечной точки хорды. Смещение хорды  $m$  рассчитывается по формуле (2.10) (рисунок 2.15):



$$m(x) = h_3 - \frac{a}{a+b} h_1 - \frac{b}{a+b} h_2 = h_3 - \frac{a \cdot h_1 + b \cdot h_2}{a+b} \quad (2.10)$$

Измеренный сигнал  $m(x)$  можно рассматривать как импульсную характеристику линейной инвариантной по времени системы (LTI) геометрии пути  $g(x)$ . В математических терминах  $m(x)$  является интегралом свертки функции импульсного отклика  $h_{3-P-A}$  с геометрией пути  $g(x)$  (2.11), с функцией импульсного отклика (2.12) и импульсом Дирака  $\delta(x)$ . В частотной области интеграл свертки упрощается, умножая сложную передаточную функцию на данные геометрии пути (2.13) с передаточной функцией (2.14) и пространственной частотой  $\omega$ :

$$m(x) = g(x) * h_{3-P-A} = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) \cdot h_{3-P-A}(x - \tau) d\tau \quad (2.11)$$

$$h_{3-P-A}(x) = \delta(x) - \frac{a}{a+b} \delta(x - b) - \frac{b}{a+b} \delta(x + a) \quad (2.12)$$

$$M(j\omega) = H_{3-P-A}(j\omega) \cdot G(j\omega) \quad (2.13)$$

$$H_{3-P-A}(j\omega) = 1 - \frac{a}{a+b} e^{-j\omega b} - \frac{b}{a+b} e^{-j\omega a} \quad (2.14)$$

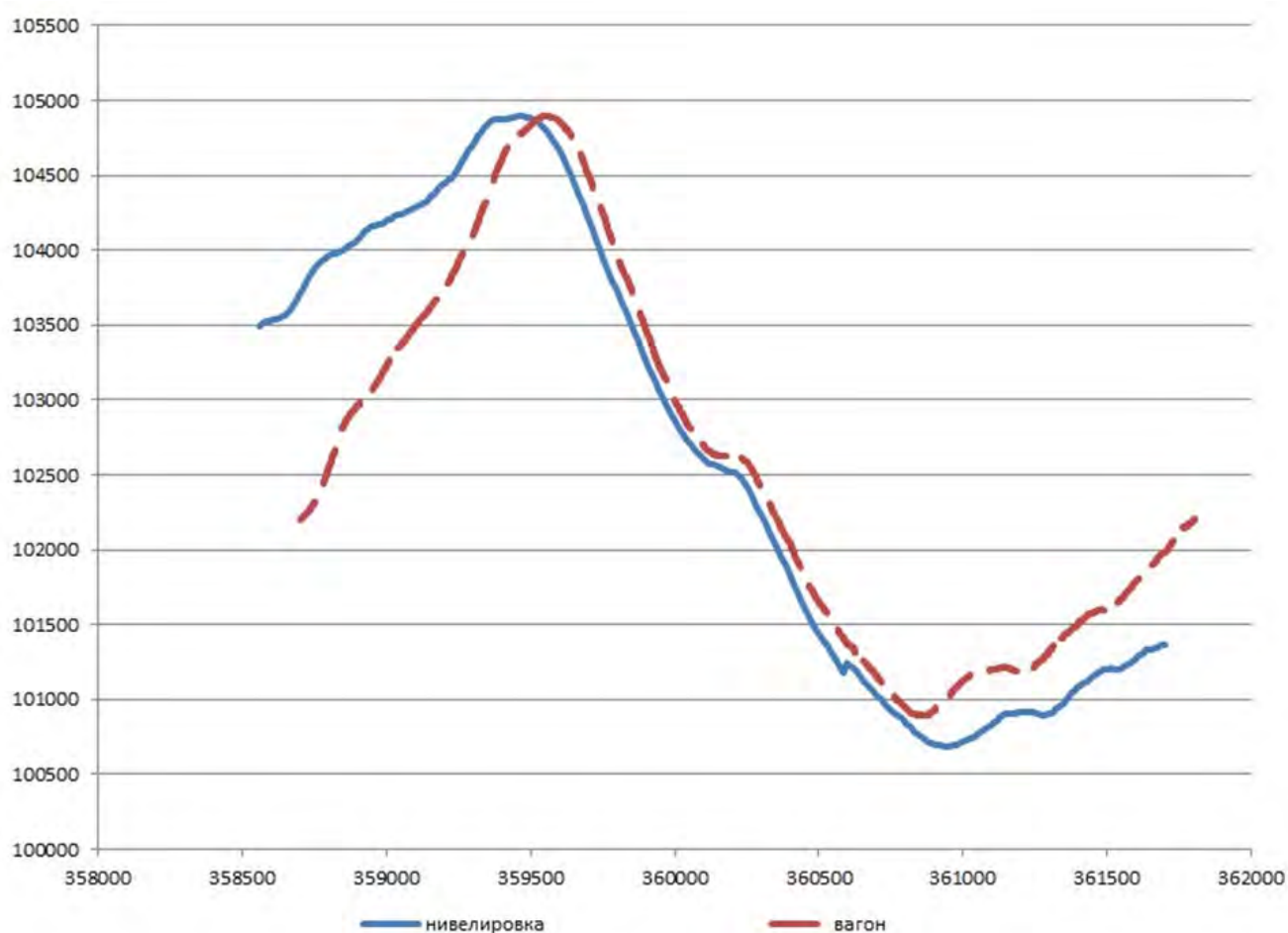
На первом этапе применяется преобразование Фурье, которое позволяет нам привести исходный массив данных из временной области в частотную, чтобы не было искажения используемых данных [103].

На следующем этапе происходит применение передаточной функции  $F(x)$  к преобразованным данным. На выходе получаем массив, представляющий данные

геометрии рельсовой колеи в частотной области. Для окончательного результата необходимо прибегнуть к обратному преобразованию Фурье (*ifft*), которое позволит получить исходный результат – профиль пути в вертикальной плоскости [112].

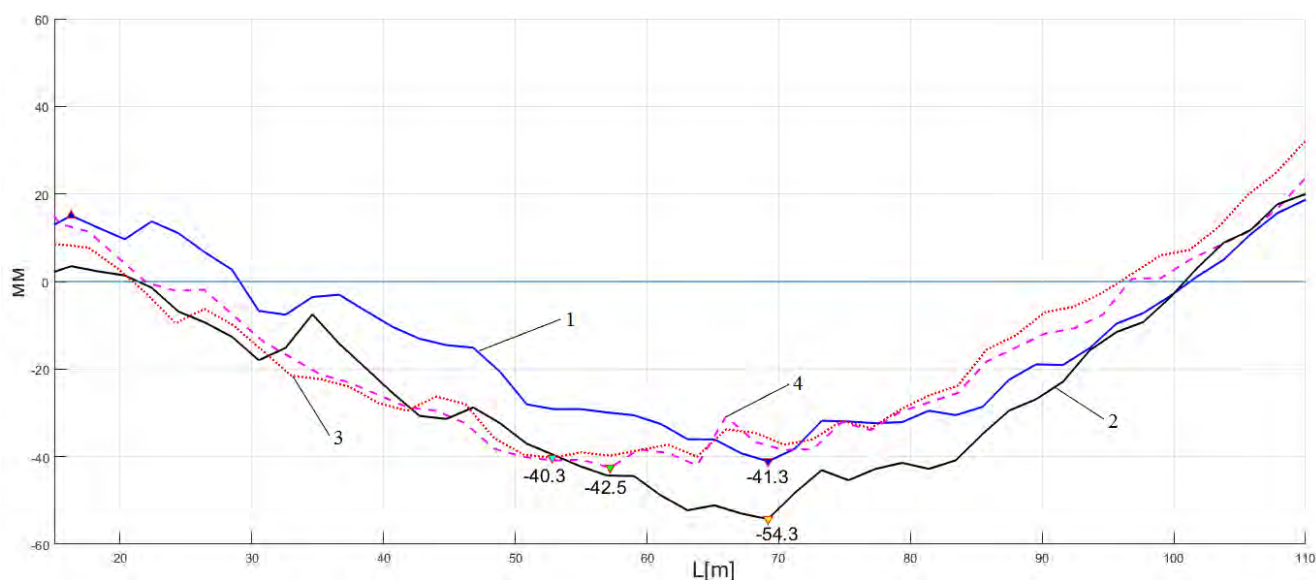
Применяя спектральную область к полученным данным, можно анализировать общее состояние пути на данном участке. Чтобы проанализировать более детально состояние пути, необходимо получить параметры неровностей пути из полученного профиля. Для этого понадобится аппроксимировать полученную кривую (профиль) с использованием параметрической модели Фурье  $f(x)$ .

Проводимые в 2016 году исследования [102], позволили реализовать нивелировку прямого участка пути (на длине 3 км), для сопоставления профиля пути, полученного при нивелировке и рассчитанного по данным прохода штатного вагона-путеизмерителя (рисунок 2.16).



Представленные графики, изображенные на рисунке 2.16 показывают, что данные, получаемые натурным способом, хорошо коррелируются с данными, которые получены с помощью преобразования зарегистрированных данных измерительными системами вагона-путеизмерителя.

Исследования, выполняемые в рамках испытания вагонов с повышенными осевыми нагрузками [102, 115] на участке Октябрьской железной дороге Ковдор–Мурманск [4] позволили произвести наблюдения за деформациями опытных участков в 2016 году и сопоставить неровности пути в вертикальной плоскости, полученные с помощью нивелировки и методом численного преобразования данных вагона-путеизмерителя (рисунок 2.17).



Из данных, представленных на рисунке 2.17 хорошо видно, что на опытном участке в 2016 г. происходило увеличение параметров неровностей пути в вертикальной плоскости, как по данным нивелировки, так и по данным числового преобразования данных вагона-путеизмерителя (таблица 3). На рисунке 2.16 приведены фотоматериалы опытного участка, результаты которого, изображены на графике (рисунок 2.17), что подтверждает наличие неровностей, вызванных

деформациями пути (рисунок 2.18, б). В таблице 2.3 представлен анализ данных параметров неровностей пути, полученных при нивелировке и числовым методом.

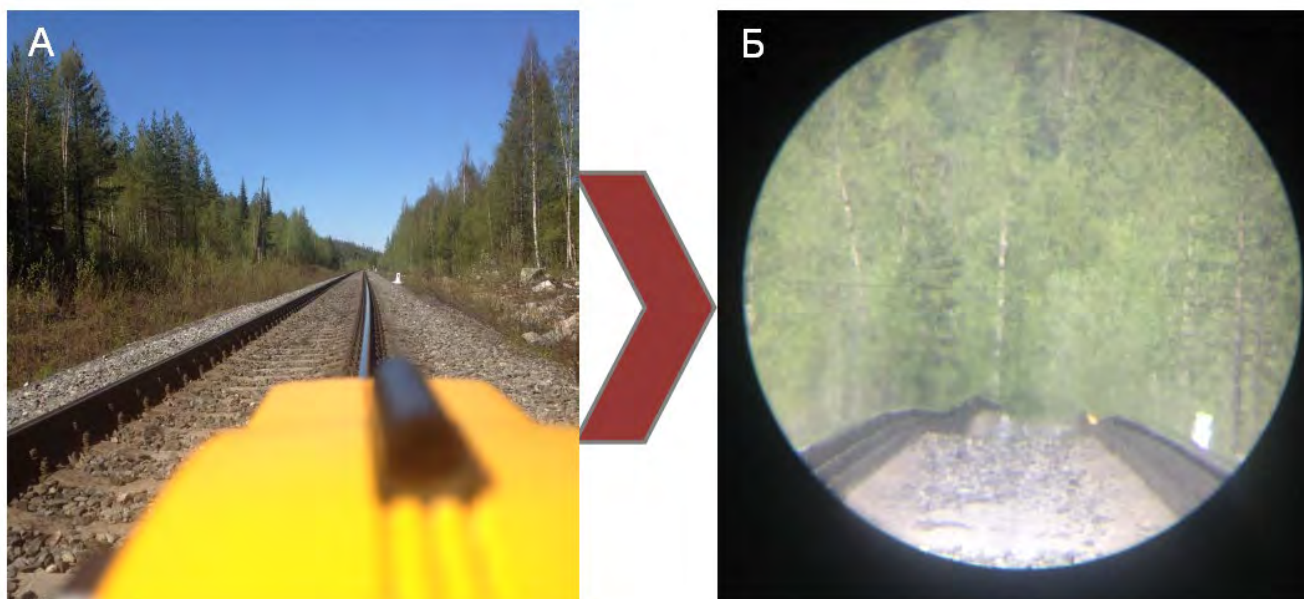


Таблица 2.3 – Анализ данных параметров неровностей в профиле за 2016 год

	Нивелировка	Числовой метод
<b>Площадь, м<sup>2</sup> (май 2016)</b>	6,5	8,1
<b>Площадь, м<sup>2</sup> (сентябрь 2016)</b>	6,9	9,5
<b>Длина неровности, м (май 2016)</b>	74,8	71,5
<b>Длина неровности, м (сентябрь 2016)</b>	74,8	79,4
<b>Амплитуда, мм (май 2016)</b>	40,3	41,3
<b>Амплитуда, мм (сентябрь 2016)</b>	42,5	54,3

Анализ данных, представленный в таблице 3, показывает, что данные имеют сходимость, но все же отличаются. Это объясняется тем, что исходные данные были получены разными методами. При нивелировке путь измеряется в ненагруженном состоянии, то есть получаем очертание пути, а при применении числового метода, используются данные прохода вагона-путеизмерителя, то есть под нагрузкой в момент записи. Вследствие этого, возникают различия полученных данных. Но даже при различии данных, имеется рост показателей параметров неровностей по всем рассмотренным показателям, что подтверждает наличие деформации пути в процессе эксплуатации.

## ВЫВОДЫ ПО ВТОРОЙ ГЛАВЕ

Во второй главе рассмотрены предпосылки для получения и анализа неровностей продольного профиля. Проанализирован отечественный и зарубежный опыт получения таких неровностей. Также изучен способ мониторинга деформации железнодорожного пути на примере анализа параметров неровностей пути в вертикальной плоскости. Рассмотрен метод получения параметров неровностей продольного профиля по выходным данным вагонов-путеизмерителей. Преобразованные данные сопоставлены с натурными промерами, полученными при нивелировке железнодорожного пути. Представленный метод, позволяет сказать, что за деформациями пути можно наблюдать по нескольким показателям. Представленный метод, позволяет расширить кругозор в области диагностики железнодорожного пути для мониторинга деформативности пути, что позволит перейти на новый уровень оценки геометрии рельсовой колеи.



### ГЛАВА 3 АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛИННЫХ НЕРОВНОСТЕЙ В ПРОФИЛЕ

Одним из основных элементов системы технического обслуживания пути является мониторинг параметров геометрии рельсовой колеи и состояния элементов конструкции пути.

Наиболее массовыми средствами контроля геометрии рельсовой колеи являются путеизмерители различной конструкции, предназначенные для измерения неровностей пути различной длины, вызывающих колебания подвижного состава в широком диапазоне частот.

В большинстве стран мира параметры и характеристики состояния геометрии рельсовой колеи, получаемые вагонами-путеизмерителями используются в следующих целях [116]:

- 1) для обеспечения безопасности и плавности движения поездов;
- 2) для принятия решений о необходимости проведения ремонтных работ или об ограничении скоростей движения;
- 3) для определения контроля качества выполненных ремонтных работ;
- 4) для принятия решений о качестве работы производственных подразделений путевого хозяйства в части, зависящей от состояния геометрии пути.

Существует несколько принципиально различающихся подходов к определению геометрических неровностей рельсового пути:

- по отклонениям фактического положения пути от паспортного. Такие неровности пути являются причинами колебаний подвижного состава, а измерение отклонений в геометрии пути заключается в регистрации расхождений между фактическим и теоретическим положениями геометрических параметров, их сопоставления и принятия мер для их устранения [117];

- по наличию случайных возмущений, вызывающих колебания подвижного состава, при которых на подвижной состав действуют кинематические

возмущения, вызванные случайными процессами вертикальных и горизонтальных неровностей рельсового пути [118];

- при скоростях до 100 км/ч наибольшее влияние на процессы взаимодействия пути и подвижного состава оказывают детерминированные неровности и их сочетания. Исследованию этих процессов была посвящена серия работ, проводимых в ЦНИИ МПС в 70-80 гг. прошлого века [119-121];

- при скоростном и высокоскоростном движении большое влияние на процессы взаимодействия пути и подвижного состава оказывают длинные неровности, вызывающие резонансные колебания подвижного состава [22, 27, 82];

- в последнее время в связи с развитием тяжеловесного движения и использования вагонов с повышенной осевой нагрузкой, большое внимание стало уделяться оценке деформативности пути и выявлению участков, на которых остаточные деформации могут создавать угрозу безопасности движения [122, 123].

В работе [124] д.т.н. М.А. Фришман отмечал, что основными источниками возбуждения колебаний экипажей в вертикальной плоскости являются неровности пути, которые условно можно разделить условно на три типа:

- 1) геометрические;
- 2) неровности, вызванные люфтом между элементами конструкции пути;
- 3) неровности, обусловленные неравноупругостью подрельсового основания;
- 4) неровности образованные вследствие деформаций пути.

Принципиальное значение в этом аспекте имеет разработанная в АО «ВНИИЖТ» при участии МГУПС (МИИТ) и утвержденная ОАО «РЖД» Актуализированная методика оценки надежности пути [125-128], в которую впервые были включены требования по оценке деформативности пути.

В работе профессора Ю.С. Ромена отмечалось [129], что силы взаимодействия пути и подвижного состава пропорциональны величинам неровностей пути, и соответственно необходимо следить за деформациями пути, поскольку одним из параметров безотказности пути служит интенсивность накопления остаточных деформаций. Получение достоверной оценки деформативности и темпов её

изменения позволит предвидеть техническое состояние пути [130]. В настоящее время, на сети железных дорог полным ходом идёт интенсификация перевозочного процесса, что влечет за собой повышение весов грузовых поездов, увеличения осевых нагрузок и повышения скоростей движения пассажирских поездов. Д.т.н. В.П. Титов отмечал [122], что обеспечение безопасности движения базируется на квалифицированном, тщательном, постоянном анализе земляного полотна и причин его повреждений, что способствует своевременному устранению и предотвращению любых деформаций. Это подтверждает исследования японских специалистов о необходимости наблюдений за изменениями неровностей пути [61]. По их мнению, такой подход к анализу параметров неровностей позволит планировать производство ремонтов и наблюдать за процессами накопления деформаций.

Учитывая высокую актуальность данного вопроса для Российских железных дорог, где тяжеловесное движение осуществляется по существующим, а не по специализированным линиям (таблица 3.1), изучение процессов накопления расстройств пути является одним из принципиальнейших вопросов современной научных исследований [4, 5, 98, 105, 109].

Проведенные исследования [50] в рамках проекта ориентированных фундаментальных исследований Российского фонда фундаментальных исследований по актуальным междисциплинарным исследованиям ОАО «РЖД» позволило получить данные о накоплении расстройств пути и их происхождении. Было установлено, что процесс накопления расстройств пути зависит не только от осевой нагрузки и массы поезда, но и от частоты, и длительности приложенной нагрузки [49]. Полученные результаты подтверждают опыт эксплуатации тяжеловесного движения в Китае [56], когда после увеличения массы поезда возникла необходимость снижения скоростей движения тяжеловесных поездов.

Таблица 3.1 – Показатели ряда железных дорог с тяжеловесным движением

Страна	Железные дороги	Ширина колеи, мм	Специализация	Длина линии, км	Млн. т. брутто/год	Масса, тыс. т	Число вагонов	Осевая нагрузка, тс
Австралия	ВНР Ю	1435	Специализ. (жел. руда)	426 (+1000)	71,3 (125)	48,0	320	37,5
Австралия	Pilbara FMG	1435	Специализ. (жел. руда)	256	58	38,4	240	40
Бразилия	CVRD	1600	Специализ.	892	60	25,5	206	31,5
Канада	СР (до Ванкувера)	1435	Преимущ. специализ.	1100	25	13,2	110	30
Китай	Датонг-Кингхуан-гтао.	1435	Специализ. (уголь)	663	300	20,0	200	25
Индия	IR, Jalgaon	1435	Смешанное	415	41	5,06		21,8
Россия	РЖД(Кузбасс-Находка)	1520	Смешанное (уголь и др.)	5900	80	6,30; 9,0; 12,0	от 70...	23,5 (25)
США	UP	1435	Специализ. на уч. Преимущ. специализ.	201 1200	376- по всем местам доб. 73	17,5 15,5	135 120	32,5 32,5
Швеция/ Норвегия	LCAB	1435	Специализ.	497	13	8,52	68	31
Юж. Африка	Transnet	1067	Специализ.	860	46,2	41,0	342	30

В анализе обобщённых данных [131] по результатам исследований воздействия повышенных осевых нагрузок на путь было отмечено, что эксплуатация с высокими осевыми нагрузками требует ужесточения допусков содержания рельсовой колеи, во избежание значительных расстройств и увеличения динамического воздействия подвижного на путь. На дорогах Казахстана уже после пропуска 145 млн. т брутто с высокими осевыми нагрузками была выявлена необходимость в создании более совершенных механизмов для местной выправки пути, поскольку обычные вагоны-путеизмерители с небольшими осевыми нагрузками не могли выявить в полной мере скрытые неисправности пути. Однако в работе [55] отмечалось, что в начальный период (до 250 млн. т брутто) интенсивность износа верхнего строения пути и выход в дефектные невелики. Все это подтверждает требование совершенствования методов оценки и диагностики состояния пути.

Исследования АО «ВНИИЖТ» [5, 110] проводимые в рамках испытаний инновационных вагонов [6], позволили выявить ряд участков пути, на которых были зафиксированы деформации и наблюдать за ними в ходе эксплуатации вагонов с повышенными осевыми нагрузками. Эти исследования позволили применить и апробировать метод получения неровностей в вертикальной плоскости пути большой длины, используя данные проходов штатных вагонов-путеизмерителей [102]. На рисунке 3.1 представлен участок пути с неровностью в вертикальной плоскости. Мониторинг полученных данных позволил проанализировать рост параметров неровностей.

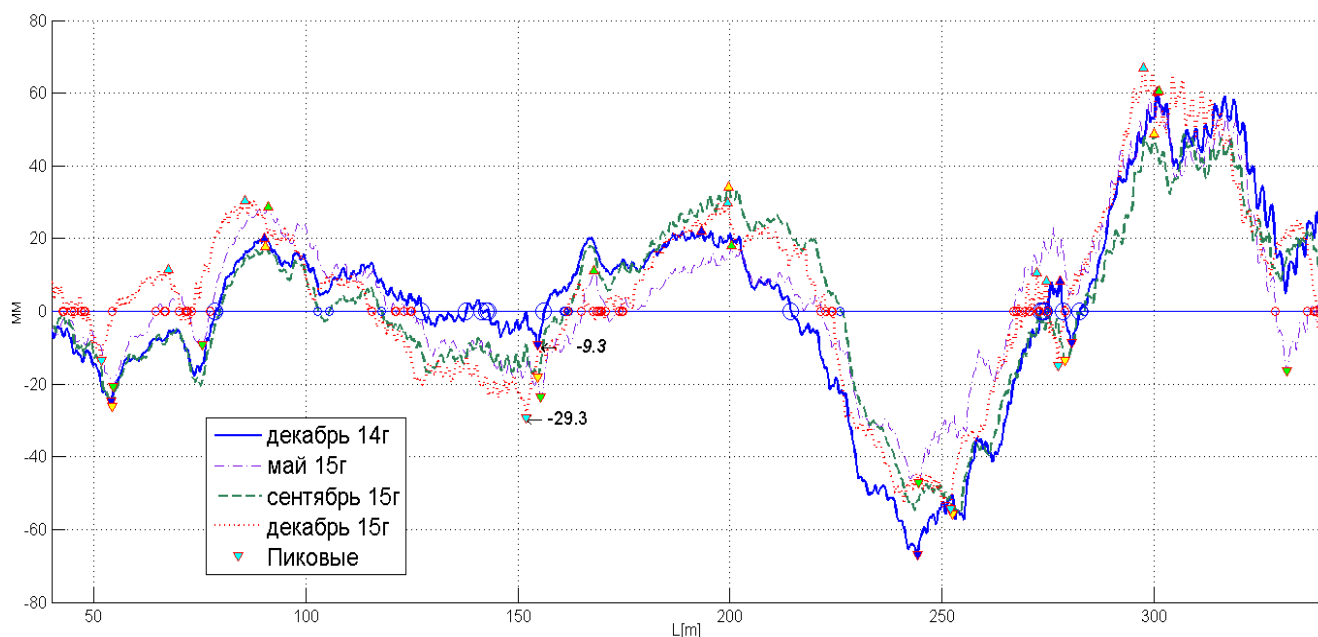


Рисунок 3.1 – Анализ неровностей в вертикальной плоскости в течение года

Рассмотрим историю исследований, связанных с безопасностью движения грузовых вагонов. Исследования, проведенные в разное время [131, 5, 110], позволили обратить внимание на необходимость наблюдения за неровностями в продольном профиле [133], вызванными деформациями железнодорожного пути на участках эксплуатации вагонов с повышенными осевыми нагрузками. Полученные данные позволяют анализировать процессы развития деформаций пути, особенно это актуально для участков с интенсификацией перевозочного процесса [134].

Ряд исследований [119-121], проводимых в 70-80-е гг. прошлого столетия, позволил получить данные для создания и утверждения Технических условий [10], в которых были учтены неровности, их размеры, что позволило сопоставить различные отступления рельсовой колеи со скоростями движения подвижного состава для обеспечения безопасности движения.

Исследования [120] позволили установить связь фактического состояния пути и динамических показателей вагонов, ходовых частей, и способствовали определению степени безопасности их движения.

Опытным путем было установлено [119], что максимальные и средние значения кромочных напряжений в рельсах практически одинаковы на длинных профильных неровностях, в отличие от значений, полученных на неровностях

меньшей длины, где максимальные значения кромочных напряжений возрастают значительно интенсивнее, чем средние. При наличии в пути перекосов и резких односторонних просадок длиной 5 метров вертикальные силы, действующие на путь, возрастают в 2 раза в начале неровности и снижаются в 2 раза на вершине неровности по сравнению с силами, действующими на путь без неровностей. В ходе исследований было определено, что наихудшее воздействие на подвижной состав оказывают неровности до 10 м и резкие односторонние просадки. При наличии в пути отступлений, вызванных односторонними просадками или сочетанием просадок и перекосов, рамные силы возрастают на 30-50%. Необходимо отметить, что при повышении скорости движения с 80 до 100 км/ч при движении по пути с такими отклонениями, значения рамных сил возрастают на 30% [121]. Именно повторяющиеся неровности оказывали неблагоприятное воздействие на динамику вагонов, что увеличивало вероятность схода вагона. Эти процессы вызывали повышенные вертикальные колебания вагонов, которые имели недостаточное вертикальное демпфирование при движении с высокими скоростями [135].

Исследования [136] позволили установить, что сочетание неисправностей в ходовых частях вагонов с отклонениями в содержании рельсовой колеи способствует разгрузке рессорных комплектов и возникновению больших поперечных сил и тем самым подтвердили опасность наличия сочетания неровностей в плане и профиле и их негативное воздействие на безопасность движения поездов [136].

Особое место в современных условиях занимают длинные неровности, как с точки зрения накопления расстройств земляного полотна, так и по влиянию на скорость движения подвижного состава [30].

Существующая практика содержания пути [138] в первую очередь требует устранения неисправностей, которые влияют на безопасность движения поездов, и которые отражены в действующей нормативной технической документации. В процессе эксплуатации железных дорог на участках обращения тяжеловесных поездов, а также поездов, составленных из вагонов с повышенными осевыми нагрузками, возникают проблемы, связанные с геометрией рельсовой колеи [139].

### **3.1 Существующие средства диагностики пути в профиле**

В работе [140] отмечено, что за последние 100 лет на железных дорогах произошло развитие средств диагностики пути от вагона-путеизмерителя системы Н.Е. Долгова до высокоточных средств измерения, используемых на сети железных дорог в настоящее время.

В настоящее время на железных дорогах широко используются различные средства диагностики, например, стандартные вагоны-путеизмерители, а также самоходная путеизмерительная лаборатория на базе электровоза ЧС200-08 (СПЛ-ЧС200) [141], самоходная многофункциональная диагностическая лаборатория на базе тепловоза (СМДЛ-2ТЭ116) [142]. Эти средства диагностики способны контролировать большой спектр параметров рельсовой колеи, а автономные информационно-измерительные системы установленные на электропоездах ЭВС1 «Сапасан» [143] и ЭС2Г «Ласточка» [144] способны дополнить контроль геометрии рельсовой колеи оценкой динамических реакций подвижного состава без применения дополнительных средств диагностики в режиме реального времени и передавать данные при регистрации отклонений. Однако не все параметры, которые способны измерять современные средства диагностики, учитываются при расшифровке и, следовательно, не устраняются в ходе плановых работ или текущего ремонта пути.

### **3.2 Влияние неровностей продольного профиля на подвижной состав**

На отечественных железных дорогах неровности рельсовых нитей, как правило, оценивают по измерению стрел изгиба от хорды (хордальным методом) [145]. На базе данного метода работают штатные вагоны-путеизмерители, измеряющие параметры, описанные Инструкцией [11, 12]. С появлением на железных дорогах нового подвижного состава, повышения скоростей движения, а также необходимости увеличения пропускной и провозной способности линий



возникла необходимость в совершенствовании нормативной документации по оценке рельсовой колеи. Исследования [66], позволили проанализировать влияние неровностей на динамическую нагруженность экипажа в рамках работы при проведении ходовых динамико-прочностных испытаний электропоезда Desiro RUS («Ласточка») [146]. Эти исследования позволили сделать первые шаги по совершенствованию нормативной документации оценки состояния пути [147], в которой возникают противоречия [69]. Разработка гармонизированных с европейскими нормативов содержания рельсовой колеи [20, 21] позволила сделать шаги к ранжированию параметров неровностей [86]. Эти нормативы относятся к так называемым, натурным неровностям, которые представляют собой реальное положение пути в плане и профиле.

### **3.3 Недостатки существующих методов**

Ещё в конце 50-х годов прошлого столетия, профессор М.Ф. Вериго уделял большое внимание вопросу деформациям в балласте под шпалой [44], проведенные исследования позволили углубиться в изучение динамики просевших рельсовых стыков, шпал и болтовых соединений. Д.т.н. С.Н. Шараповым отмечалось [148], что под шпалами образуются люфты, которые способствуют увеличению динамических сил в местах контакта в системе «колесо-рельс». Исследования ВНИИЖТ в 1986-1996 гг. позволили получить зависимость остаточных деформаций в балластном слое от пропущенного тоннажа (рисунок 3.2) в вагонах с осевой нагрузкой 270 кН/ось. Особенно этот процесс хорошо проявляется на пути с неровностями [45].

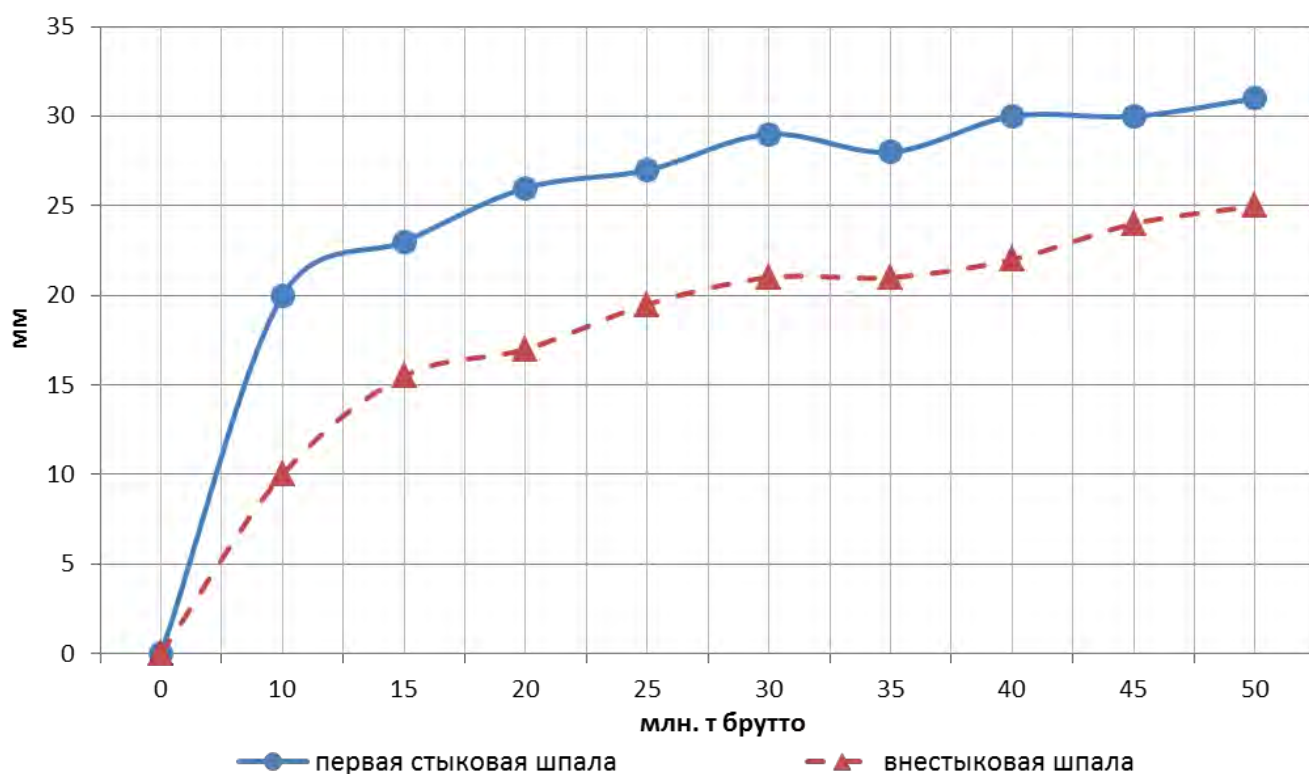


Рисунок 3.2 – Зависимость остаточных деформаций в балластном слое под шпалой от пропущенного тоннажа

Более детальное изучение этих процессов позволило перейти к изучению положения железнодорожного пути в пространстве [149]. Это положение может быть однозначно определено в системе трех координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  (рисунок 2.4) и описывается такими координатами как продольный профиль, план и профиль в поперечной плоскости.

Кандидат технических наук В.С. Лысюк отмечал [150], что за единицу интенсивности накопления повреждения может быть принята величина накопленного повреждения от единичного воздействия нагрузки, при этом исходным условием является положение, которое накапливается за какой-либо период эксплуатации. Повреждения зависят не только от величины действующих поездных нагрузок, а также и от количества их воздействий в определенный период [47]. Из этого следует, что деформации, вызывающие низкочастотные колебания подвижного состава (длинные неровности), возникают спустя определенный период времени [55]. Исследования [41] позволили определить, что устойчивая склонность повторного появления расстройств в вертикальной плоскости пути одного и того же вида на одних и тех же участках может быть вызвана таким

показателем как «первоначальное качество пути», которое закладывается при строительстве или ремонте линии, что подтвердили исследования [151], где отмечалось, что восстановление силовых неровностей не дает желаемого результата при регулярных выправках, процесс накопления осадок продолжается через короткий промежуток [152] пропущенного тоннажа.

В работе [62] д.т.н. О.П. Ершкова указывал, что в процессе эксплуатации многие виды расстройств, не определяются и не нормируются, из-за проверки путеизмерителями рельсовых нитей в вертикальной плоскости и не сопоставляющиеся с профильным положением [85, 153]. Доктором Бернхардом Х. Лихтбергером отмечалось [154], что для экономической оценки эффективности мероприятий по текущему содержанию пути необходимо использовать систему мониторинга состояния пути, на что обращал профессор Е.С. Ашпиз [29]. При этом интерес представляют не только стандартные параметры пути, но и временное развитие между измерительными проходами, то есть анализ состояния пути по данным, получаемым в реальном времени, например на пассажирском подвижном составе, эксплуатирующемся в реальном времени на действующем участке [61].

### **3.4 Требования к диагностике, вызванные изменением условий эксплуатации**

Первые результаты испытаний полувагонов модели 12 9548-01 с повышенными осевыми нагрузками 265 кН [156] на опытном участке Свердловской железной дороги Качканар–Смычка, проводимые в 2017–2018 гг., позволили специалистам ПГУПС [157] зафиксировать и подтвердить влияние повышенных осевых нагрузок на деформативность железнодорожного пути. Полученные данные [157] подтвердили результаты [5,110] по деформации земляного полотна в начальный период обращения поездов из вагонов с повышенными осевыми нагрузками. Стоит заметить, что осадки на контрольном

участке, по которому не обращались тяжеловесные поезда из вагонов с повышенными осевыми нагрузками, и остаточные деформации практически отсутствуют, по сравнению с участками на которых обращались вагоны с осевой нагрузкой 265 кН.

Приведенные данные подтверждают опыт повышения осевых нагрузок [102, 157] и необходимость наблюдения за деформациями пути, на которых обращаются тяжеловесные поезда и вагоны с повышенными осевыми нагрузками, что способствуют появлению и росту неровностей в вертикальном профиле. Эти отклонения (изменения) влияют на безотказную работу железнодорожного пути, а мониторинг [158] этих параметров железнодорожного пути только тогда соответствует своим задачам, когда он выполняется с помощью подходящих измерительных систем или программ, чтобы оценить в любой момент положение рельсового пути или пригодность инфраструктуры для безопасной железнодорожной эксплуатационной.

### **3.5 Возможные пути получения необходимой информации в частотной области**

Как сказано выше, отклонения от проектного геометрического положения пути измеряют по ряду параметров: положение пути в плане, ширина колеи, положение пути по уровню и продольному положению получаемых при штатных промерах вагонами-путеизмерителями и другими диагностическими средствами [159]. Эти параметры оказывают влияние на динамику движения подвижного состава, но получаемая на мобильных средствах диагностики (далее – МСД) исходная информация может быть использована для получения более обширной информации о состоянии пути. Во второй главе представлен способ получения параметров неровностей в профиле по данным МСД в процессе штатных проходов. Используя специальные передаточные функции, эти параметры можно

использовать в частотной области. В 1972 году БЭИ МСЖД рекомендовало применять спектральную плотность отклонений рельсовой колеи.

### 3.6 Анализ параметров длинных неровностей в профиле

В ходе наблюдения за грузонапряженными участками были выбраны для анализа длинных неровностей прямые участки с характерными неровностями, имеющими тенденцию к росту. Для этого анализа были выбраны участки Забайкальской железной дороги, имеющей одну из самых больших грузонапряженностей по сети дорог.

По данным полученным за 2014–2015 гг., было выявлено, что на рассмотренных прямых участках пути расположенных на Зиловской и Магочинской дистанциях пути (рисунок 3.3) по грузонапряженному пути (путь 2) имеются характерные неровности, анализ некоторых приведен на рисунках 2 и 3, а параметры этих неровностях приведены в таблицах 3.2 и 3.3.

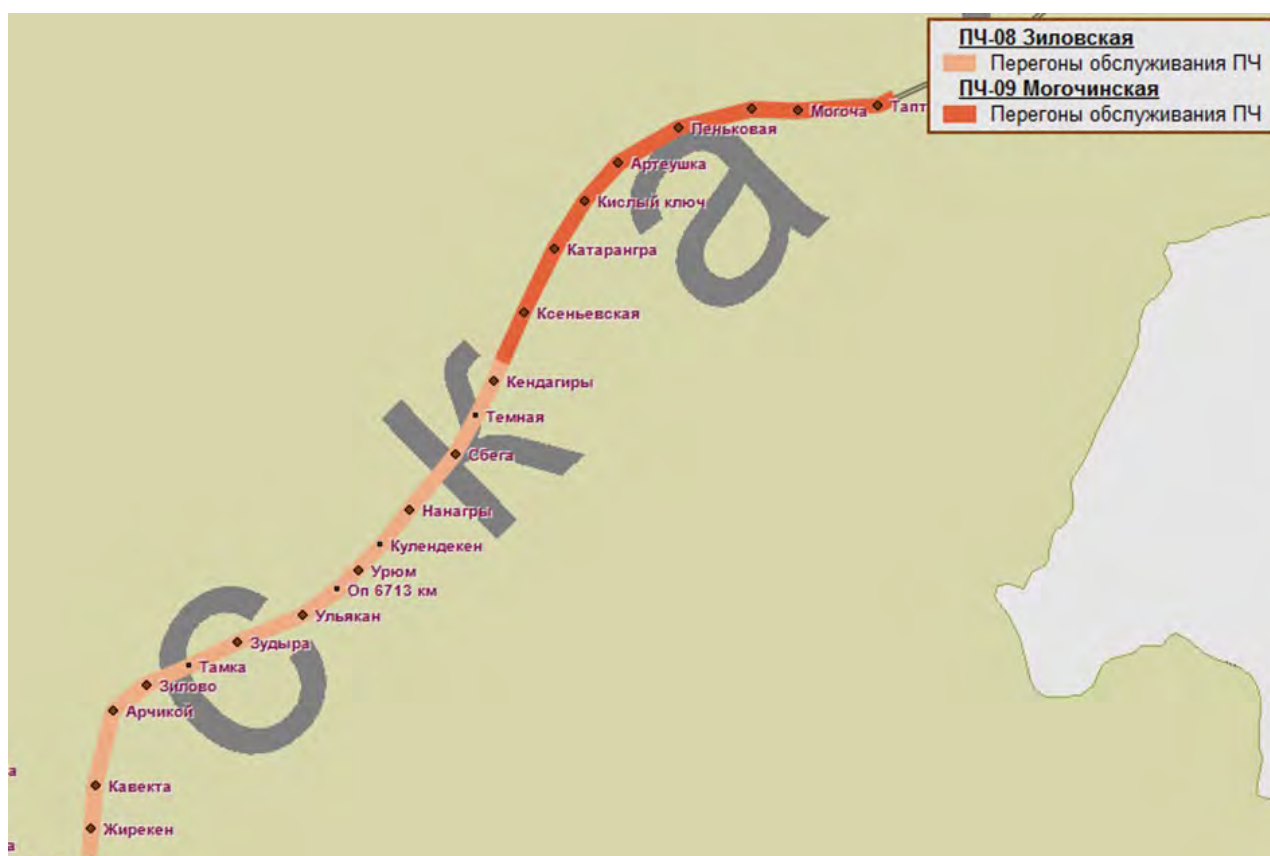


Рисунок 3.3 – Схема анализируемых участков Забайкальской железной дороги

На рисунке 3.4 и в таблице 3.2 представлен анализ неровности 1 на одном из участков, параметры которой изменяются за рассмотренный период времени.

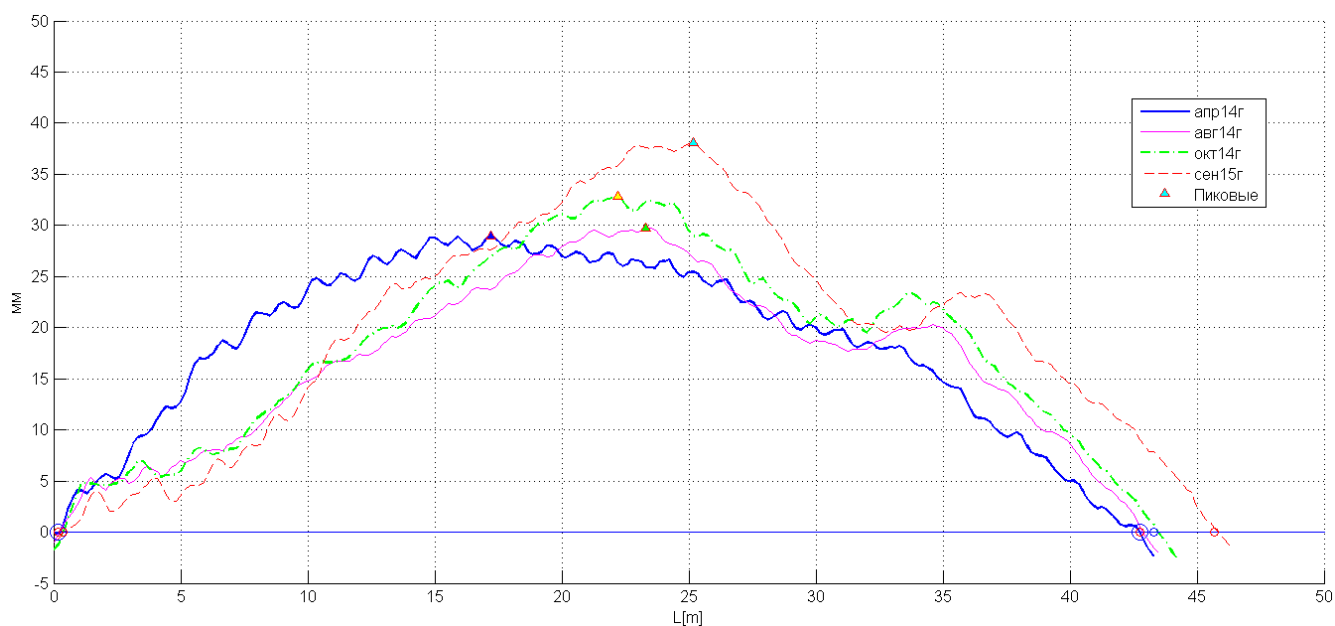


Рисунок 3.4 – Анализ неровности по грузонапряженному пути за период 2014-2015 гг.

Таблица 3.2 – Параметры неровности за 2014-2015 гг.

	Длина, м	Амплитуда, мм	Площадь м <sup>2</sup>
Апрель 2014 г.	42,55	28,93	0,701
Август 2014 г.	42,55	29,75	0,72
Октябрь 2014 г.	42,92	32,84	0,793
Сентябрь 2015 г.	45,325	38,06	0,898

Из данных, представленных в таблице 3.2 видно, что параметры представленной неровности за рассмотренный период изменяются, что говорит о накоплении деформаций.

На рисунке 3.5 и таблице 3.3 приведен анализ неровности 2 путь 2 за период 2014-2015 гг.

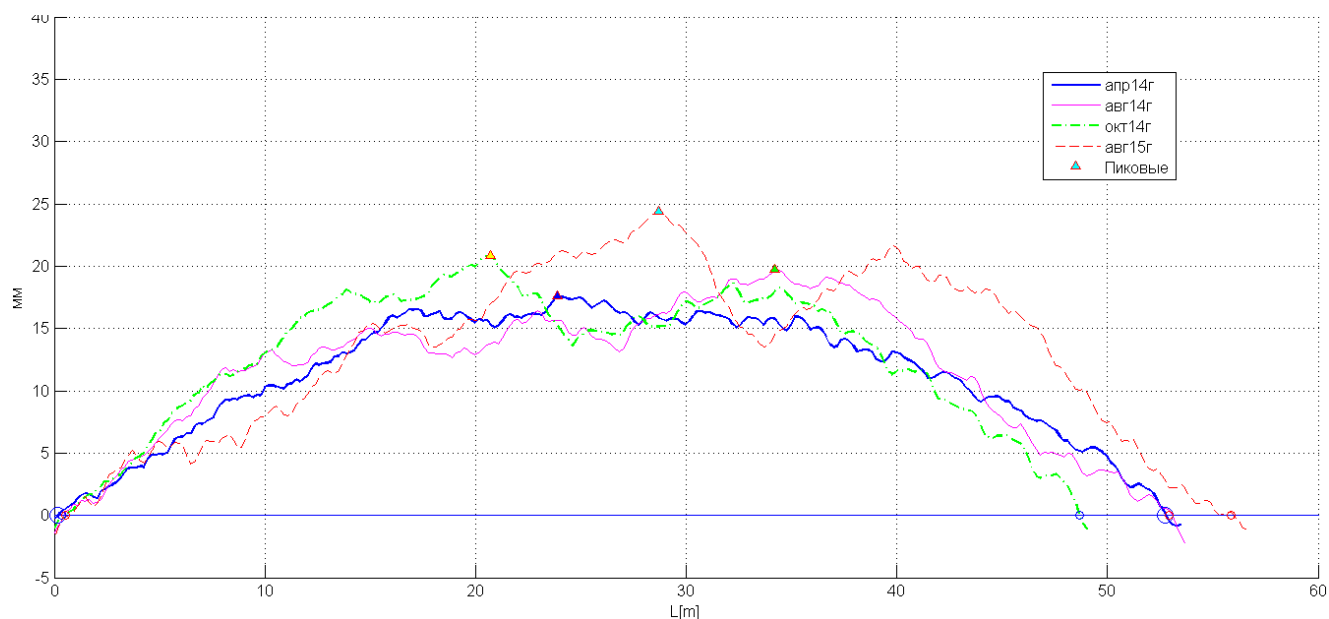


Рисунок 3.5 – Анализ неровности по грузонапряженному пути за период 2014-2015 гг.

Таблица 3.3 – Параметры неровности за 2014-2015 гг.

	Длина, м	Амплитуда, мм	Площадь м <sup>2</sup>
Апрель 2014 г.	52,54	17,6	0,596
Август 2014 г.	52,54	19,75	0,622
Октябрь 2014 г.	48,28	20,85	0,623
Август 2015 г.	58,31	24,4	0,73

Из приведенных данных на рисунке 3.5 и в таблице 3.3 видно, что все рассмотренные параметры имеют тенденцию к увеличению за рассмотренный период.

Для сравнения параметров длинных неровностей были рассмотрены участки обращения тяжеловесных поездов, расположенных на Горьковской железной дороге (направление Киров-Свердловск по пути 1). Анализ неровностей, изображенных на рисунках 3.6 и 3.7, также была зафиксирована тенденция к увеличению.

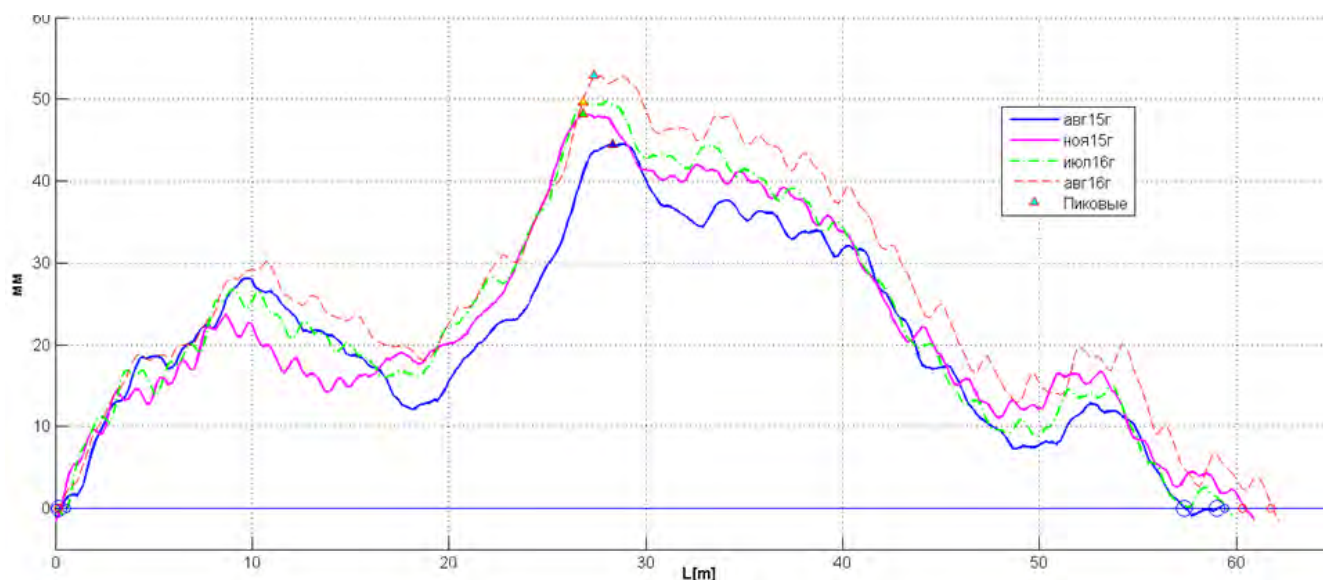


Рисунок 3.6 – Анализ неровности на участке Горьковской железной дороги за 2015-2016 гг.

Таблица 3.4 – Параметры неровности на участке Горьковской железной дороге за 2015-2016 гг.

	Длина, м	Амплитуда, мм	Площадь м <sup>2</sup>
Август 2015	57,165	44,52	1,254
Ноябрь 2015	60,125	48,24	1,360
Июль 2016	58,83	49,71	1,3926
Август 2016	61,605	52,88	1,6049

Анализ данных, приведенных на рисунке 3.6 и в таблице 3.4 показывает, что параметры неровности на рисунке 4 имеют тенденцию к увеличению по всем показателям за рассмотренный период.

Анализ параметров неровности, изображенной на рисунке 3.7, позволил зафиксировать уменьшение некоторых из параметров (таблица 3.5) на участке. Это объясняется тем, что летом 2016 г. на анализируемом участке проводились работы по модернизации пути.



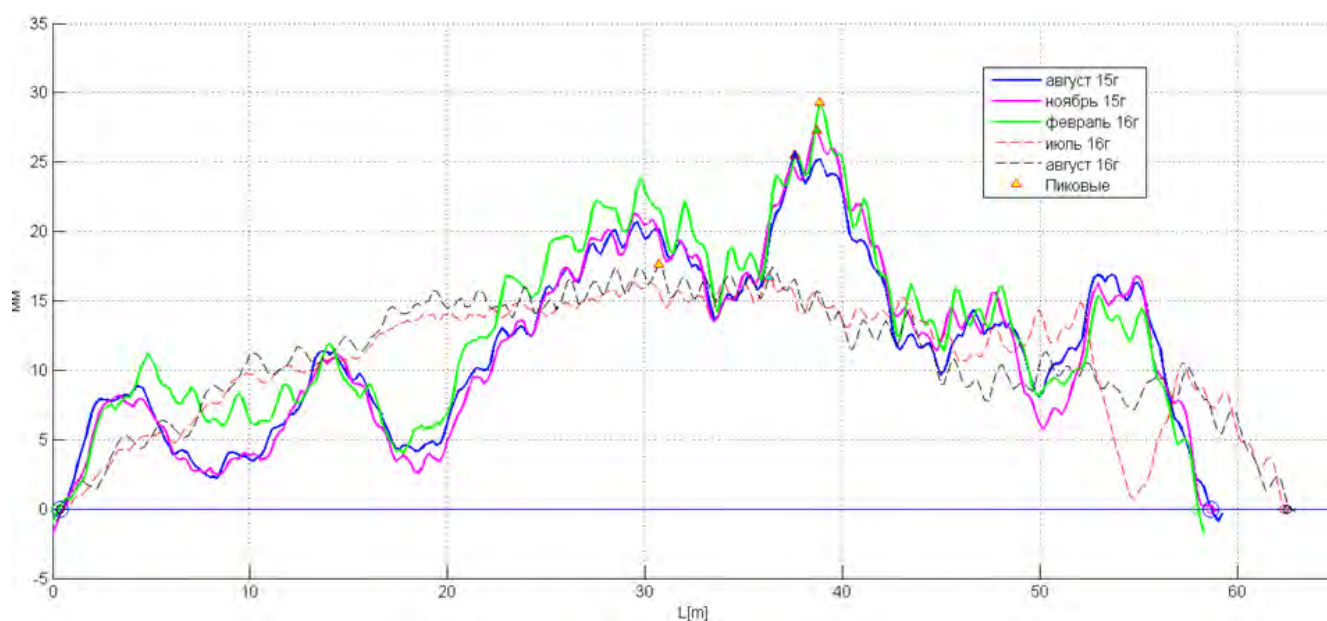


Рисунок 3.7 – Анализ неровности на участке Горьковской железной дороги за 2015-2016 гг.

Таблица 3.5 – Параметры выявленной неровности на участке Горьковской железной дороги за 2015-2016 гг.

	Длина, м	Амплитуда, мм	Площадь м <sup>2</sup>
Август 2015	58,275	25,49	0,6821
Ноябрь 2015	58,275	27,31	0,6944
Февраль 2016	57,720	29,34	0,7541
Июль 2016	61,975	16,68	0,6815
Август 2016	62,16	17,63	0,69

Анализ данных, приведенных на рисунке 3.7 и в таблице 3.5 показал, что параметры неровности на участке Горьковской ж.д. имеют тенденцию к увеличению, однако, в июле и августе 2016 года видно явное уменьшение амплитуды, что объясняется проведенными работами по модернизации участка. Из приведенных данных в таблице 3.5 видно, что после ремонтных работ увеличилась длина неровности при уменьшении амплитуды неровности.

Приведенные данные хорошо иллюстрируют картину накопления деформаций пути, что подтверждает необходимость наблюдения и нормирования параметров неровностей в вертикальной плоскости.

### **3.7 Влияние длинных неровностей в профиле на динамические показатели подвижного состава**

Японские специалисты отмечали [160], что контроль низкочастотных колебаний, вызванных длинными неровностями в профиле, очень важен на высокоскоростных линиях. Это было отмечено ещё в 1964 г. со времён открытия высокоскоростной линии Токайдо. Приведенные исследования показали, что характеристики неровностей пути зависят от амплитуды и длины волны неровностей. К низкочастотным неровностям относятся неровности в диапазоне от 30 до 80 м (которые обеспечивают плавность хода); к средневолновым относятся неровности с длиной волны от 5 до 30 м (которые обеспечивают безопасность движения), к высокочастотным относятся неровности образованные на поверхности катания рельса в диапазоне от 0,05 до 1 м (от которых возникает шум и изменяется нагрузка от колес на рельс).

Если для грузовых поездов плавность хода важна с точки зрения прочности сцепных устройств, то для пассажирских поездов возникающие продольные ускорения могут нарушать необходимый комфорт пассажиров. На зарубежных железных дорогах величина вертикальных ускорений устанавливается в пределах 0,08–0,5 м/с<sup>2</sup>, это связано с различной конструкцией и жесткостью рессорного подвешивания пассажирских вагонов [161]. Стоит отметить, что вертикальные ускорения выше 0,2–0,3 м/с<sup>2</sup> вызывают неприятные ощущения нагрузки и разгрузки, что негативно сказывается на комфортабельности пассажиров.

Например, для оценки комфорта проезда пассажиров используются показатели европейского норматива [162], который обязан соблюдаться национальными организациями по стандартизации следующих стран: Австрии, Бельгии, Болгарии, Кипра, Чехии, Дании, Эстонии, Финляндии, Франции, Германии, Греции, Венгрии, Исландии, Ирландии, Италии, Латвии, Литвы, Люксембурга, Мальты, Нидерландов, Норвегии, Польши, Португалии, Румынии, Словакии, Словении, Испании, Швеции, Швейцарии и Великобритании.

Одним из основных факторов для определения плавности хода является «качество» пути, от которого зависит уровень комфортности поездки и степень стабильности пути [163].

Ряд исследований, подтверждающих вышеприведенные сведения, позволили проанализировать участки с высокоскоростным и скоростным движением. На рассмотренных участках были зафиксированы низкочастотные колебания тележек и кузова высокоскоростного поезда «Сапсан», которые влияли на комфортабельность пассажиров.

На участках эксплуатации высокоскоростных поездов «Сапсан», в процессе опытной поездки на электропоезде ЭВС-06 13 октября 2017 г., на участке Москва – Санкт-Петербург, на вагоне 03-TRT3 в 16:19:25 произошло срабатывание датчика КУХ [164], что соответствует 199 км 2 пути. Скорость движения на участке при этом составляла 197 км/ч. Вовремя опытной поездки производилась запись вертикальных и горизонтальных поперечных ускорений кузова вагона 05ВАТR-05, а также горизонтальные поперечные ускорения тележки.

На рисунке 3.8 представлены горизонтальные поперечные ускорения тележки вагона 05-ВАТR5. Вертикальной красной линией отмечено время срабатывания КУХ на вагоне 03-TRT3. Расстояние между 3 и 5 вагонами составляет ~55 м, что при скорости движения 197 км/ч (54,7 м/с) расхождение во времени прохождения места срабатывания КУХ составляет ~ 1 секунду.

После чего, данные ускорений были сопоставлены с данными неровностей в вертикальной плоскости на данном участке (рисунок 3.9) полученных с помощью метода описанным в главе 2.

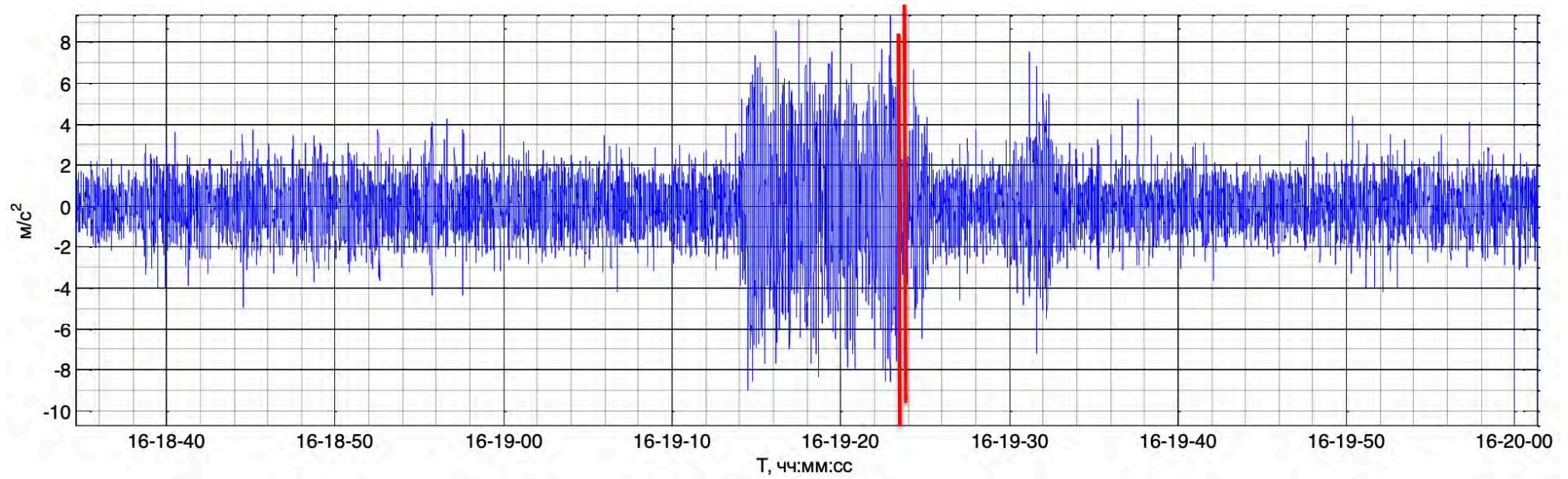


Рисунок 3.8 – Горизонтальные поперечные ускорения второй тележки вагона 05-ВАТР5 электропоезда ЭВС1-06, зафиксированные в опытной поездке 13 октября 2017 г. на участке Москва – Санкт-Петербург во время срабатывания датчика КУХ на вагоне 03-ТРТЗ электропоезда ЭВС1-06 в 16:19:25



Рисунок 3.9 – Анализ данных неровностей в профиле пути на участке срабатывания датчиков КУХ 199 км по второму пути

На рисунке 3.9 представлен анализ данных неровностей в профиле пути на участке срабатывания датчиков КУХ на 199 км по второму пути. На графике (рисунке 3.9) хорошо видно, что за 5 месяцев (с октября 2017 по апрель 2018 гг.) происходит рост параметров неровностей в профиле (амплитуда и длина). При профильных неровностях, достигающих 60 м и более, становятся ощутимыми при скоростях движения свыше 180 км/ч, при скоростях 230-240 км/ч происходят возбуждение элементов подвижного состава на частоте собственных колебаний при сравнительно невысоких амплитудах [30].

Исследования [165] показали, что на участках срабатывания системы КУХ, геометрия рельсовой колеи согласно формам ПУ-32 не превышала 2-й степени, балловая оценка состояния пути 10 (отлично) и 40 (хорошо). Проведенные наблюдения, позволили сделать вывод, что амплитуды ускорений в частном диапазоне, характеризующие состояние близкое к потере устойчивости движения соответствуют частотам 4-8 Гц, что соответствует низкочастотным неровностям [160], которые не учитываются при штатных проходах вагонов-путеизмерителей.

Был проведен анализ участков со смешанным движением, на котором эксплуатируются скоростные электропоезда Desiro-Rus «Ласточка». В ходе опытных поездок на направлении Москва – Смоленск (Московской железной

дороги), были зафиксированы системой непрерывного контроля показателей динамической системы экипажа — путь (КПДС) [66], частые колебания с большой амплитудой, влияющие на показатель «комфортабельность», определяемый по параметрам [162, 166].

Согласно данным стандарта [162], методы количественной оценки воздействия движения транспортного средства на удобство проезда пассажиров и оценки транспортного средства в отношении удобства проезда рассматривают только ту часть комфорта, которая находится под влиянием вибрации и движения транспортного средства.

Оценка комфорта проезда пассажиров по показателю  $C_{Cy}$  состоит из:

- а) измерений ускорений на полу транспортного средства;
- б) записи сигналов ускорений и фильтрацией с применением частотно взвешенного фильтра;
- в) оценки среднеквадратичных значений по заданному алгоритму.

В соответствии с этим нормативом оценка выполняется для двух зон - в центре кузова и в кузове над тележкой. В приведенных данных оценка выполнена по показателю  $C_{Cy}$  методом оценки непрерывного комфорта по оси  $Y$ .

Значения показателя комфорта проезда пассажиров  $C_{Cy}$  делятся на следующие градации комфорта:

- $0,0 \text{ м/с}^2 \leq C_{Cy} < 0,2 \text{ м/с}^2$  – очень комфортно;
- $0,2 \text{ м/с}^2 \leq C_{Cy} < 0,3 \text{ м/с}^2$  – комфортно;
- $0,3 \text{ м/с}^2 \leq C_{Cy} < 0,4 \text{ м/с}^2$  – среднекомфортно;
- $0,4 \text{ м/с}^2 \leq C_{Cy}$  – низкокомфортно.

Полученные данные в ходе опытных поездок, позволили сопоставить и проанализировать параметры «комфортабельность» и неровностей в вертикальной плоскости на участках, с повышенными динамическими показателями, изображенных на рисунках 3.10-3.17. Это позволило получить ответ на вопрос о природе колебаний при движении электропоезда «Ласточка». Согласно данным, изображенных на рисунках 3.10 и 3.11 на участке на 316-320 км (Москва – Смоленск путь 1) были зафиксированы значения превышающих параметров

системы. Проведенный анализ данных километров, позволил получить данные о неровностях продольного профиля рассматриваемых километров (рисунок 3.10).

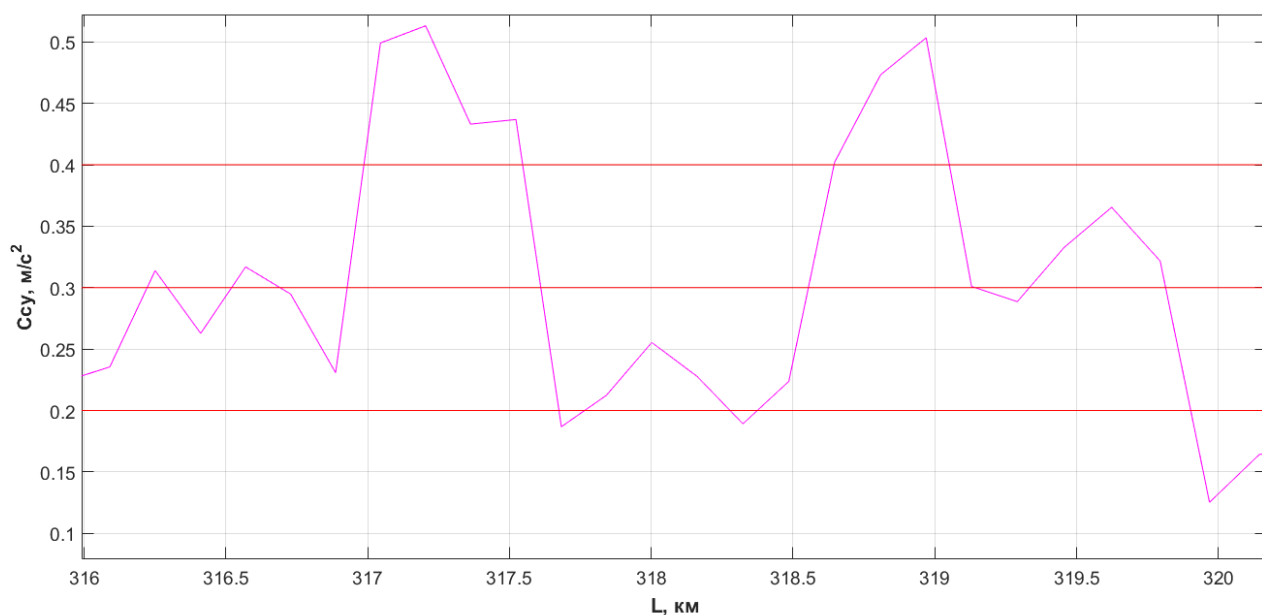


Рисунок 3.10 – Показания, полученные по параметрам «Непрерывный комфорт» по оси Y на участке 316-320 км пути1 Москва – Смоленск

На рисунке 3.10 хорошо видно, что параметр комфортабельности ( $C_{cy}$ ) значительно превышает показатель 0,4 м/с<sup>2</sup>.

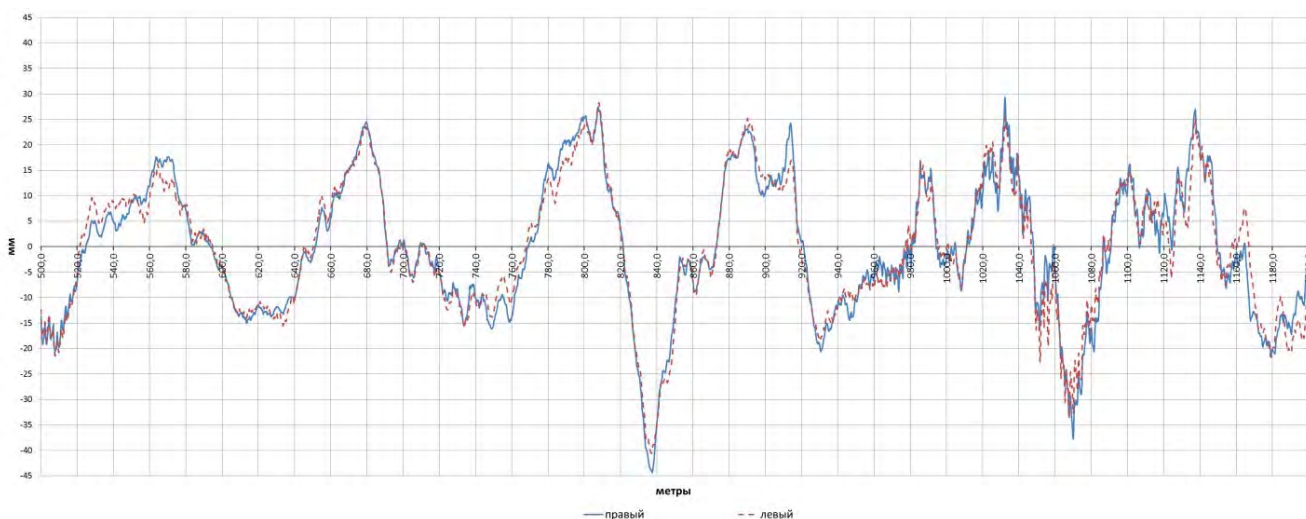


Рисунок 3.11 – Неровности в профиле на участке срабатывания системы 316-317 км пути1

На рисунке 3.11 представлены данные по вертикальным неровностям на участке превышения параметра  $C_{cy}$ . Из данных (рисунок 3.11) хорошо видно, что на рассматриваемом участке имеются неровности в продольном профиле, пиковые значения амплитуд достигает 40 мм, а длина превышает 30 м.

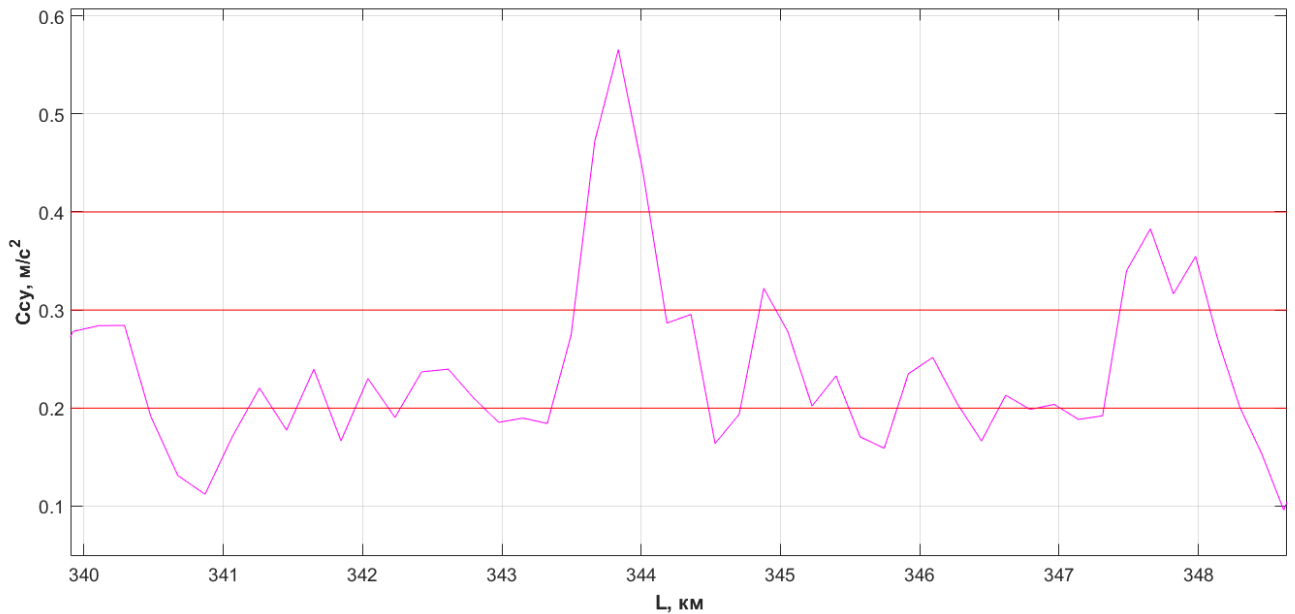


Рисунок 3.12 – Показания, полученные по параметрам «Непрерывный комфорт» по оси Y на участке 343-344 км пути1 Москва – Смоленск

На рисунке 3.12 изображены данные по параметру комфортабельности ( $C_{cy}$ ), на участке 343-344 км имеется всплеск превышающий параметр  $C_{cy} > 0,4 \text{ м/с}^2$ .

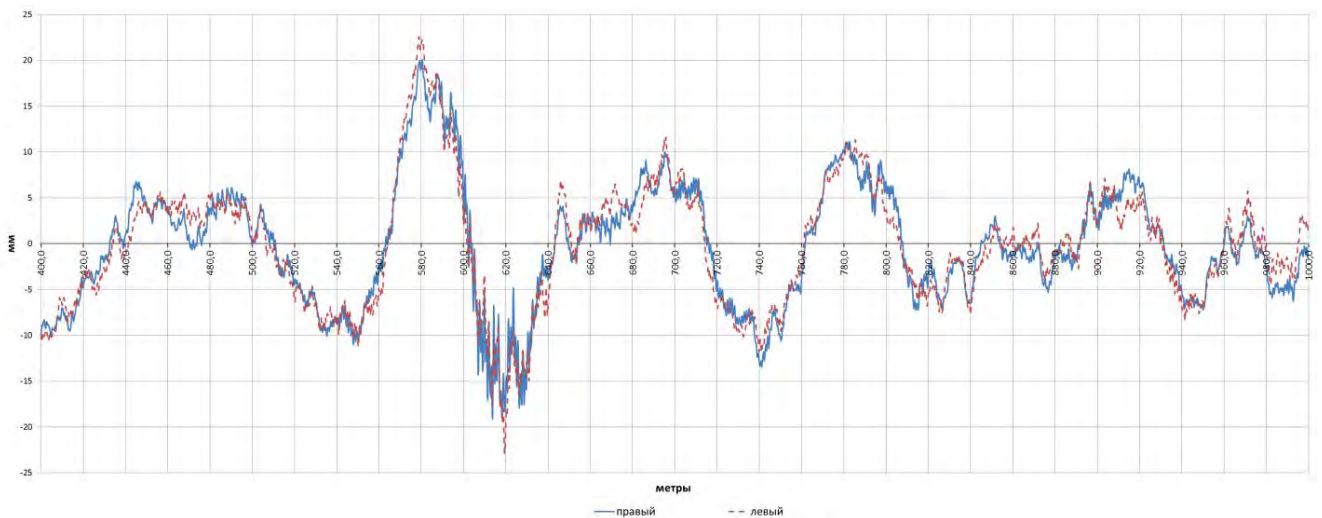


Рисунок 3.13 – Неровности в профиле на участке срабатывания «системы» на 343-344 км пути1 Москва – Смоленск

На рисунке 3.13 представлены данные по вертикальным неровностям на участке превышения параметра  $C_{cy}$ . Из представленных данных (рисунок 3.13) хорошо видно, что на рассматриваемом участке имеются неровности с резкими перепадами, и пиковые значения амплитуды достигают 25-30 мм, а длина неровности превышает 30 м.



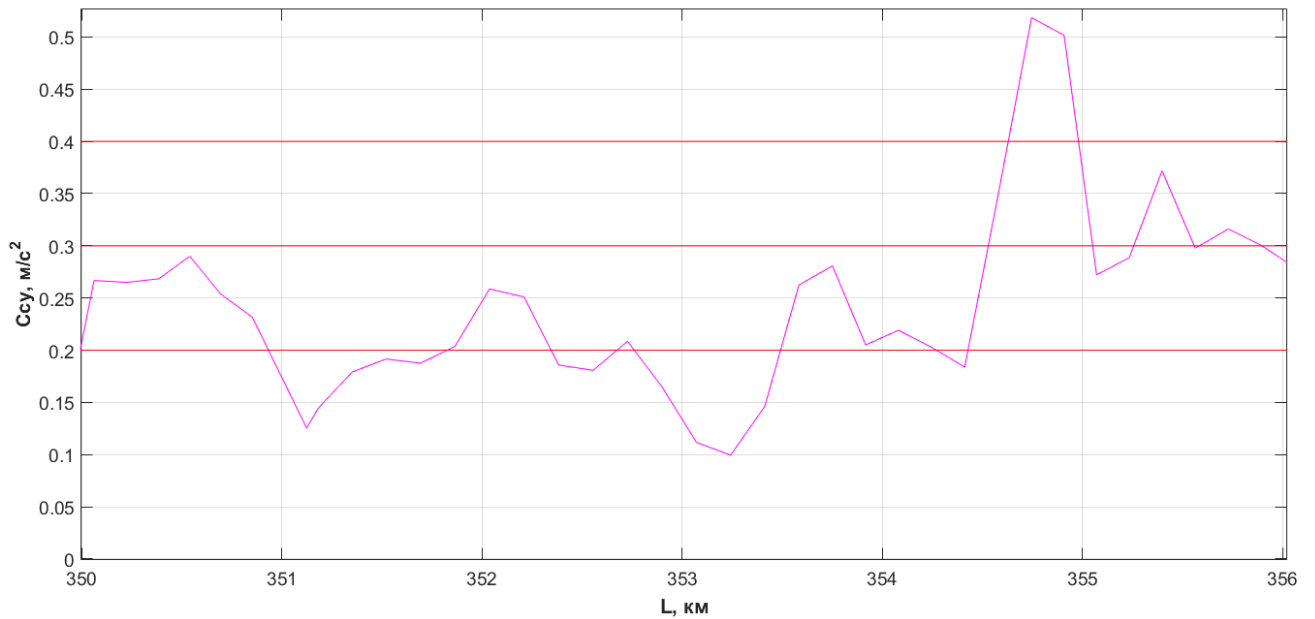


Рисунок 3.14. Показания, полученные по параметрам «Непрерывный комфорт» по оси Y на участке 355-354 км путь2 Смоленск – Москва

На рисунке 3.14 изображены данные по параметру комфортабельности, на участке 355-354 км, и имеется всплеск превышающий параметр  $C_{cy} > 0,4$ .

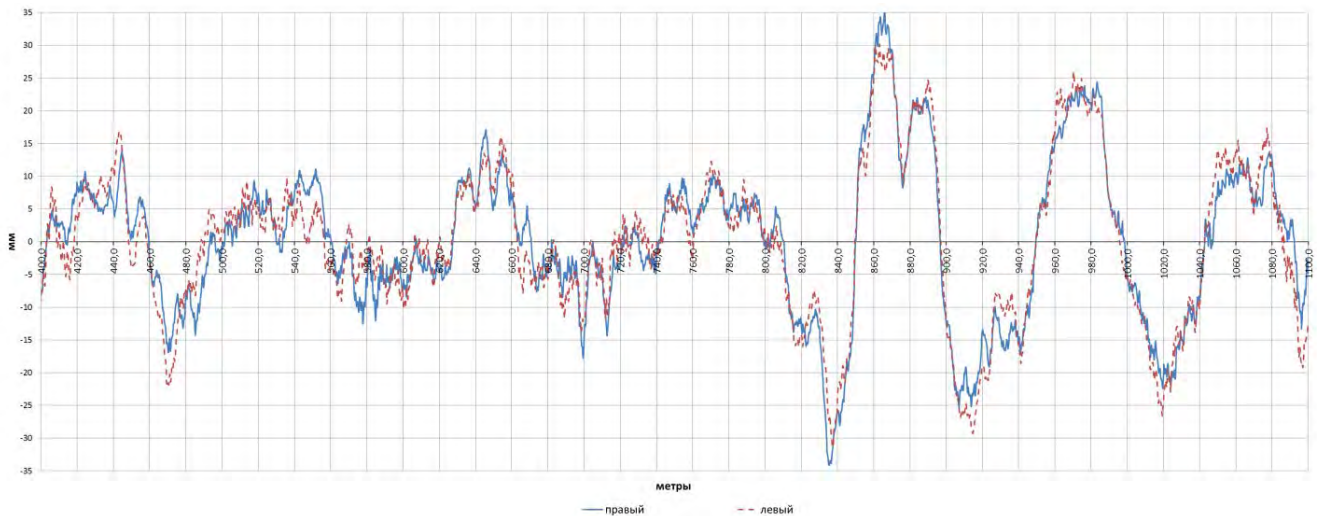


Рисунок 3.15. Неровности в профиле на участке срабатывания «системы» на 355-354 км путь2 Смоленск – Москва

На рисунке 3.15 представлены данные по вертикальным неровностям на участке превышения параметра  $C_{cy}$ . Из представленных данных (рисунок 3.15) хорошо видно, что на рассматриваемом участке имеются неровности с резким перепадом пиковых значений амплитуды, достигающих 30-35 мм, а длина неровности превышает 30 м.

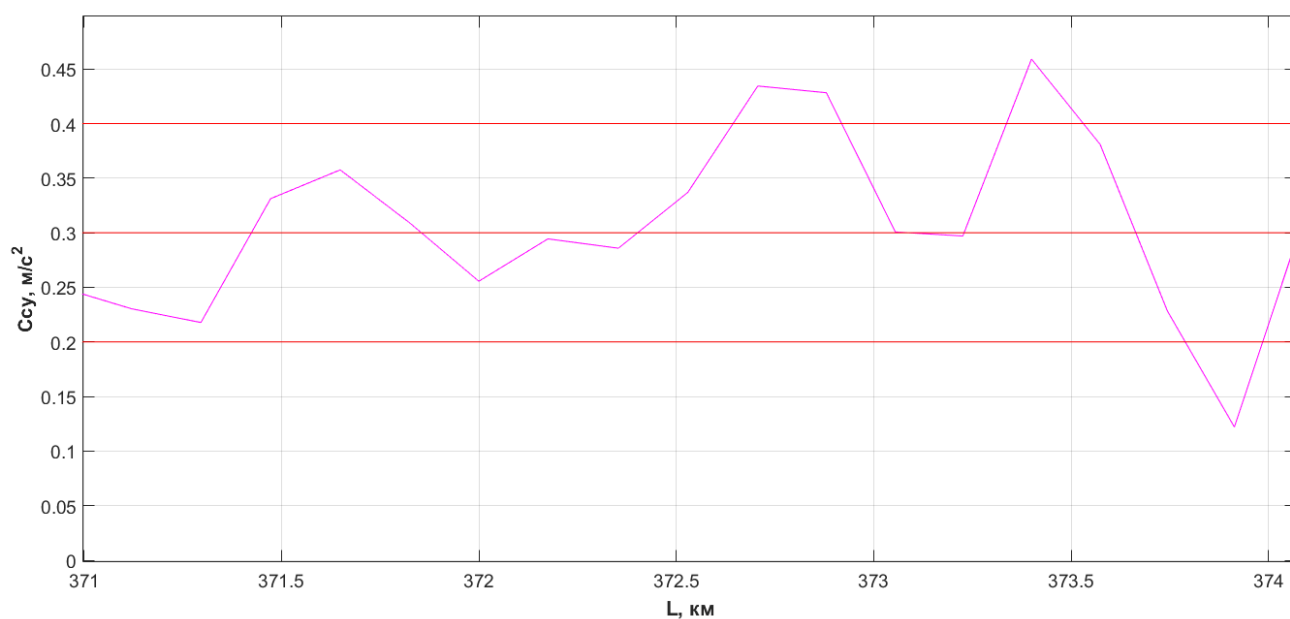


Рисунок 3.16 – Показания, полученные по параметрам «Непрерывный комфорт» по оси Y на участке 372 км путь2 Смоленск – Москва

На рисунке 3.16 изображены данные по параметру комфортабельности, и на участке 372-373 км имеется всплеск превышающий параметр  $C_{cy} > 0,4$ .

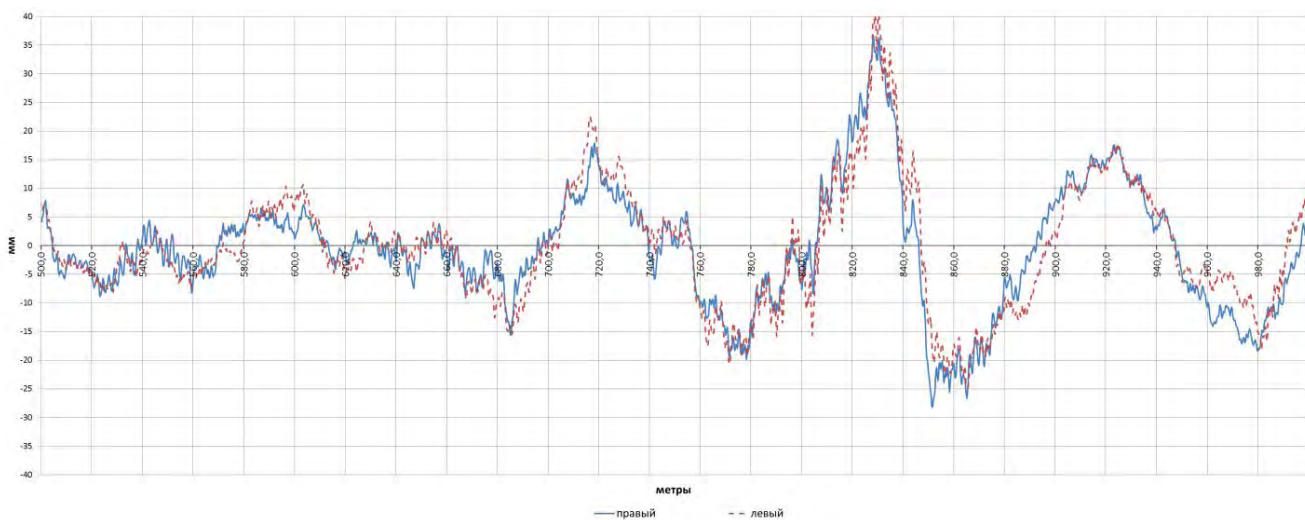


Рисунок 3.17 – Неровности в профиле на участке срабатывания «системы» на 372 км путь2 Смоленск – Москва

На рисунке 3.17 представлены данные по вертикальным неровностям на участке превышения параметра  $C_{cy}$ . Из представленных данных (рисунок 3.17) хорошо видно, что на рассматриваемом участке имеются неровности с резкими перепадами пиковых значений амплитуды, достигает 40 мм, а длина неровности превышает 30 м.

Приведенные данные, подтверждают исследования [66, 68] о влиянии неровностей продольного профиля на динамику скоростного и высокоскоростного состава.

### **3.8 Влияние длинных неровностей в профиле на безопасность движения**

Как отмечалось в [167], что основными причинами схода подвижного состава с рельсов является:

- 1) неисправности пути;
- 2) неисправности подвижного состава;
- 3) неисправности устройств СЦБ и связи;
- 4) организационные недостатки.

Стоит отметить [167], что общее количество сходов распределяется примерно, как: 25% – на главных путях; 50% – на станционных путях; 35% – на стрелочных переводах. Из этого следует, что более 80% случаев сходов происходит на станциях, где скорости не велики. На главных путях сходы происходят в основном из-за неудовлетворительного взаимодействия пути и подвижного состава [168], поскольку на главных путях перегона большое значение имеет скорость движения поездов, которая и влияет на вертикальные и горизонтальные силы, действующие на путь. Так как железнодорожный путь в вертикальной и горизонтальной плоскостях представляет собой волнообразную линию с незакономерно изменяющимися неровностями [169], то эти неровности являются основной причиной вызывающие большие усилия при взаимодействии колеса и рельса при перекатывании по неровностям [167]. Дополнительные силы, возникающие на длинных неровностях, которые зависят от типа рельсов, балласта, шпал, их состояния, статической нагрузки колеса на рельс, неподрессоренного веса, добавочной силы от колебания на рессорах и скорости движения. Стоит отметить, что эти безударные силы на высоких скоростях, могут достигать 50 кН [167]. Как отмечалось профессором С.М. Захаровым в книге [170], что сходы

тяжелогруженных вагонов вследствие вползания колеса на рельс происходит редко, однако, если путь находится в неудовлетворительном состоянии, то это может спровоцировать сход вагона.

В исследованиях [171] отмечалось, что на динамику наливных поездов наибольшее влияние оказывают боковые и продольные колебания, возникающие при движении поезда по пути с неровностями в плане и профиле [172]. Профессор Ю.С. Ромен отмечал [173], что для исследования колебаний рельсовых экипажей нужно внешние воздействия, которыми могут быть геометрические неровности рельсовой колеи. Специалистами АО «ВНИКТИ» были проведены исследования [174, 175], которые позволили определить основные критерии оценки безопасности движения в эксплуатации является коэффициент запаса устойчивости  $K_y$  колеса от схода с рельса. Исследования [175] позволили определить, что имеются сочетания неровностей, в которых при определенных условиях взаимодействия колеса, с рельсом возникающих при неисправностях второй и большей степени в прямых участках пути возникает интенсивный рост силовых факторов.

Исходя из вышеупомянутого, для анализа геометрии рельсовой колеи на месте сходов подвижного состава были проанализированы данные на наличие неровностей в профиле плане и определением их параметров.

### **3.8.1 Анализ схода 1 на Горьковской железной дороге**

Анализ состояния пути по параметрам неровностей в вертикальной плоскости, на участке схода допущенного 19.05.2016 г. на перегоне Просница – Ардаши Горьковской железной дороги, позволил сопоставить данные вертикальных неровностей и данные полученных при нивелировке пути (рисунки 3.18 и 3.19).

Состояние пути на 1013 км четного пути перегона Ардаши-Просница по вагону-путеизмерителю оценивалась:

- на 01.01.2016 года, балловая оценка «отлично», неисправностей 2-ой степени нет, отступлений под знаком вопроса, требующих особого внимания – 5 шт. (непогашенное ускорение от 0,63 до 0,71 на 10 метрах), в кривой радиусом 646

метров не соответствие координат переходной кривой по рихтовке и уровню до 70 метров;

- на 15.05.2016 года, балловая оценка «отлично», неисправностей 2-ой степени 1 шт. (397 метр перекося пути 2-ой степени 12 м на 8 метрах), отступлений под знаком вопроса, требующих особого внимания – 5 шт. (непогашенное ускорение от 0,61 до 0,7 на 11 метрах), в кривой радиусом 646 метров несоответствие координат переходной кривой по рихтовке и уровню до 72 метров.

В 2015 г. при планово-предупредительной выправке 2-го пути (14.09.2015 года) путевой машиной Дуоматик 09-3х №19, проведённой со 2 пк 1013 км по 1 пк 1015 км, параметры данной кривой не были приведены к проектным параметрам (проект 2008 года), несоответствие координат переходной кривой по рихтовке и уровню после работ составило 72 метра, при этом километр оценён на «отлично», выявлено 2 неисправности пути 2-ой степени по уширению пути (ПС№045 от 18.09.2015).

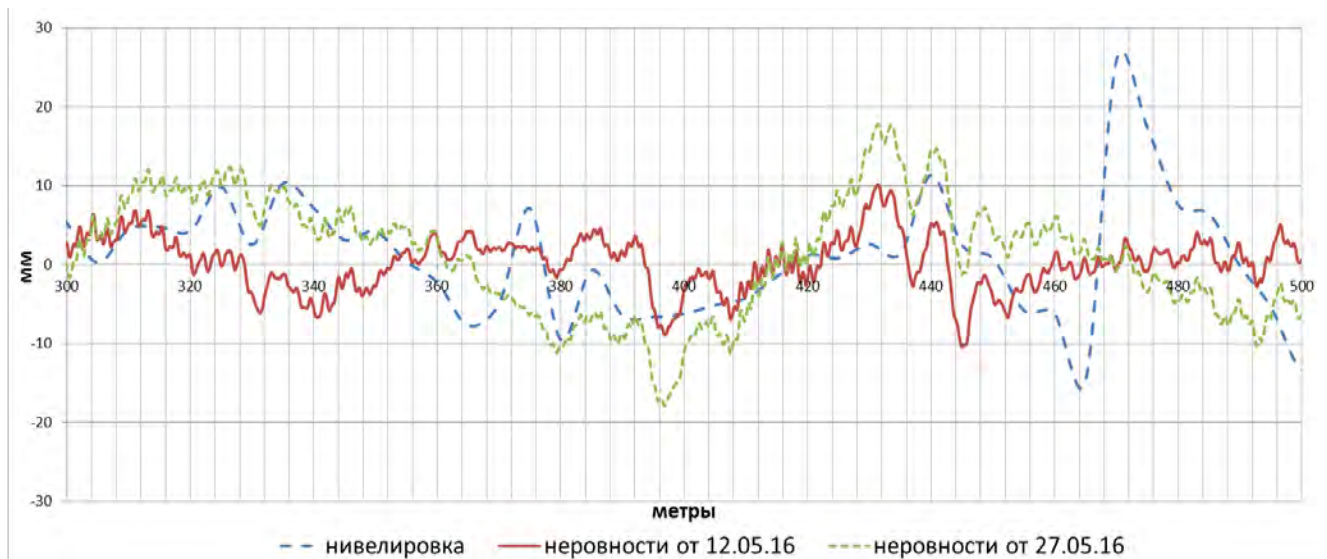


Рисунок 3.18 – Сопоставление данных по левому рельсу, полученных при нивелировке и числовым методом

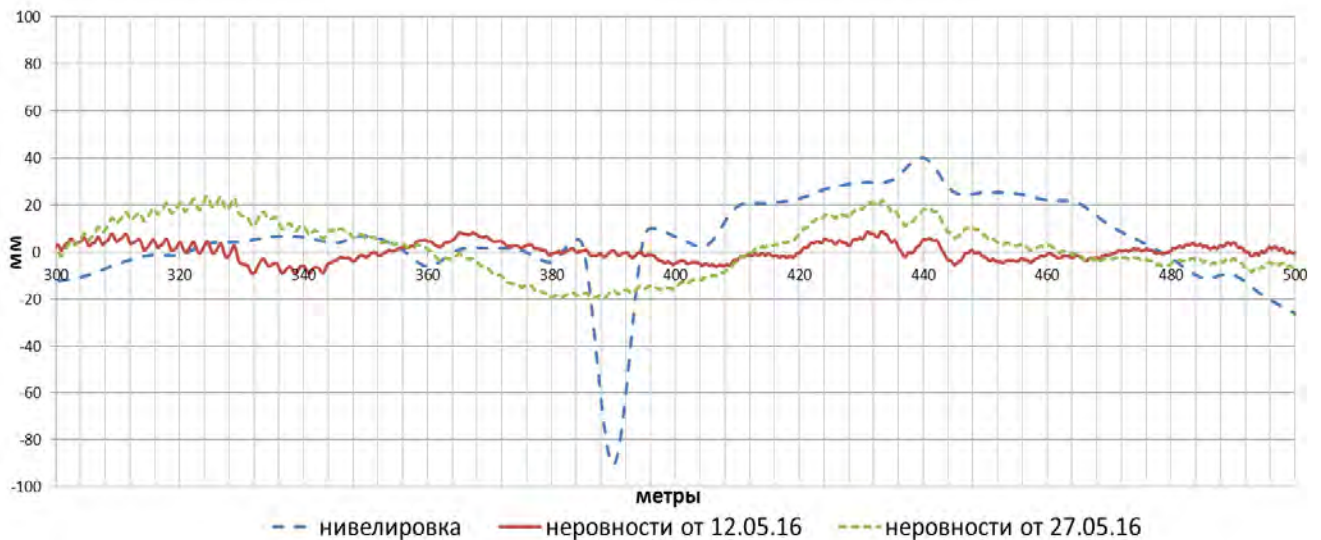


Рисунок 3.19 – Сопоставление данных по правому рельсу, полученных при нивелировке и числовым методом

Из данных, представленных на рисунках 3.18 и 3.19 видно, что параметры неровностей продольного профиля полученные с помощью преобразования данных по просадкам вагона-путеизмерителя методом, описанным в главе 2, хорошо коррелируются с данными по нивелировке. Однако есть сочетание неровностей по правому и левому рельсам, которые были зафиксированы при помощи нивелировки продольного профиля (без нагрузки) и изображены на рисунках 3.18 и 3.19. Сочетание такого рода неровностей продольного профиля могут послужить причиной схода [168, 171].

### 3.8.2 Анализ схода 2 на Горьковской железной дороге

Стоит отметить, что к ухудшению показателей динамического взаимодействия пути и подвижного состава, и появлению опасности схода вагонов могло привести неблагоприятное сочетание неровностей (в плане и профиле), которые по результатам измерений оцениваются как допустимые. К такому случаю относится сход 6 вагонов, произошедший 20 июня 2019 года на 496 км участка Каменище – Тарталей Горьковской железной дороги в составе грузового поезда, составленного из 64 груженых полувагонов и шедшего со скоростью 63 км/час. По результатам оценки вагона-путеизмерителя ПС – 104 на участке схода (496 км путь 1) отступления от норм содержания пути были выявлены следующие:

– 06.06.2019г рабочий проход. Километр оценен – 40 баллов «хорошо». Выявлено 11 неисправностей 2 степени (Перекос 2 приближенная к 3 степень на 54 м – 15 мм на 18 м; Рихтовка 2 степени на 64 м – 18 мм на 25 м; перекос 2 степени на 214 м – 12 мм на 17 м; перекос 2 степени на 281 м – 11 мм на 7 м; рихтовка 2 степени на 328 м – 19 мм на 23 м, перекос 2 степени на 475 м 11 м на 18 м, уровень 2 степени на 632 м – 9 мм на 2 м, перекос 2 степени на 707 м – 11 м на 16 м, просадка левая 2 степени на 831 м – 11 мм на 3 м, просадка правая 2 степени на 831 м – 11 мм на 3 м, просадка левая 2 степени на 852 м – 11 мм на 3 м).

После получения данных проходов вагона-путеизмерителя была проведена их обработка методом [102, 112], что позволило получить параметры натуральных неровностей в плане и профиле. На рисунке 3.20 представлены неровности в плане и в профиле на участке схода 6 вагонов. Затем данные неровности были перенесены в программный комплекс «Универсальный механизм» (рисунок 3.21), что позволило промоделировать процесс движения поезда, состоящего из 64 вагонов по пути с полученными неровностями со скоростью 63 км/час.

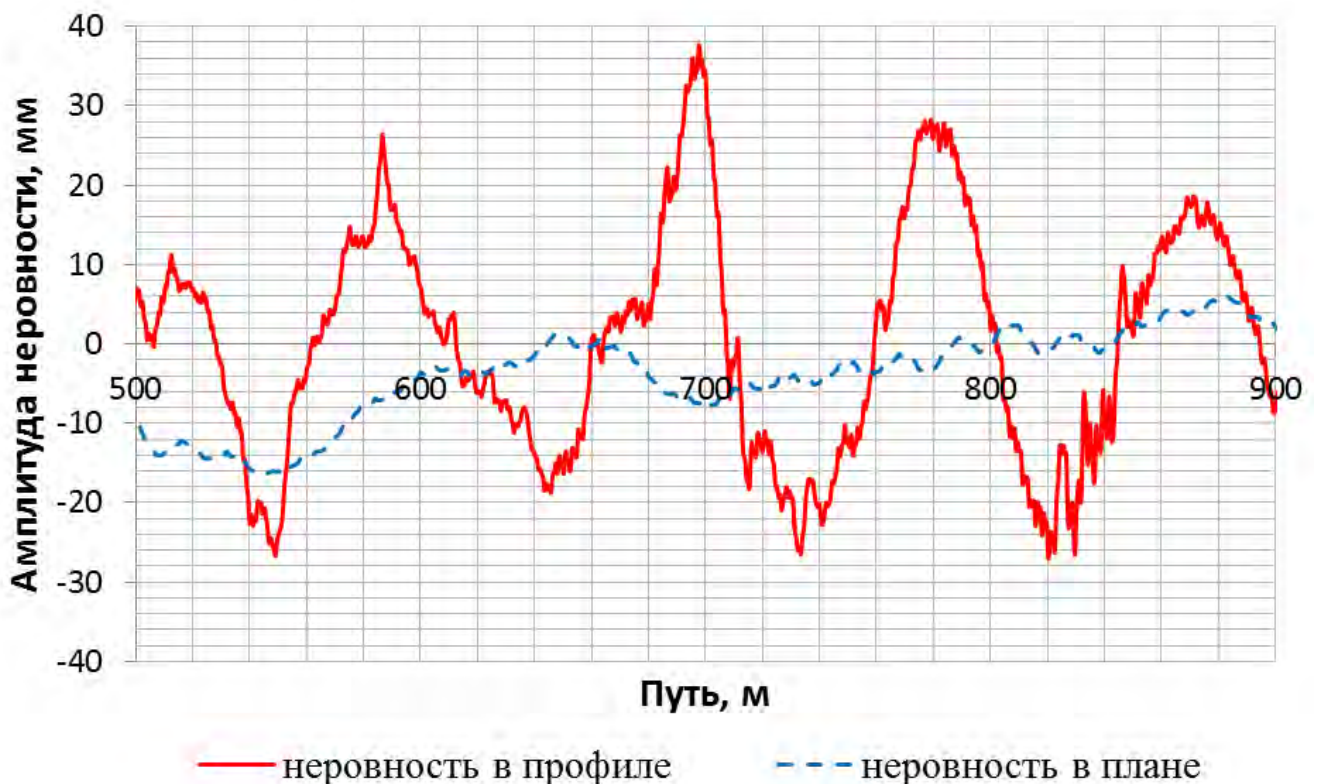


Рисунок 3.20 – Неровности пути в плане и в профиле на участке схода вагонов

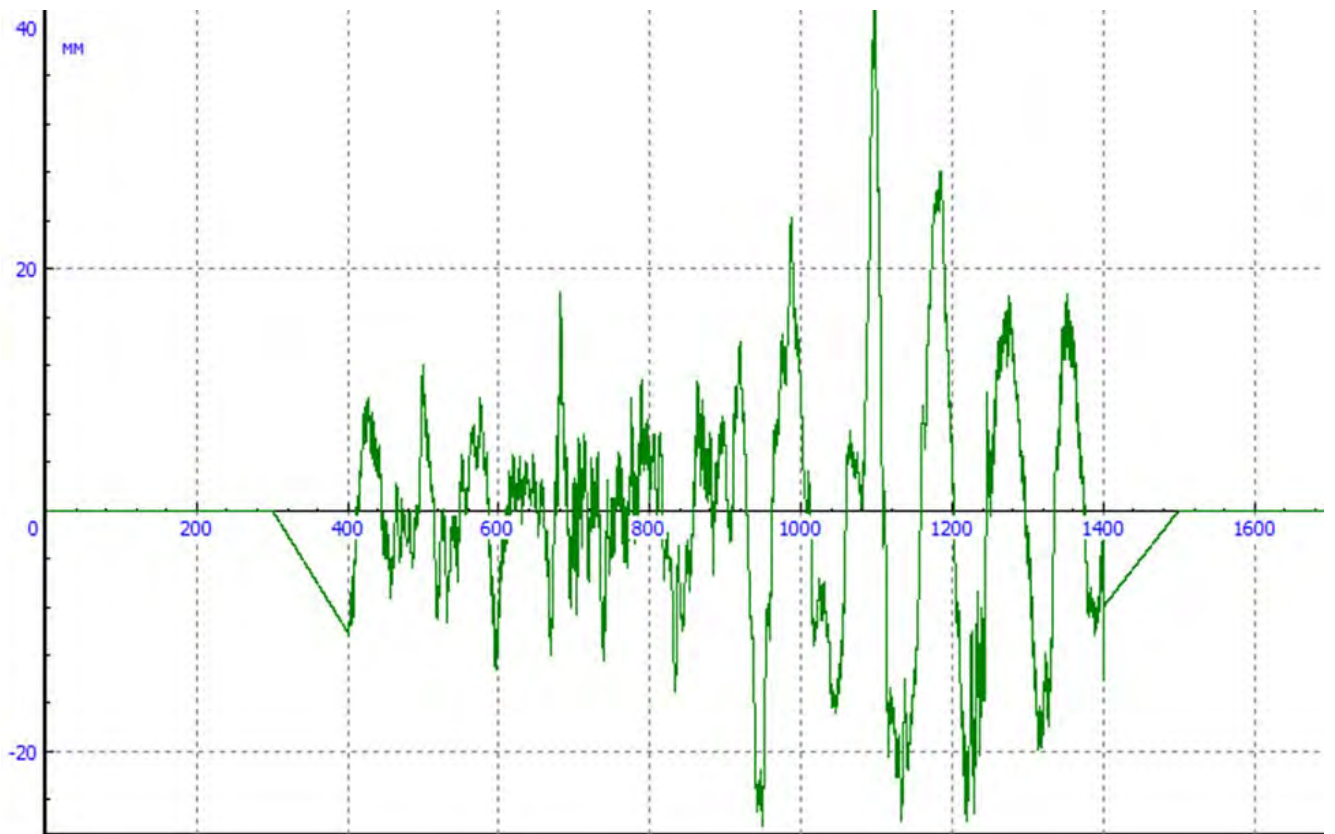


Рисунок 3.21 – Неровность в профиле, перенесенная в программный комплекс «Универсальный механизм» (496 километр участка Каменище – Тарталей Горьковской железной дороги)

По результатам расчетов были получены коэффициенты динамики (КД) для каждого вагона грузового поезда (рисунок 3.22). Из данных приведенных на рисунке 3.22 видно, что на ряде вагонов (начиная с 25 вагона) имеет место значительное превышение рекомендуемых и допустимых значений КД, а в некоторых случаях даже превышение предельного значения равного единице, что свидетельствует об опасности схода вагона.



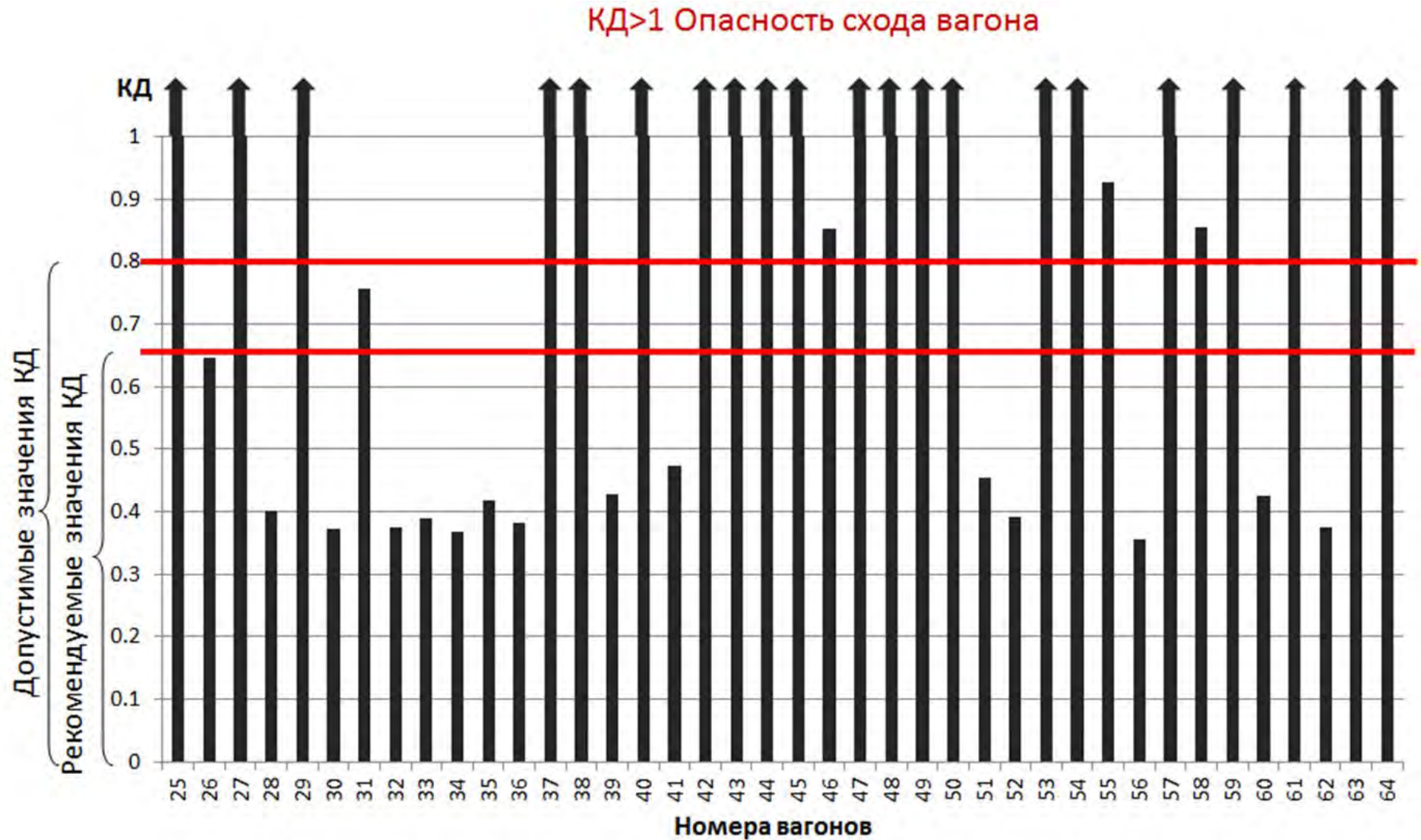


Рисунок 3.22 – Коэффициенты динамики, полученные при моделировании движения поезда по неровностям пути в плане и в профиле (496 километр участка Каменище – Тарталей Горьковской железной дороги)

### 3.8.3 Анализ схода 3 на Московской железной дороге

Другим примером влияния длинных неровностей в профиле на безопасность движения, является сход, произошедший 12 июля 2020 года на 223 км пк5 II главного пути участка Лазарево – Щекино Тульского территориального управления Московской железной дороги. В момент схода вагонов состав находился на подъеме 5,9‰ в режиме тяги.

По данным прохода вагона-путеизмерителя от 8 июля 2020 г. № 109, километр оценен – 40 баллов «хорошо», выявлено 12 неисправностей 2 степени, в том числе уширение – 0, перекос – 8, просадка – 1, уровень – 0, рихтовка – 3.

Полученные данные измерительных систем позволили получить параметры длинных неровностей в продольном профиле на участке схода (рисунок 3.23). Расчетная схема, представленная на рисунке 3.24, показывает, что при проходе вершины неровности первым вагоном, первая тележка второго вагона может быть частично обезгружена, что подтверждают исследования [176] проводимые ВНИИЖТ, позволившие определить возникновение вертикальных сил в автосцепках при прохождении вертикальных неровностей.

Построенная в программном комплексе «Универсальный механизм» модель движения на подъем грузового поезда массой около 6000 т в режиме локомотивной тяги трехсекционным локомотивом со скоростью 60 км/час по неровностям, выявленным на участке схода, позволила получить расчеты [177]. Полученные данные показали, что коэффициенты вертикальной динамики первой ступени рессорного подвешивания вагонов имели близкие к предельным значения ( $\sim 0,7$ ) (рисунок 3.25). Следует отметить, что модели вагонов, используемые для расчета, принимались без отступлений в состоянии ходовых частей.

Дальнейшие расчеты позволили определить величины вертикальных сил, принимаемых ударно-центрирующим прибором автосцепки (маятниковой подвеской) при прохождении вагона по неровностям (рисунок 3.23), достигали 70 тс. При этом полученные в результате расчета вертикальные силы на хвостовике автосцепки приблизительно лежали в диапазоне 25-30 тс [177].

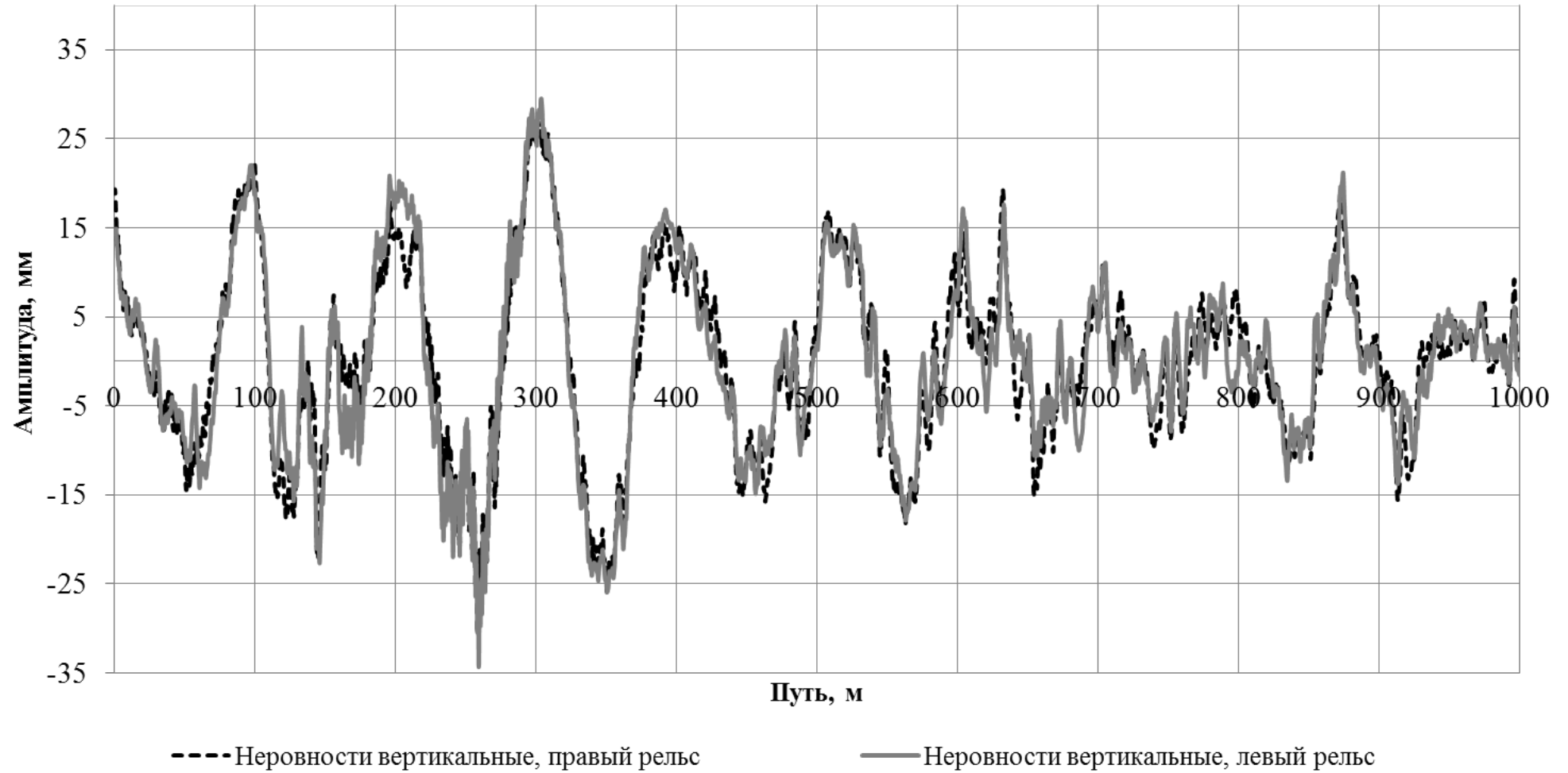


Рисунок 3.23 – Неровности продольного профиля на участке схода на 223 км ПК5 участка Лазарево – Щекино (Московская железная дорога)

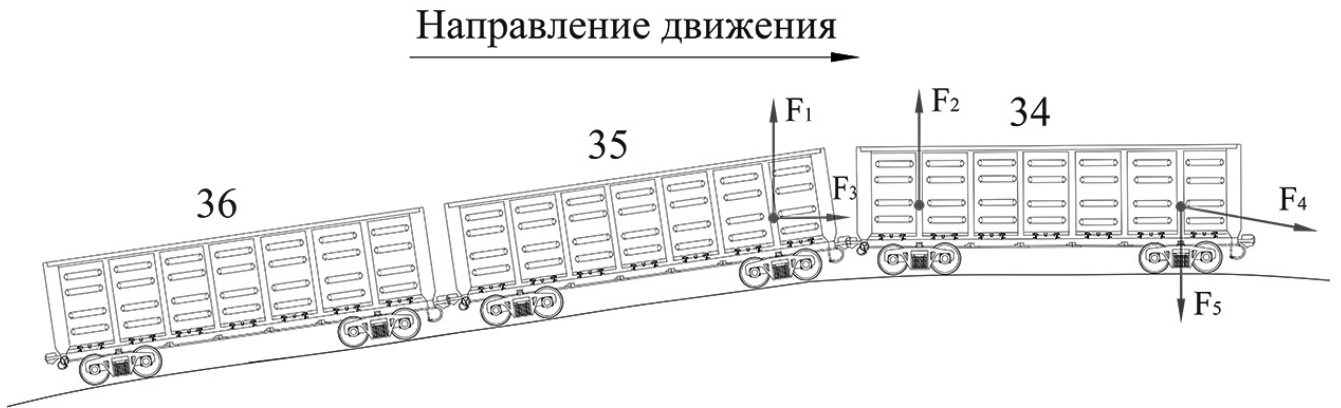


Рисунок 3.24 – Расчетная схема прохождения вагонами вершины неровности, с тягой локомотивом ВЛ-11 (3 секции) на подъеме:  
 $F_1, F_2, F_3, F_4, F_5$  – силы, возникающие при прохождении вершины неровности сцепом вагонов с частичной обезгрузкой

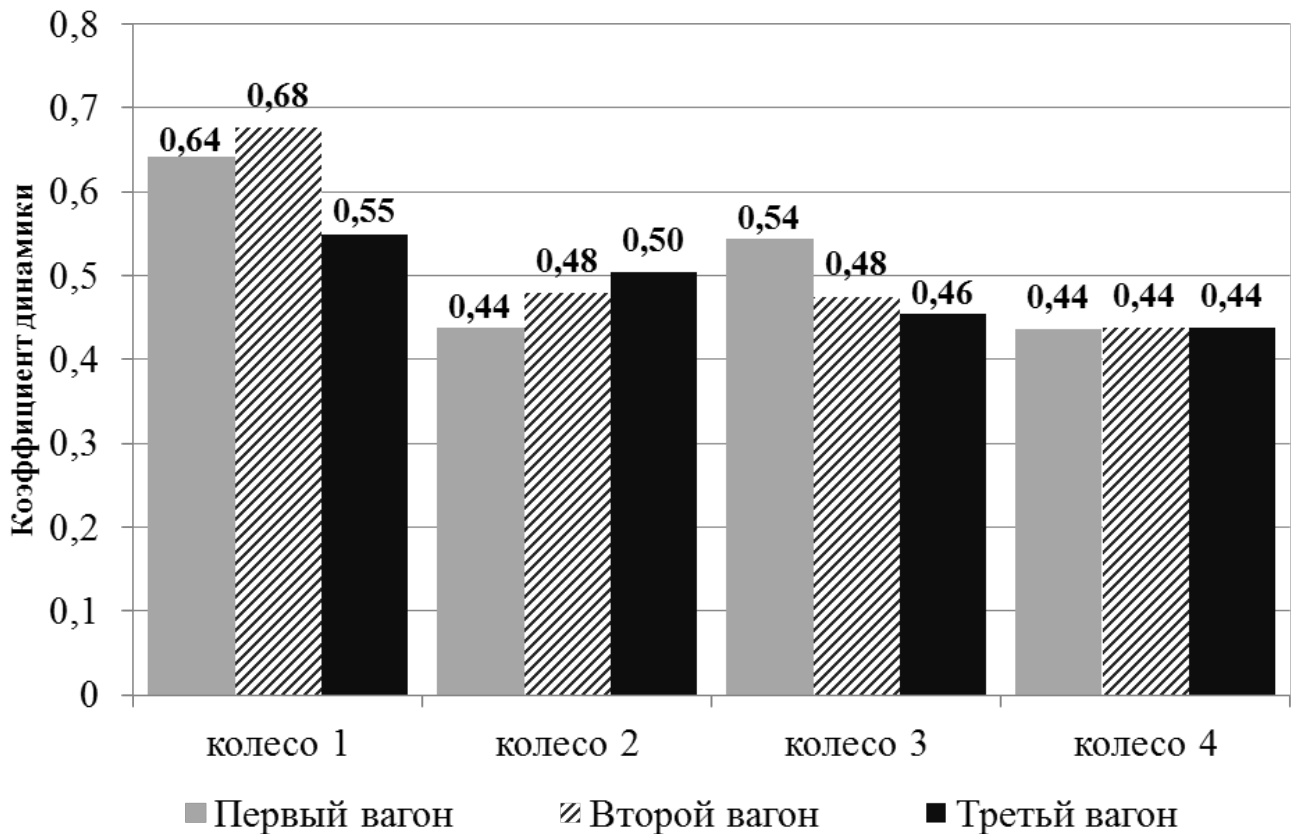


Рисунок 3.25 – Коэффициенты динамики вагонов, полученные расчетным методом на участке с неровностями в профиле

Вышеизложенные данные подтверждают ранее проведенные исследования [175] по влиянию на динамику экипажей отклонений геометрии рельсовой колеи в плане и профиле. Стоит отметить, что отклонения рельсовой колеи в профиле, которые послужили причиной схода 6 вагонов на Московской железной дороге по данным проходов вагона-путеизмерителя не были выявлены, что подтверждает

гипотезу о не регистрировании неровностей продольного профиля более 20-30 м. Таким образом, применение метода определения параметров вертикальных неровностей на сети железных дорог для мониторинга состояния железнодорожного пути в профиле, позволит следить за деформативностью пути, оценивать его состояние и прогнозировать проведение ремонтных работ, как на скоростных и высокоскоростных участках, так и на участках с тяжеловесным движением, в том числе на участках эксплуатации вагонов с повышенными осевыми нагрузками.

Как показывает практика, ненормируемые на сегодняшний день длинные неровности пути могут не только влиять на динамические показатели подвижного состава, но и создавать угрозу для безопасности движения тяжеловесных грузовых поездов.

Для того, чтобы показать влияние длинных неровностей на динамику подвижного состава, необходимо рассмотреть схему сил, действующих на состав в точке вершины неровности [178], схематически изображенной на рисунке 3.24.

В работе [178] было отмечено, что, если принять условие, при котором поезд имеет вид непрерывного гибкого стержня, можно записать уравнение равновесия, для хвостовой и головной части поезда. Запишем уравнение для отсеченной головной части, имеющей вид (3.1).

$$\left(\frac{Mx_1}{l} + M_1\right)\ddot{x} = T_K - F_1 - W_1 - W_0, \quad (3.1)$$

где:

$M$  – масса состава, кг;

$x_1$  – длина отсеченной части состава, м;

$M_1$  – масса локомотива, кг;

$\ddot{x}$  – вторая производная пройденного расстояния по времени, м/с<sup>2</sup>;

$T_K$  – касательная тяга, Н;

$F_1$  – сила, действующая, Н;

$W_0$  – сила сопротивления движению локомотива, Н;

$W_1$  – сила сопротивления движения вагона на первом участке пути, Н.

Для хвостовой части состава уравнение равновесия будет иметь вид (3.2).

$$\frac{M\ddot{x}(l-x_2)}{l} = F_2 - W_2, \quad (3.2)$$

где:

$x_2$  – длина отсеченной хвостовой части состава, м;

$F_2$  – сила, действующая на вагон в конце состава;

$W_2$  – силы сопротивления движению вагонов на концевом участке пути, Н.

Подобные задачи уже встречались в практике и рассматривались в работах отечественных ученых [169, 179], которые демонстрируют, что усилия в автосцепках достигают своих наибольших значений при прохождении вагонами переломов профиля. Такие переломы профиля могут возникать в процессе эксплуатации при увеличении осевых нагрузок и масс поездов, а также с увеличением пропущенного тоннажа [4, 5, 31, 64].

## ВЫВОДЫ ПО ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ

В третьей главе рассмотрена апробация метода получения параметров длинных неровностей. Рассмотрены существующие средства диагностики. Проанализированы параметры длинных неровностей продольного профиля, полученные на сети железных дорог ОАО «РЖД». Рассмотрено влияние неровностей в продольном профиле на динамические показатели подвижного состава на действующих линиях.

Было отмечено, что возникающие на длинных неровностях дополнительные силы, которые зависят от типа рельсов, балласта, шпал, их состояния, статической нагрузки колеса на рельс, неподрессоренного веса, добавочной силы от колебания на рессорах и скорости движения.

Рассмотрены случаи сходов произошедших на разных участках железных дорог, где были выявлены неровности в продольном профиле. Как показало моделирование динамических процессов движения грузового поезда по неровностям, выявленных методом, описанным во второй главе, могло послужить причиной сходов.

Таким образом, ненормируемые на сегодняшний день длинные неровности пути могут не только влиять на динамические показатели подвижного состава, но и создавать угрозу для безопасности движения тяжеловесных грузовых поездов.

## ГЛАВА 4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИННЫХ НЕРОВНОСТЕЙ В ПРОФИЛЕ НА ИНФРАСТРУКТУРУ

В настоящее время большое внимание уделяется вопросу оптимизации и сокращению расходов во всех сферах промышленности. Железнодорожный транспорт не является исключением. При этом возникает очевидный вопрос, «за счёт каких параметров можно достигнуть экономии?» при движении поездов.

Как показывает анализ энергетических расходов, затраты на тягу поездов являются одним из основных видов затрат на осуществление перевозочного процесса. Оптимизация этих затрат требует анализа всех составляющих параметров, влияющих на сопротивление движению [180].

Зарубежный опыт [181-185] показывает, что в большинстве случаев сокращение расхода электроэнергии, в основном, достигается за счёт:

- уменьшения массы подвижного состава [181];
- внедрения нового (современного/инновационного) подвижного состава [182];
- использования специально разработанных способов вождения поездов [181-185].

Являясь одним из крупнейших потребителей электроэнергии и дизельного топлива, ОАО «РЖД» уделяет большое внимание, рациональному расходу энергоресурсам. В статье [186], автором подтверждается зарубежный опыт [180-185] экономии топливно-энергетических ресурсов. Как отмечал к.т.н. С.А. Виноградов [187], нельзя сравнивать повышение энергоэффективности используя автоматическое управление поездов на специализированных линиях и в условиях смешанных перевозок на протяженных полигонах сети ОАО «РЖД». По поводу энерго эффективности, было отмечено [187], что энергетическая эффективность зависит от всех, причастных к перевозочному процессу сторон – это и производители локомотивов, и Дирекция тяги, и Центральная дирекция управления движением. Не маловажную роль в этом процессе занимает Центральная дирекция инфраструктуры, которая отвечает за состоянием пути.



#### 4.1 Влияние отступлений геометрии пути на сопротивление движению

На отечественных железных дорогах, одним из тех, кто первым затронул вопрос сопротивления движению – был профессор Б.Н. Веденисов [188] (таблица 4.1). Им была представлена классификация видов сопротивлений, действующих на подвижной состав, в которой он предлагал выделить следующие виды:

- 1) сопротивление движению, зависящее от конструкции, параметров и состояния подвижного состава;
- 2) сопротивление движению, зависящее от конструкции, параметров и состояния пути;
- 3) сопротивление, зависящее от среды, в которой происходит движение подвижного состава;
- 4) дополнительное сопротивление, зависящее от плана пути;
- 5) дополнительное сопротивление, зависящее от продольного профиля пути (уклонов);
- 6) дополнительное сопротивление, зависящее от ускорения подвижного состава при разгоне.

Таблица 4.1 – Зависимость отдельных элементов сопротивления движению от различных факторов

Вид сопротивления	Элементы сопротивления	Основные факторы влияющие на величину сопротивления
Зависимость от конструкции, параметров и состояния пути	Сопротивление от упругого прогиба пути	Модуль упругости рельсового основания; момент инерции сечения рельса относительно горизонтальной оси; относительное расположение осей колесных пар друг к другу; нагрузка, передаваемая от колеса на рельс.
	Сопротивление от неровностей пути в вертикальной плоскости	Состояние рельсовых стыков; неправильная, неравномерная подбивка шпал.
	Сопротивление от неровностей пути в горизонтальной плоскости	Неправильная рихтовка рельсовой колеи; отступление по ширине колеи.

В таблице 4.1 представлена зависимость сопротивления движению от конструкции параметров и состояния пути [188]. Профессор М.Ф. Вериго [189] более подробно обратил внимание на основные факторы, вызывающие сопротивление движению. Им было отмечено, что необходимо оценивать сопротивление по сумме показателей рассеивания энергии в системах:

- сопротивление от диссипации энергии в пути (при его взаимодействии с подвижным составом);
- сопротивление от силовых процессов в системе колесо-рельс [190];
- сопротивление от диссипации энергии в окружающую среду (в гасителях колебаний подвешивания и других узлах трения).

Необходимо отметить, что рассеивание энергии в пути связано с накоплением в нём остаточных деформаций [188], что отмечал профессор Б.Н. Веденисов, и на что обращал внимание профессор Г.М. Стоянович [34].

Применение энергетического метода [191] позволяет оценивать воздействие экипажей на путь с точки зрения накопления остаточных деформаций [62], вызывающих спонтанное изменение сопротивлению движению, что оказывает

влияние на режимы движения грузовых поездов. Применение описанного [191] подхода, позволяет сделать вывод о необходимости оценки деформативности пути по параметрам неровностей продольного профиля, что дает возможность оценивать состояния пути и сопоставить данные геометрии рельсовой колеи в продольном профиле с расходами на электроэнергию при тяге поездов.

Исследования [192] проведенные на различных конструкциях верхнего строения с неровностями пути подтвердили, что основное сопротивление движению вагонов вызывается колебаниями обрессоренных частей вагона при проходе по неровностям, о чем говорил профессор М.Ф. Вериго [189]. В работе [193] были получены результаты, позволившие определить влияние неисправных ходовых частей и наличие отклонения геометрии рельсовой колеи на потерю энергии при движении в прямых и кривых участках пути.

Исследования [194], проводимые в 90-х гг. в условиях Западно-Сибирской железной дороги, позволили определить численные показатели состояния пути в плане и профиле, управляя которыми можно получить зависимость расхода энергии на тягу поездов от отклонений геометрии рельсовой колеи. Анализ данных вагонов-путеизмерителей, полученных в ходе исследований [194], позволил, оценить состояние пути в вертикальной продольной плоскости по записи просадок, в поперечной к оси пути плоскости – по записи уровня, в горизонтальной плоскости – по записи положения пути в плане по среднеквадратическому отклонению (СКО) с использованием формулы (4.1):

$$A = 25,2 + 1,66\sigma_p, \quad (4.1)$$

где:

$A$  – расход энергии в кВт·ч;

$\sigma_p$  – среднеквадратическое отклонение положения пути.

Эти расчёты позволили определить расход энергии. Было установлено, что изменение величины  $\sigma_p$  в диапазоне 0,5–3,5 мм приведёт к увеличению расхода энергии на 19% при непривышении удовлетворительной оценки состояния пути, что подтверждает исследования профессора Н.П. Петрова [195], который обращал внимание на то, что влияние состояния геометрии рельсовой колеи способно

оказывать влияние на сопротивление движению до 20%. Поскольку поступательное движение подвижного состава вследствие прохода по неровностям и неравноупругости пути сопровождается колебаниями различных частей экипажей [196], согласно работе [197] рассеивание энергии от колебаний надрессорного строения экипажей рассматривается как часть общей величины основного сопротивления движению. Это позволяет сказать, что состояние пути играет значительную роль в расходе энергии при тяге поездов.

В работе [196], П.Н. Астахов отмечал влияние микроуклонов на сопротивление движению. В.И. Рахманинов также уделял внимание [197] влиянию элементов профиля и его взаимного расположения (поочередное расположение элементов профиля с разными знаками) на расход электроэнергии. Следует отметить, что движение любых видов транспорта по уклону с силовой и энергетической точек зрения не равноценно движению по прямолинейному (ровному), горизонтальному пути, то есть при движении на подъем наблюдается дополнительное сопротивление и повышенный расход энергии, а при спуске – ускоряющая сила и пониженный расход энергии. Таким образом, движение поезда по неровностям продольного профиля разной длины и амплитуды оценивается как движение по элементам переломов профиля (подъем и спуск) [109]. Такие неровности не определяются человеческим глазом, а уклоны от них достигают 2-2,5‰.

И.И. Кантор в работе [198] отмечал, что сопротивление движению грузовых вагонов на бесстыковом пути меньше, чем на звеньевом, на 3-5% при скорости 25 км/ч и на 12-15% при 100 км/ч. Также необходимо учитывать влияние на сопротивление движению осевой нагрузки. Влияние верхнего строения пути на удельное сопротивление движению тем больше, чем меньше осевая нагрузка  $q$ , и влияет на расход топлива и электроэнергии на тягу поезда в размере порядка 3-4%.

Основное удельное сопротивление движению грузовых четырехосных полувагонов на роликовых подшипниках (в составе поезда) можно определять по формулам (2) и (3) согласно [197] для звеньевом и бестыкового пути:

$$\omega_{ih_{зв}} = 5.2 + \frac{35,4 + 0,885v + 0,027v^2}{q_{oi}} \quad (4.2)$$

$$\omega_{ih \text{ бес}} = 5.2 + \frac{34,2+0,732v+0,022v^2}{q_{0i}} \quad (4.3)$$

Удельное сопротивление рассчитывается при средней нагрузке на ось равной:  $q_{01} = 20$  т/с;  $q_{02} = 23,5$  т/с;  $q_{03} = 25$  т/с. Соответственно, удельное сопротивление движению поезда при различных осевых нагрузках  $q$  составит:

$$\omega_{i1} = 14,185 \text{ Н/т};$$

$$\omega_{i2} = 12,846 \text{ Н/т};$$

$$\omega_{i3} = 12,388 \text{ Н/т}.$$

В рамках исследований по снижению затрат энергии в перевозочном процессе, связанных с состоянием пути, в 2016 г. АО «ВНИИЖТ» обратился к Старшему вице-президенту ОАО «РЖД» с предложением о проведении исследований по данному вопросу (Приложение 1).

По поручению Старшего вице-президента ОАО «РЖД» была разработана «Программа и методика испытаний по оценке влияния длинных неровностей продольного профиля на расходы электроэнергии при тяге поезда» (Приложение А).

## **4.2 Определение влияния параметров длинных неровностей в профиле на расход электроэнергии на тягу поездов**

Вышеизложенное послужило основой проведения комплекса исследований позволивших подсчитать потери от наличия неровностей в продольном профиле. В 2016 году в реальных условиях на грузонапряженной линии [200], АО «ВНИИЖТ» совместно с ПКБ ЦТ были произведены опытные поездки с локомотивом-лабораторией и съёмка продольного профиля прямого участка пути, где обращался опытный состав. По итогам этих исследований был сделан вывод о численных значениях влияния неровностей продольного профиля на расход электроэнергии.

Первый этап исследований был проведен на фронте модернизации пути, перегон Тимошкино-Бабаево Октябрьской железной дороги.

В соответствии с программой, испытания были организованы следующим образом:

- до начала ремонтных работ проводилась съемка продольного профиля геодезическими приборами, а также методом преобразовывания данных вагона-путьеизмерителя с дальнейшим сопоставлением их между собой;
- проведение 10 поездок опытным составом с определением среднего расхода энергии.

Цикл измерений повторялся после окончания ремонта пути.

По справке ПКБ ЦТ (Приложение Б) при поездке с поездом массой 6076 т до начала работ средний расход энергии составил 352 кВт-ч при исключении первой поездки, как выпадающий из статического ряда из-за отправления с крайнего пути. В пересчете на 1000 т, расход энергии составил 57,93 кВт/1000 т.

Согласно акту ПКБ-ЦТ от 19.06.2016 средний расход энергии при поездках с поездом массой 5878 т после окончания работ (при исключении из рассмотрения первой поездки) по аналогичной причине составил – 341 кВт-ч или 58 кВт на 1000 т – (Приложение В) то есть, практически не изменился.

Причиной этого могла явиться короткая длина опытного участка с движением в режиме постоянной тяги, поэтому потребовалось проведения повторных поездок (Приложение Г).

Согласно справкам ПКБ ЦТ при поездках с поездом массой 6263 т до ремонта средний расход энергии (при исключении первой поездки, как выпадающей из статистического ряда) составил 500,4 кВт-ч (Приложение Д). Поездки с поездом массой 6242 т после завершения работы при аналогичной обработке 455,6 кВт-ч. Таким образом, снижение расхода энергии составил 8,7% (Приложение Ж).

Эффективность выполненных ремонтных работ была оценена по абсолютным и статистическим показателям имеющихся неровностей:

- сравнительным характеристикам длин неровностей – до и после ремонтных работ;
- сравнительным характеристикам амплитуд неровностей – до и после ремонтных работ;

– сравнительным характеристикам суммарных площадей неровностей – до и после ремонтных работ;

– сравнительным характеристикам среднеквадратических отклонений амплитуд неровностей на рассматриваемом участке – до и после ремонтных работ.

Полученная информация позволила оценить степень влияния устранения неровностей в процессе работ на расход энергии.

На участке Бабаево-Тимошкино путь 2, проводилась модернизация в мае месяце.

Выборочные характеристики неровностей на участке до и после проведения работ приведены на рисунках 4.1-4.3 в виде схемы для определения площадей неровностей, которые рассчитывается в диапазоне длин до 100 м с исключением влияния работы измерительных схем, такие неровности обозначаются как «натурные». Проведенный анализ показывает, что после проведения ремонтных работ площадь неровностей сократилась, но в августе месяце вновь увеличилась, что указывает на необходимость проведения после ремонтов последующей повторной послеосадочной выправки пути.

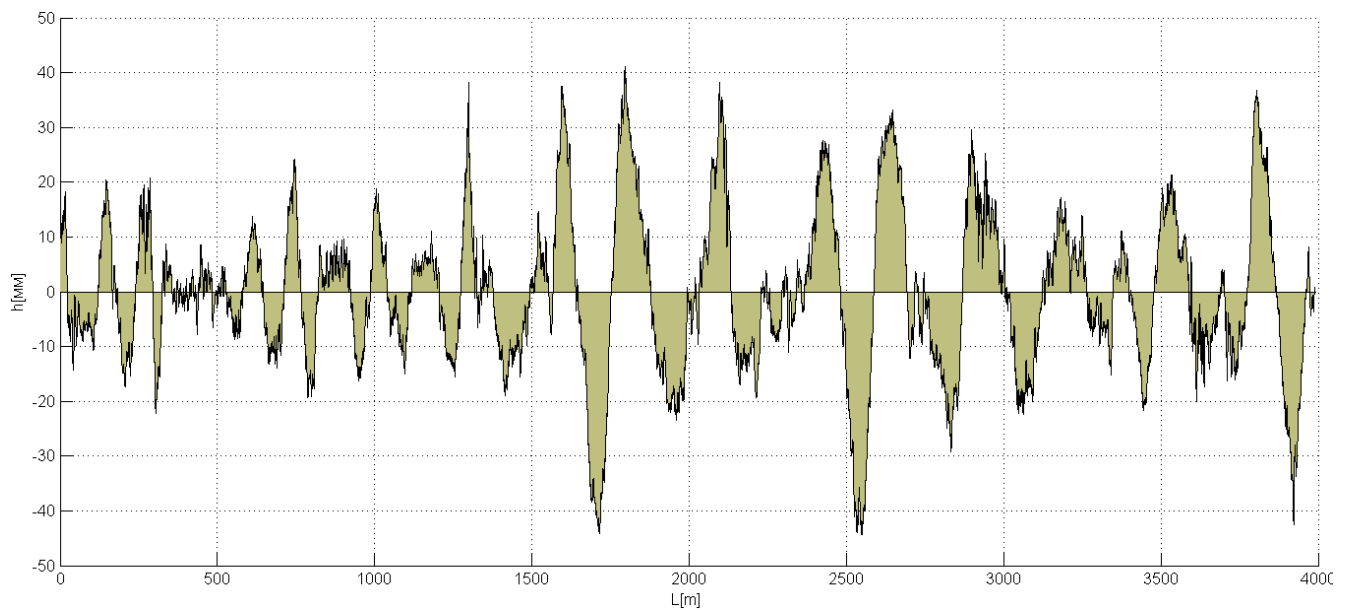


Рисунок 4.1 – Площади натуральных неровностей на участке модернизации, перегон Бабаево-Тимошкино в апреле 2016 г.

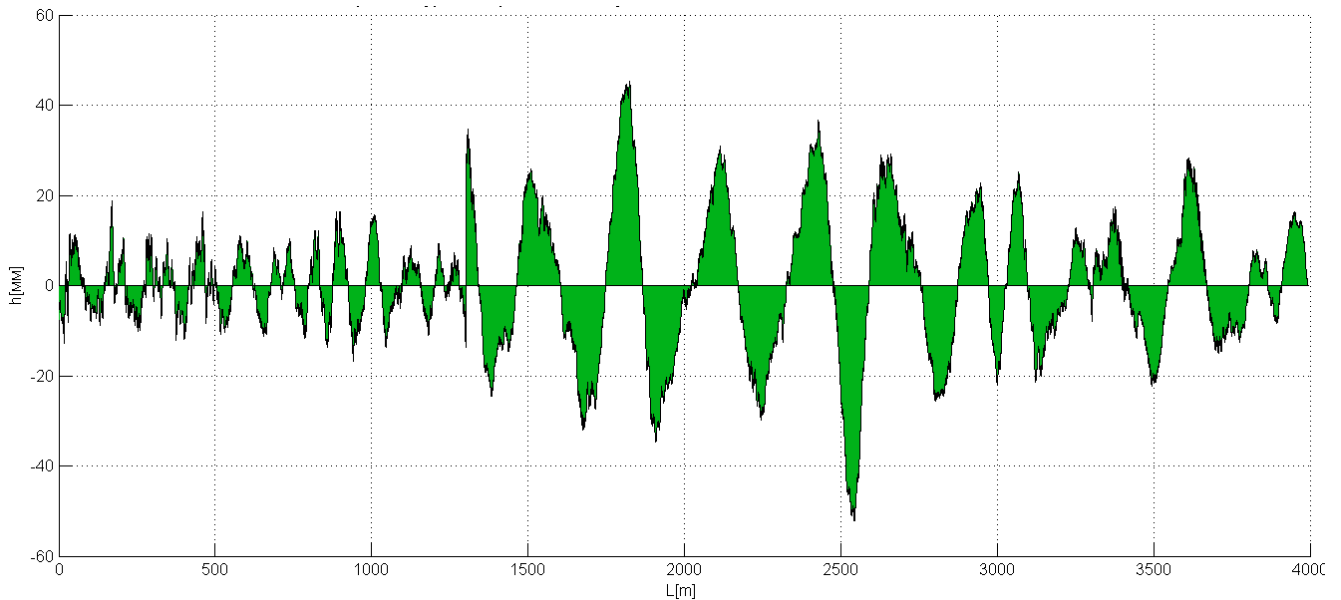


Рисунок 4.2 – Площади натуральных неровностей на участке модернизации, перегон Бабаево-Тимошкино в июне 2016 г.

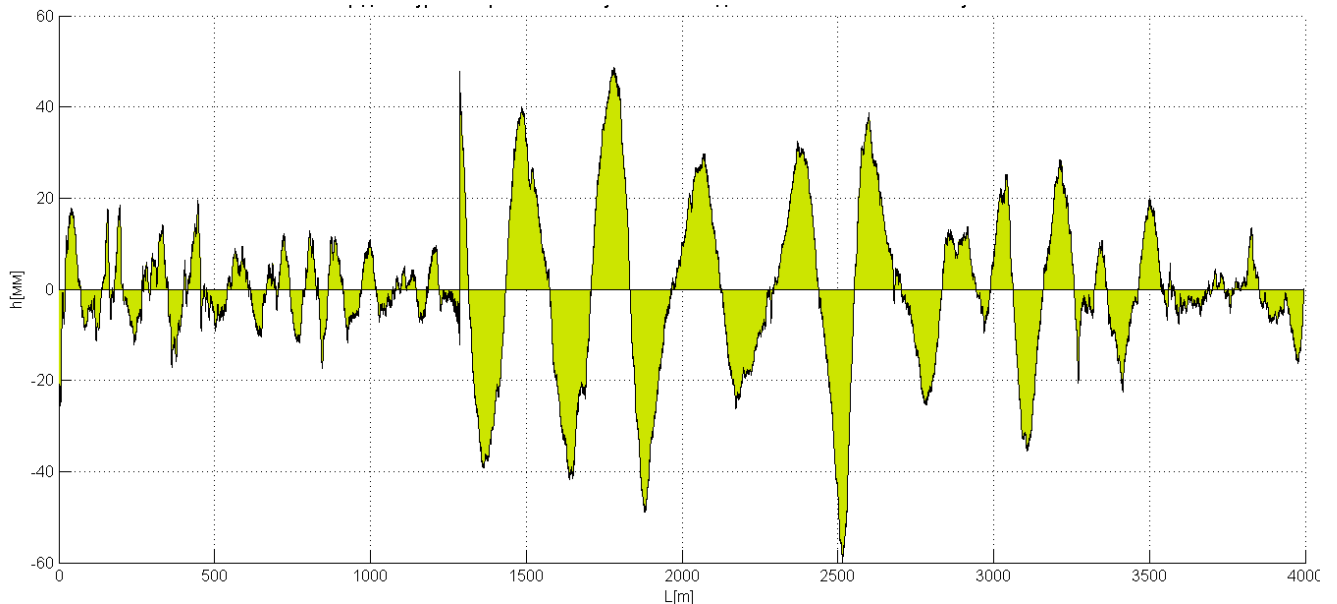


Рисунок 4.3 – Площади натуральных неровностей на участке модернизации, перегон Бабаево-Тимошкино в августе 2016 г.

Проведенный анализ длин неровностей продольного профиля пути (рисунок 4.3) на участке ремонта до и после проведения работ показал, (рисунок 4.4), что до проведения работ 40% составляли неровности длиной до 10 метров, неровности длиной 10-30 м и неровности длиной 50-100 м по 20%, а доля неровностей длиной более 100 м составила 13%.



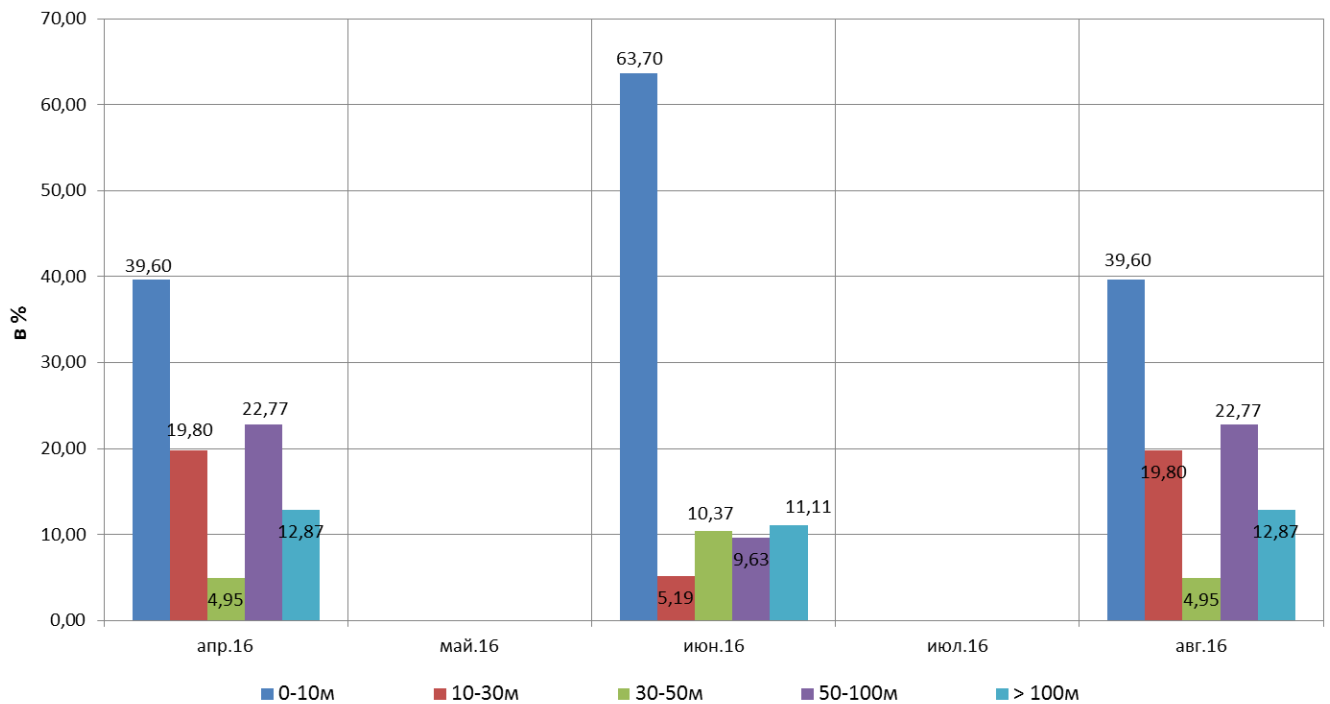


Рисунок 4.4 – Распределение длин неровностей на участке ремонта

После проведения ремонтных работ на участке модернизации доля неровностей длиной более 100 м практически не изменилась. Уменьшилась доля неровностей длиной 10-30 м с 20 до 5% и доля неровностей 50-100 м с 23 до 10%. Резко увеличилась доля неровностей длиной до 10 м – с 40 до 64%, и неровности 30-50 м с 5 до 10%.

Через 2 месяца после окончания работ в августе месяце картина распределения неровностей практически вернулась к состоянию до ремонта (рисунок 4.4). На возможность этого явления указывали исследования [41], объясняя этот процесс – первоначальным качеством пути, которое закладывается при сооружении линии, а при последующих ремонтах не устраняется, что подтверждает отсутствие возможности выправки неровностей более 40 м выправочными машинами.

Анализ распределения амплитуд неровностей, изображенных на рисунке 4.5, показывает аналогичную картину.

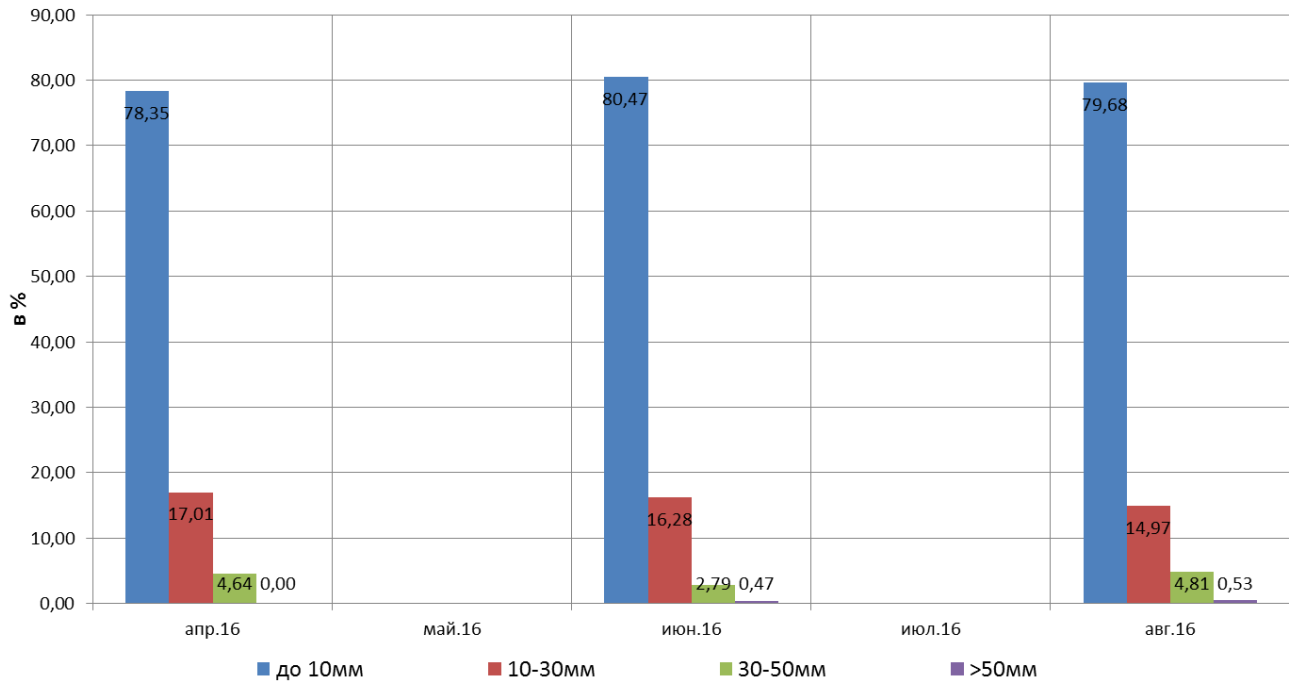


Рисунок 4.5 – Распределение амплитуд неровностей на участке ремонта

На участке Бушуиха-Туфаново Северной железной дороги, был проведен весь комплекс измерительных работ по оценке изменения состояния пути до и после проведенных ремонтных работ, включая геодезическую съемку и оценку по неровностям, полученным с помощью преобразования данных вагонов-путеизмерителей (рисунок 4.6-4.7) по методике, изложенной в главе 2.

На рисунке 4.6 приведены результаты нивелировки пути на участке с 637 по 629 км. Амплитуды неровностей принимались от средней части 100 м хорды длиной 50 м со сдвижкой на половину длины хорды.

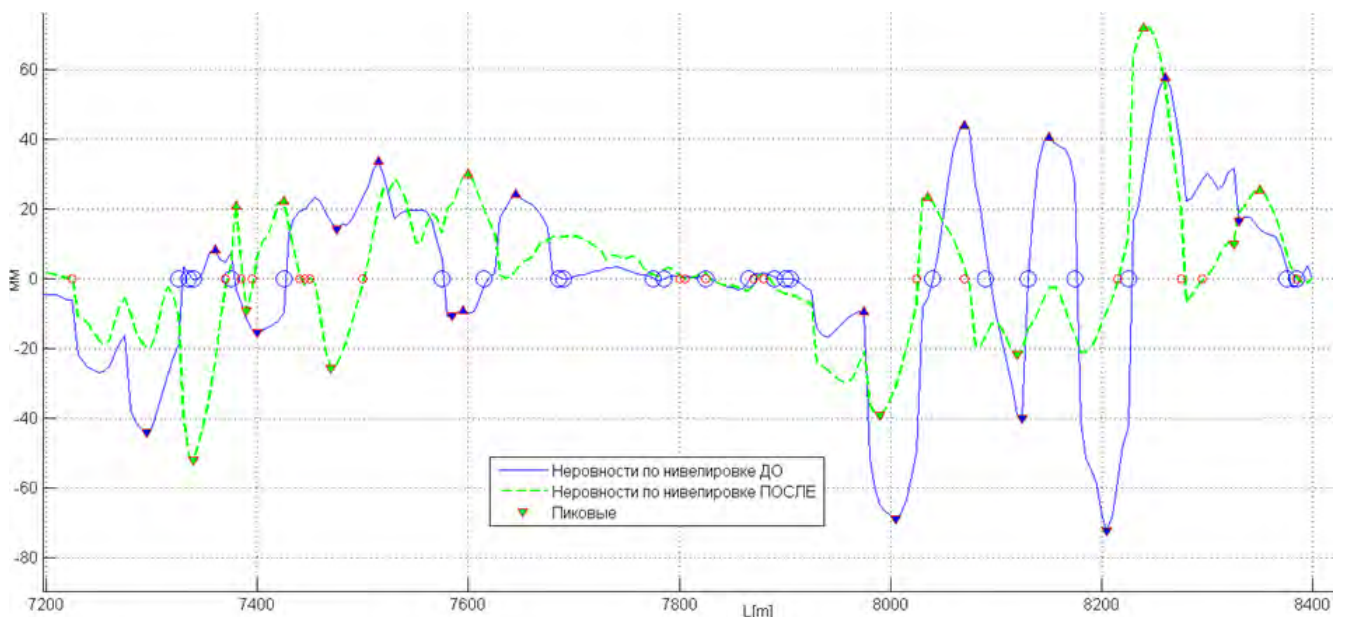


Рисунок 4.6 – Неровности, полученные при нивелировке от 100 м хорды

Качественный анализ данных показывает, что на некоторых отрезках величины амплитуд существенно уменьшилась, на некоторых – неровности остались без изменения, а в ряде случаев – увеличились, что, по всей видимости, вызвано сбоями в работе выправочных комплексов.

На рисунке 4.7. представлены результаты аналогичных промеров от середины 40 м хорд со сдвигом на 20 м.

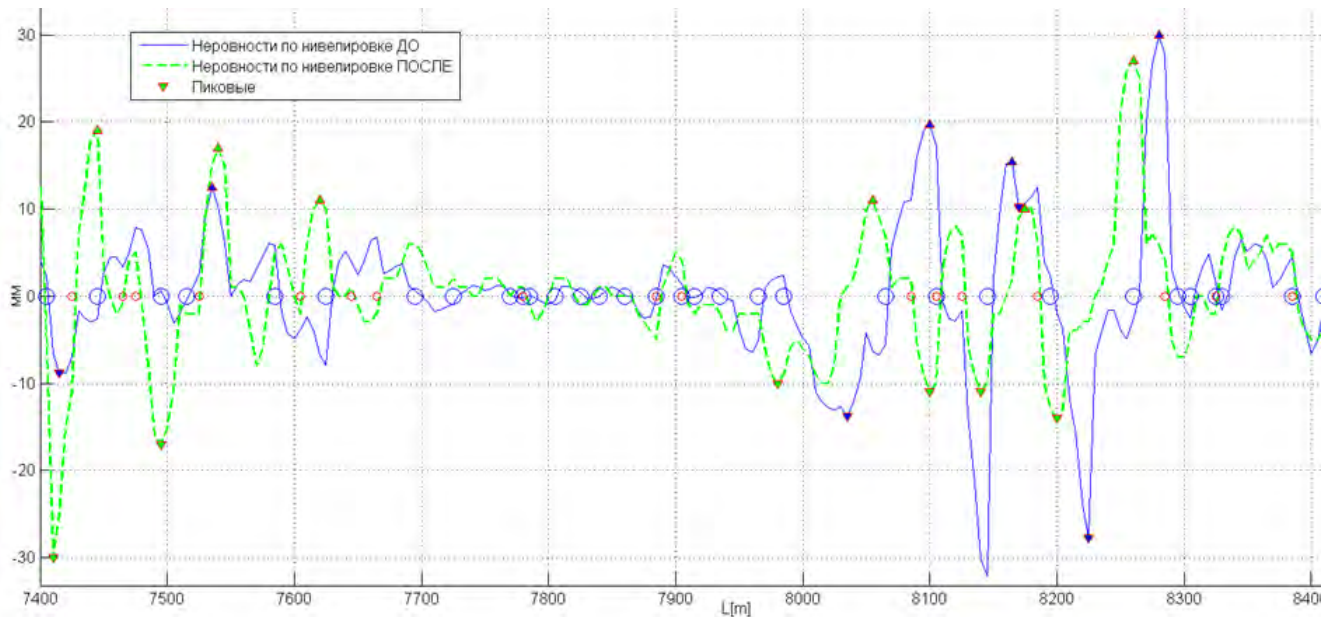


Рисунок 4.7 – Неровности, полученные при нивелировке от 40 м хорды

Картина носит аналогичный характер по сравнению с промерами от 100 м хорды, но вполне очевидно, что выправочные комплексы, в основном, ориентированы на устранение относительно коротких неровностей.

На рисунках 4.8 и 4.9 представлены неровности, полученные путем преобразования данных с вагона-путеизмерителя с двух участков до и после ремонтных работ [201].

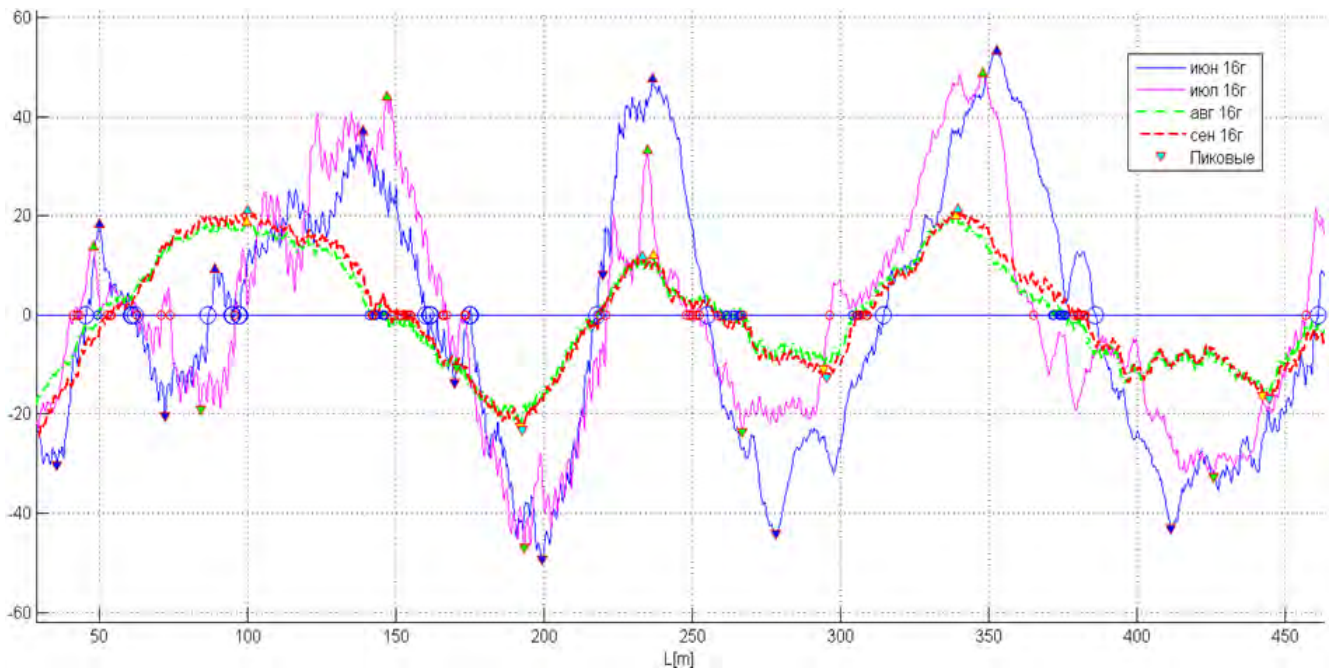


Рисунок 4.8 – Неровности полученные с помощью преобразования данных вагонов-путеизмерителей

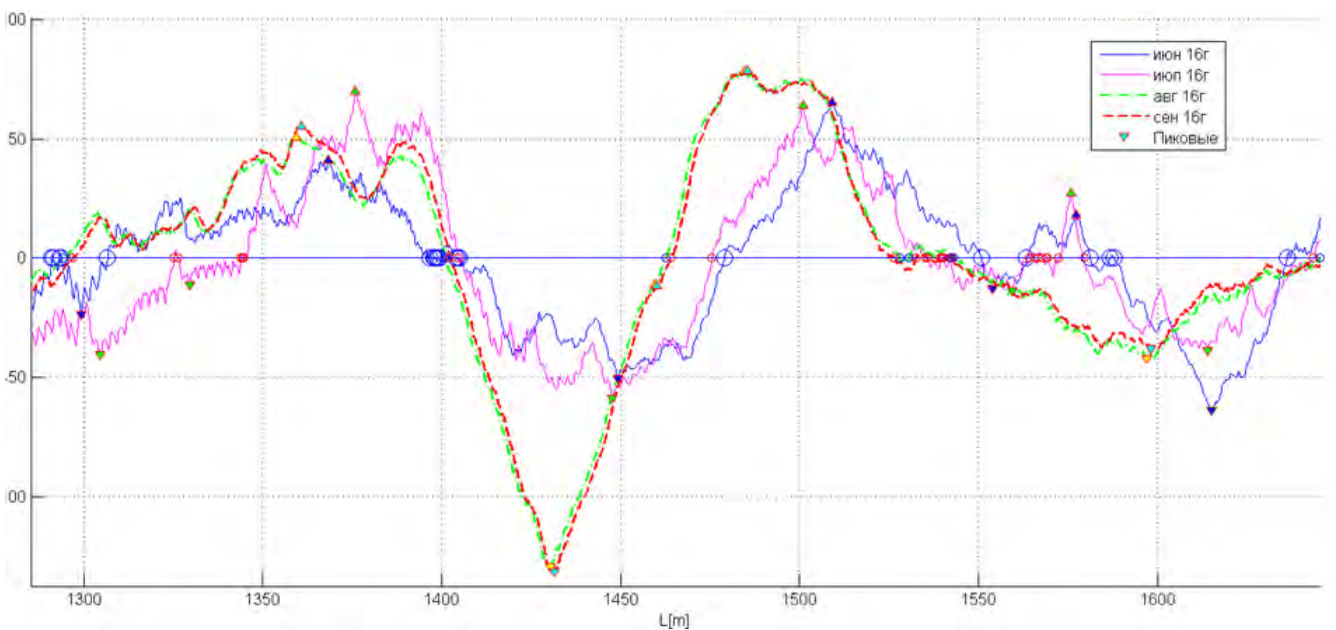


Рисунок 4.9 – Неровности полученные с помощью преобразования данных вагонов-путеизмерителей

Данные, представленные на графиках, изображенных на рисунках 4.8 и 4.9 подтверждают данные полученные при нивелировке пути (рисунок 4.6 и 4.7) произведенной до и после ремонтных работ.

На диаграмме (рисунок 4.10), представлена количественная оценка длин неровностей. Количественная оценка доли неровностей однозначно показала сокращение количества и доли неровностей в диапазонах 0-10 м и 10-30 м, при этом

количество неровностей длиной от 30 м и более практически не изменялась, а их доля, соответственно, выросла.

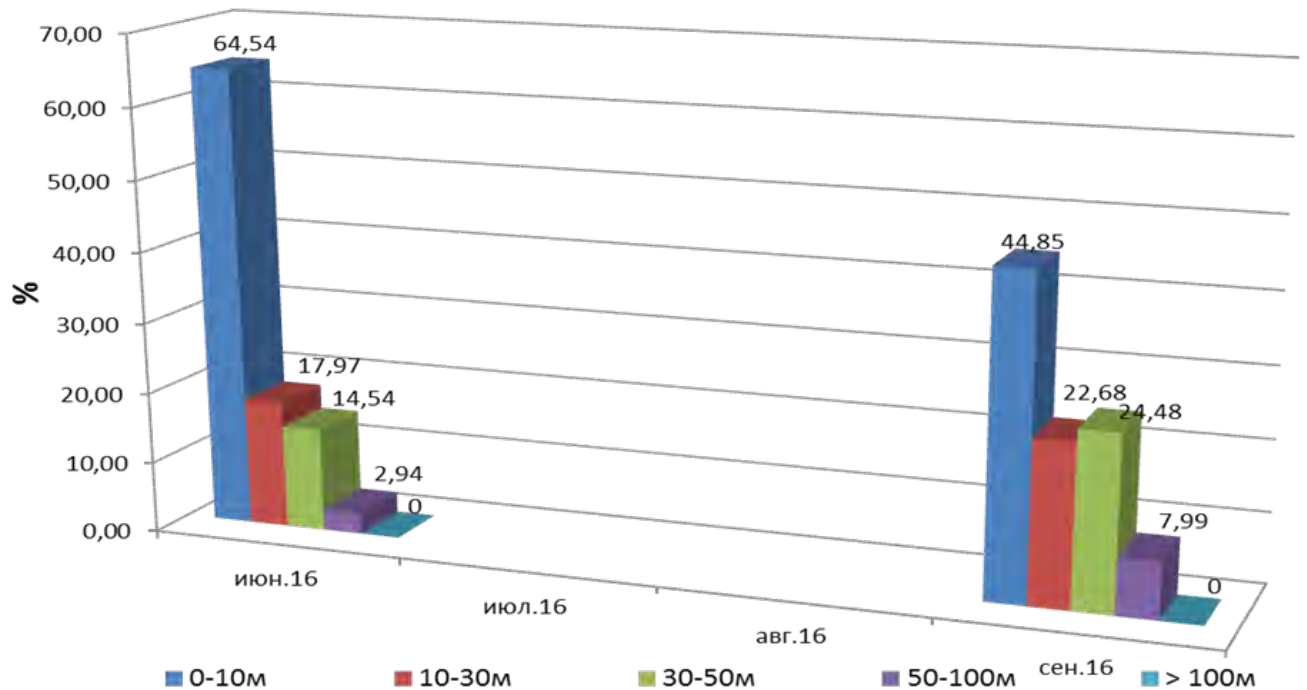


Рисунок 4.10 – Количественная оценка доли неровностей

Анализ амплитуд неровностей (рисунок 4.11) показал, что после проведенных ремонтных работ, произошло уменьшение значений амплитуд неровностей.

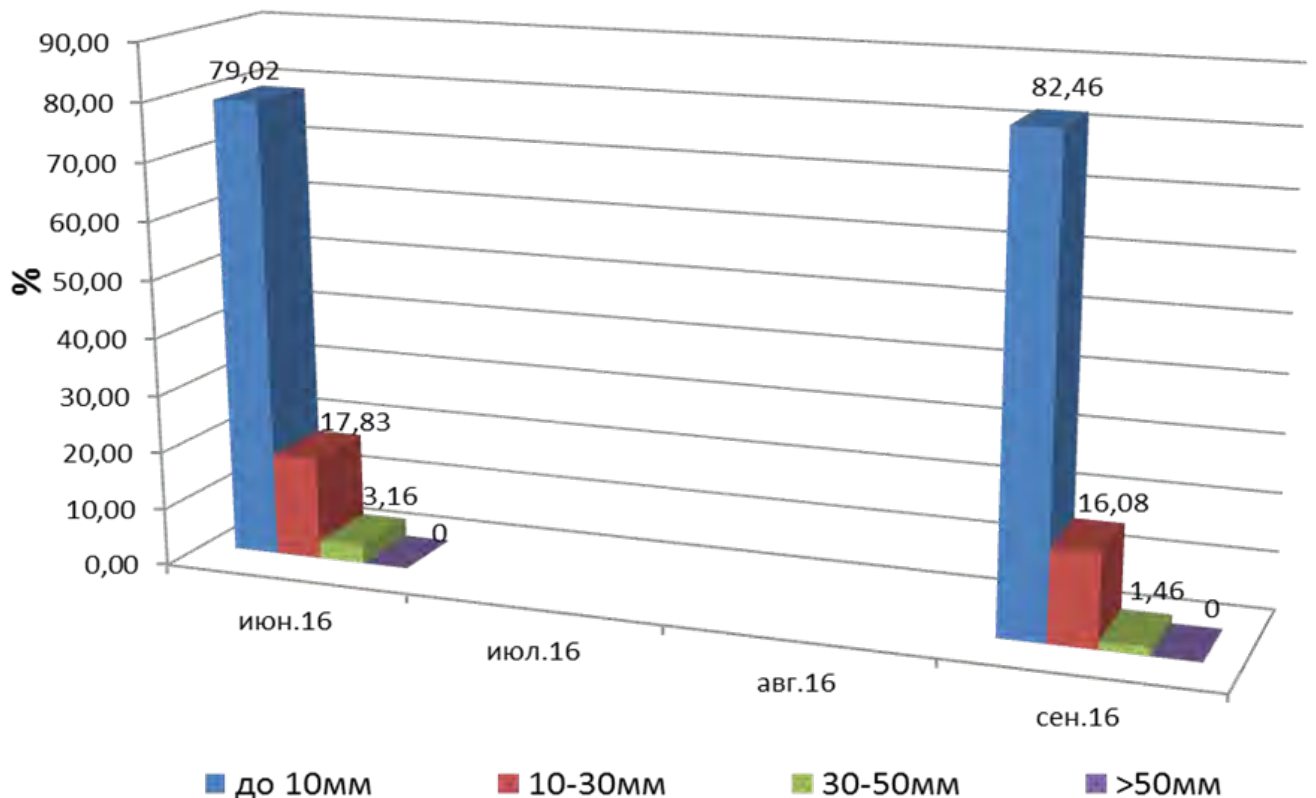


Рисунок 4.11 – Анализ амплитуд неровностей

Анализ суммарных площадей неровностей (рисунок 4.12) показал, что после ремонта суммарная площадь неровностей составила 78,3% от первоначальной [189].

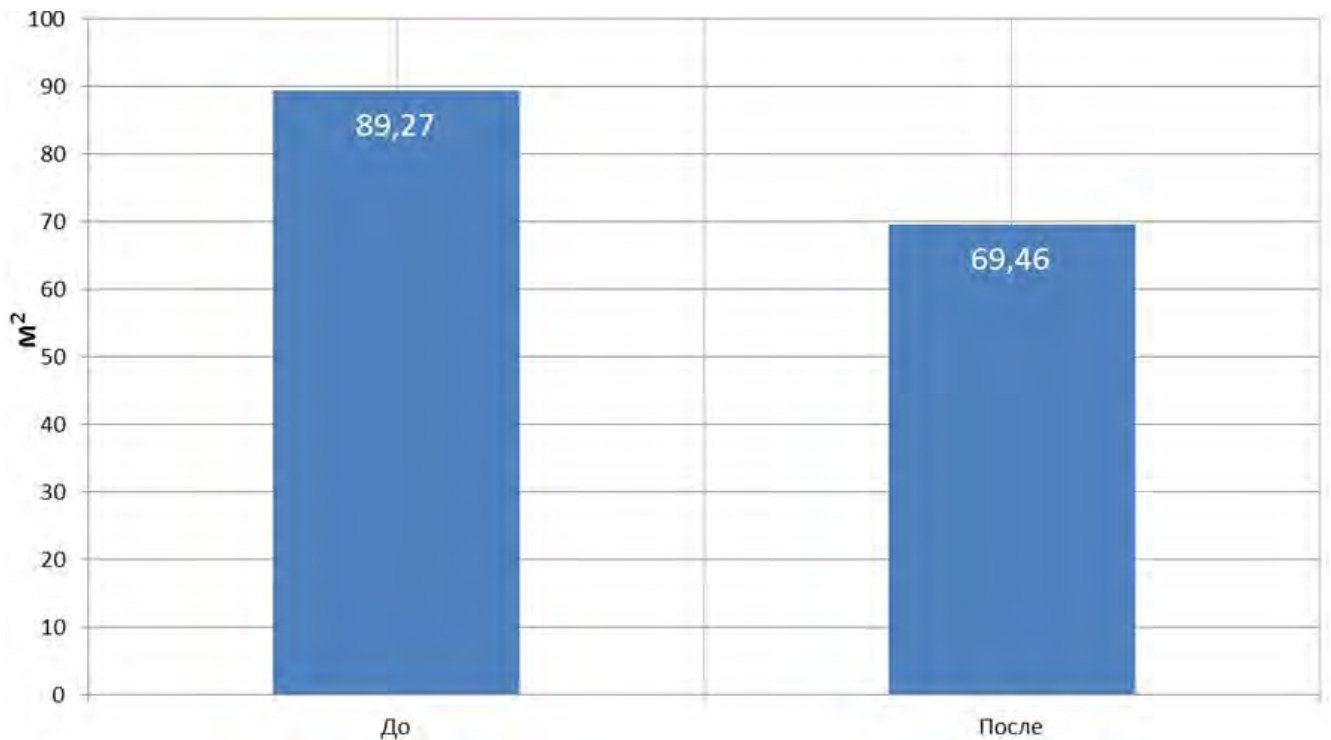


Рисунок 4.12 – Анализ площадей неровностей

Анализ среднеквадратических отклонений амплитуд неровностей, полученных по данным с вагонов-путеизмерителей показал, что после ремонта величина СКО снизилась с 9,96 мм до 7,36 мм, то есть после ремонта составила 74,2% от величины до ремонта.

По результатам нивелировки (без нагрузки) величина СКО снизилась с 26,51 мм до 25,14 мм, то есть составила 94,5% от начальной.

Проведенные исследования позволили констатировать, что выполненный комплекс ремонтных работ, позволил уменьшить параметры неровностей продольного профиля нагруженного пути на 20-25%, а ненагруженного – на 5%. Даже частичное устранение неровностей при проведении ремонтных работ позволило, получить сокращение расхода энергии на тягу поездов – 8,7%.

Качество ремонта определяется, как минимум, тремя факторами:

- точностью промеров пути;
- проектом ремонта и алгоритмом работы выправочных комплексов;

– соблюдением технологии производства работ (качество выправки).

Определение степени влияния каждого фактора требует обобщения материалов по большему объему ремонтных работ с различной степенью влияния перечисленных факторов.

Как показывает опыт [202], анализ выходных форм вагонов-путеизмерителей, свидетельствующих о качестве текущего состояния пути, позволяет принимать организационные меры по улучшению процессов текущего содержания. То есть, если применить мониторинг состояния пути по параметрам неровностей продольного профиля (о которых было описано в главе 3), то можно планировать проведение текущего содержания пути с применением ремонтных схем, позволяющих устранять неровности в продольном профиле, тем самым достигая эффекта за счёт:

- 1) устранения неровностей, что позволит сократить расходы электроэнергии на тягу поездов;
- 2) формирования графика проведения путевых работ, что позволит продлить жизненный цикл верхнего строения пути, тем самым отсрочить проведение капитального ремонта.

#### **4.2.1 Анализ данных по выходным формам**

Для сравнения данные, полученные по параметрам натуральных неровностей, был произведен анализ состояния пути по выходным формам проходов вагонов-путеизмерителей (формам ПУ-32) на участках проведения ремонтных работ.

На участке Бушуиха-Туфаново были проанализированы данные проходов вагонов-путеизмерителей за период с июня по октябрь 2016 года по 637-629 км для оценки изменения состояния пути до и после ремонтных работ. Ремонт на данных километрах производился в августе 2016 года.

В таблицах 4.2-4.6 приведены отступления по показателям «просадка», «уровень» и «перекос», желтым выделены месяца до ремонта.





Таблица 4.4 – Количество отступлений по показателю «перекос» по месяцам до и после ремонта

<b>Перекас на км пути, шт.</b>									
	629	630	631	632	633	634	635	636	637
июнь рабочий проход	6	5	2	3	4	1	6	2	7
июнь контр. Проход	7	6	2	5	3	2	7	3	7
июль рабочий проход	6	7	2	3	3	2	7	2	4
июль контр. Проход	8/2	9/1	8	9/1	5/2	3/1	5	3	3
август рабочий проход	8/2	12/1	0	3	2	1/1	0	0	9
август контр. Проход	0	2	0	6/1	0	0	0	0	10
сентябрь рабочий проход	0	2	0	6/1	0	1	0	0	10
сентябрь контр. Проход	1	1	0	6	0	1	0	0	4
октябрь рабочий проход	1	1	0	7	0	1	0	0	2
октябрь контр. Проход	0	1	0	0	0	1	0	1	3

Таблица 4.5 – Средние значения количества отступлений по показателю «просадка» до и после ремонта

<b>отступления по показателю «просадка», шт.</b>									
км	629	630	631	632	633	634	635	636	637
до ремонта	5	9,25	14	18	5,5	13,5	8,5	2,75	11,4
после ремонта	2	1	0	2	0	0	1	0	5,2

Анализ значений количества просадок, приведенных в таблице 4.5, показал, что количество отступлений уменьшилось в 2 – 9 раза в зависимости от километра.

Таблица 4.6 – Средние значения количества отступлений по показателю «уровень» до и после ремонта

<b>отступления по показателю «уровень», шт.</b>									
км	629	630	631	632	633	634	635	636	637
до ремонта	2	3,4	7	3	1	1	1,7	2,25	1
после ремонта	1,8	1,5	0	1	0	0	1	0	1

По данным значениям уровня, приведенным в таблице 4.6, количество отступлений уменьшилось в 1,1-2,3 раза в зависимости от километра.

Таблица 4.7 – Средние значения количества отступлений по показателю «перекос» до и после ремонта

отступления по показателю «перекос», шт.									
км	629	630	631	632	633	634	635	636	637
до ремонта	7,8	8,2	3,5	4,8	3,8	2,2	6,3	2,5	6
после ремонта	1	1,4	0	6,8	0	1	0	1	5,8

Из приведенных в таблице 4.7 данным по количеству перекосов видно, что количество отступлений уменьшилось в 2,8 раз зависимости от километра.

Анализ выходных форм (ПУ-32) показывает, что после ремонта количество отступлений ГРК сократилось, но период стабилизации пути не закончился и вновь начался рост отступлений. Это объясняется тем, что в процессе ремонтных работ, неровности продольного профиля были устранены не в полном объеме [189], что привело к их повторному появлению. Исследования [41], подтверждают, что неисправности, которые устраняются не в полном объеме при ремонтах, способствуют скорейшему расстройству пути после ремонта. Увеличений срока стабилизации пути может быть связан с разной степенью уплотнения балластного слоя при ремонте.

Исследования В.А. Лаптева [203] позволили отметить, что различают две группы нормативов содержания:

- дифференциальные, оценивающие отдельные показатели по потребительской полезности;
- интегральные, характеризующие величину отдачи от минимальной суммы затрат.

Первая группа применяется при оценке качества работы, а вторая – при оценке качества продукции.

При этом нормативы разделяются на частные и обобщающие:

- частные отражают технико-экономический эффект в виде изменения отдельных показателей качества и затрат на их достижение;

– обобщающие характеризуют величину экономического эффекта всех остальных свойств продукции в сопоставлении с общими расходами на содержании или ремонт пути.

### 4.3 Экономический эффект от устранения длинных неровностей

Расчёты показывают, что устранение длинных неровностей обеспечивают экономию эксплуатационных расходов:

- за счёт увеличения межремонтного интервала, увеличения условно приведенного модуля деформации рабочей зоны земляного полотна [204];
- сокращение затрат на обслуживание пути при поддержании его работоспособного состояния [205];
- сокращения затрат на энергоносители [191, 206].

Таким образом, экономию можно рассчитать по формуле (4.4):

$$\mathcal{E} = A_1 + A_2 + A_3, \quad (4.4)$$

где:  $A_1$  – затраты на выправку пути снижающиеся пропорционально остаточной осадке, что позволяет сдвинуть сроки проведения работ по сплошной планово-предупредительной выправке (ППВ) пути [204];

$A_2$  – соотношение затрат на выправку при хорошей и удовлетворительной оценке [205];

$A_3$  – данные расчёта экономии электроэнергии от устранения неровностей продольного профиля, рассчитанных на основе проведенных исследований [191, 206].

Величина  $A_1$  определяется согласно исследованиям [204], которые позволили определить, что увеличение модуля деформаций подшпального основания с 23 Мпа до 36 МПа, за счёт качественного ремонта позволяет снизить остаточные осадки пути в 1,25 раза и соответствующие затраты на выправку пути.

Величина  $A_2$  определяется согласно исследованиям [205], которые позволили просчитать изменение количества в зависимости от состояния пути сплошных

выправок. В таблице 4.8 приведены расчеты для различного состояния пути при среднесетевых значениях показателей, определяющих скорость роста просадок.

Таблица 4.8 – Расчеты сроков сплошной выправки

Состояние пути	Сроки потребной сплошной выправки в долях при скоростях, км/ч				
	50	60	70	80	90
Хор	1,56	1,42	1,21	1,04	1,0
Удовл	1,32	1,06	0,86	0,7	0,66
Плохое	1,1	0,83	0,64	0,51	0,47

За условную единицу принято количество выправок при хорошем состоянии и скорости 90 км/ч (таблица 4.8). При скорости 60 км/ч соотношение сроков выправки при хорошем и удовлетворительном состоянии пути, согласно таблице 4.8 составит – 34%.

Устранение длинных неровностей и увеличения модуля деформаций подшпального основания и содержание пути в хорошем состоянии, позволит сократить количество ППВ (согласно параметрам  $A_1$  и  $A_2$ ), для схемы 1В и 2В с 4 до 2,5 выправок.

Устранение длинных неровностей необходимо производить в рамках работ по среднему ремонту пути с последующей послеосадочной выправкой. Стоимость работ, согласно [207] составляет 9873,36 тыс. руб. на 1 км пути, без учета НДС (20%) равняется 8227,80 тыс. руб.

Работы производятся на участке, не требующем производство восстановительных земляных работ, а устранение длинных неровностей производится за счет верхнего строения пути,

Согласно [207], стоимость одного ППВ составляет 2708,57 тыс. руб. (без учёта НДС).

Величина  $A_3$  определяется на основе, оценки влияния устранения длинных неровностей на расход электроэнергии на тягу поездов. Для расчёта воспользуемся показателем приведенного расхода электроэнергии  $Q_{\text{прив}}$ . Исходные данные, для расчёта полученные в ходе эксперимента [191] специалистами ПКБ-ЦТ, приведены

в Приложение 5 и 6. Приведенный расход электроэнергии  $Q$  до и после ремонтных работ на 1000 т массы поезда на участке  $L$ , рассчитывается по формулам (4.5) и (4.6):

$$Q_{\text{до}} = \frac{W_{\text{до}}}{P_1} \times 1000, \quad (4.5)$$

Где:  $W_{\text{до}}$  – расход электроэнергии до ремонтных работ;

$P_1$  – масса опытного состава обращающегося на участке  $L$  до ремонтных работ.

$$Q_{\text{после}} = \frac{W_{\text{после}}}{P_2} \times 1000, \quad (4.6)$$

Где:  $W_{\text{после}}$  – расход электроэнергии после ремонтных работ;

$P_2$  – масса опытного состава обращающегося на участке  $L$  после ремонтных работ.

Подставляя вышеприведенные данные в формулы (4.4) и (4.5), получим приведенный расход электроэнергии на 1000 т массы поезда, на опытном участке до и после ремонтных работ:

$$Q_1 = \frac{500,4}{6263} \times 1000 = 79,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

$$Q_2 = \frac{455,6}{6242} \times 1000 = 73,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Снижение расхода энергии на тягу поездов [191] между замерами производимыми «до» и «после» ремонтных работ ( $\Delta_{1-2}$ ) можно рассчитать по формуле (4.7):

$$\Delta_{1-2} = Q_1 - Q_2. \quad (4.7)$$

Подставляя выше рассчитанные данные в формулу (4.7), получим экономию электроэнергии на 1000 т массы поезда по опытному участку:

$$\Delta_{1-2} = 79,9 - 73 = 6,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для расчета экономии электроэнергии на 1 км пути ( $\mathcal{E}_{1\text{км}}$ ) используем формулу (4.8):

$$\mathcal{E}_{1\text{км}} = \frac{\Delta_{1-2}}{L_{\text{уч}}}, \quad (4.8)$$

где:  $L_{\text{уч}}$  – длина опытного участка, равная 8,4 км.

Подставляем данные в формулу (4.8), получим величину экономии электроэнергии на 1 км пути ( $\mathcal{E}_{1\text{км}}$ ) и 1000 т массы поезда в среднем по участку:

$$\mathcal{E}_{1\text{км}} = \frac{6,9}{8,4} = 0,82 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, проведенные исследования [191, 200], позволили рассчитать экономию электроэнергии на 1 км пути на 1000 т массы поезда при устранении неровностей продольного профиля. Согласно проведенным расчетам, экономия составила 0,82 кВт·ч.

Для расчёта стоимости электроэнергии воспользуемся статистическими данными, опубликованными ОАО «РЖД» [208]. Стоимость электроэнергии по сети, приведенная к 1 км может быть рассчитана из средних значений [209] по формуле (4.9):

$$C_{\text{эн}} = \frac{\sum_{i=1}^n C_{\text{д}i}}{n_i}, \quad (4.9)$$

где:

$n$  – количество регионов с различными стоимостями энергоносителя;

$C$  – стоимость энергоносителя руб. кВт·час в конкретном регионе по сети ОАО «РЖД»;

$i$  – период по порядку;

$j$  – квартальные отчёты.

Подставляя статистические данные [208] в формулу (4.9) за 2018 год, получим среднее, максимальное и минимальное значения цен на электроэнергию.

$$C_{\text{эн ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^n \frac{C_{\text{дкв}j}}{n_{\text{кв}j}} \right)}{n_i} = 4,22 \text{ руб кВт} \cdot \text{ч}.$$

Таким образом, экономию электроэнергии на 1 км на 1000 т массы поезда можно рассчитать по формуле (4.10):

$$A_3 = \frac{\mathcal{E}_{1\text{км}} \times C_{\text{эн ср}} \times \Gamma}{1000}. \quad (4.10)$$

Подставляя выше полученные данные в формулу (4.10), рассчитаем экономию электроэнергии для участков с различной грузонапряженностью  $\Gamma$  (таблица 4.9) на 1 км пути 1000 т массы поезда.

Таблица 4.9 – Экономия электроэнергии на 1 км пути 1000 т массы поезда с различной грузонапряженностью

№ п/п	$G$ , млн. т. брутто год	Снижение расхода электроэнергии, ( $\mathcal{E}$ энергия) кВт-ч	стоимость сэкономленной электроэнергии, ( $A_3$ ) тыс. руб. в год
1	50	41000	173,02
2	100	82000	346,04
3	150	123000	519,06

Рассчитанные ранее параметры  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  позволяют рассчитать экономию от устранения длинных неровностей.

Рассчитаем экономическую эффективность для вариантов с различной грузонапряженностью (50, 100, 150 млн. ткм брутто в год). Определяем Чистый дисконтированный доход (ЧДД) на основе экономии электроэнергии на тягу поездов в результате проведенных работ по устранению длинных неровностей продольного профиля и сокращения количества ППВ определяется по формуле (4.11):

$$\text{ЧДД}(NPV) = \sum_{i=1}^n \frac{NCF_i}{(1+r)^i} - I_{nv}, \quad (4.11)$$

где:

$NCF_i$  – чистый денежный поток для  $i$ -го периода;

$I_{nv}$  – начальные инвестиции;

$r$  – ставка дисконтирования (стоимость капитала, привлеченного для инвестиционного проекта).

Принимая в расчетах за величину  $NCF_i$  полученную экономию в виде показателя  $\mathcal{E}$  (формула 4.4) на каждый расчетный период  $i$  (год) со ставкой дисконтирования  $r$  равной 10% годовых в горизонте планирования 10 лет.

В результате приведенных расчётов, получаем экономию за счёт сокращения потребности количества ППВ и объёме проводимых работ на 1 км.

За параметры начальных инвестиций  $I_{nv}$  (капитальные вложения) согласно статистическим данным за 2019 год принимаем стоимость среднего ремонта пути без учета НДС [207].

На основе выше произведенных расчетов, полученных статистических данных и анализа опытного участка пути производится расчет показателей экономической эффективности [210], определяем срок окупаемости, индекс доходности и рентабельность производства работы по устранению длинных неровностей путем проведения внепланового среднего ремонта на участках пути километровой протяженности для разных вариантов грузонапряженности: 50, 100 и 150 млн. ткм брутто в год.

Индекс доходности (*ID*) – показатель эффективности инвестиции, представляющий собой отношение дисконтированных доходов к размеру инвестиционного капитала. Индекс доходности определяется по формуле (4.12):

$$\text{ИД}(ID) = \frac{\text{ЧДД}(NPV)}{I_{nv}} \quad (4.12)$$

Срок окупаемости (*PP*) – период времени, необходимый для того, чтобы доходы, генерируемые инвестициями, покрыли затраты на инвестиции. Определяется графически пересечением оси в 0 плоскости денежных потоков.

Срок окупаемости можно рассчитать, используя внутреннюю норму доходности *IRR* по формуле (4.13):

$$0 = \sum_{i=0}^n \frac{CF_i}{(1+IRR)^i} \quad (4.13)$$

Проведем расчёт ЧДД по трем вариантам грузонапряжённости (таблица 4.12-4.14). Результаты расчётов приведены в таблице 4.15.



Таблица 4.12 – Инвестиционные вложения на проведение внепланового среднего ремонта на участках пути с грузонапряженностью 50 млн. ткм брутто в год

Показатели	Значение показателя по годам											Итого
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Приток денежных средств, тыс. руб. на 1 км пути</b>												
Снижение текущих затрат		1527,31	1527,31	1527,31	1527,31	1527,31	1527,31	1527,31	1527,31	1527,31	1527,31	15273,05
<b>Отток денежных средств, тыс. руб.</b>												
Капитальные вложения	-8227,80											-8227,80
<b>Денежный поток, тыс. руб.</b>												
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.		1388,46	1262,24	1147,49	1043,17	948,34	862,12	783,75	712,50	647,73	588,84	<b>9384,63</b>
Прибыль нарастающим итогом	-8227,80	-6839,34	-5577,11	-4429,62	-3386,45	-2438,11	-1575,99	-792,24	-79,74	567,99	<b>1156,83</b>	
Коэффициент дисконтирования	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39	

Таблица 4.13 – Инвестиционные вложения на проведение внепланового среднего ремонта на участках пути с грузонапряженностью 100 млн. ткм брутто в год

Показатели	Значение показателя по годам											Итого	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Приток денежных средств, тыс. руб. на 1 км пути													
Снижение текущих затрат		2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	2377,47	23774,68
Отток денежных средств, тыс. руб.													
Капитальные вложения	-8227,80												-8227,80
Денежный поток, тыс. руб.													
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.		2161,33	1964,85	1786,23	1623,84	1476,22	1342,02	1220,02	1109,11	1008,28	916,62		<b>14608,51</b>
Прибыль нарастающим итогом	-8227,80	-6066,47	-4101,62	-2315,39	-691,55	784,67	2126,69	3346,71	4455,81	5464,09		<b>6380,71</b>	
Коэффициент дисконтирования	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39		

Таблица 4.14 – Инвестиционные вложения на проведение внепланового среднего ремонта на участках пути с грузонапряженностью 150 млн. ткм брутто в год

Показатели	Значение показателя по годам											Итого	
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
<b>Приток денежных средств, тыс. руб. на 1 км пути</b>													
Снижение текущих затрат		3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	3227,63	32276,30
<b>Отток денежных средств, тыс. руб.</b>													
Капитальные вложения	-8227,80												-8227,80
<b>Денежный поток, тыс. руб.</b>													
Чистый дисконтированный доход, тыс. руб.		2934,21	2667,46	2424,97	2204,51	2004,10	1821,91	1656,28	1505,71	1368,83	1244,39		<b>19832,39</b>
Прибыль нарастающим итогом	-8227,80	-5293,59	-2626,13	-201,16	2003,35	4007,46	5829,37	7485,65	8991,37	10360,20			<b>11604,59</b>
Коэффициент дисконтирования	1,00	0,91	0,83	0,75	0,68	0,62	0,56	0,51	0,47	0,42	0,39		

Таблица 4.15 – Результаты расчётов ЧДД для различных вариантов грузонапряжённости на 1 км пути.

Года	I вариант, тыс. руб. на км. при 50 млн. ткм брутто в год		II вариант, тыс. руб. на км. при 100 млн. ткм брутто в год		III вариант, тыс. руб. на км при 150 млн. ткм брутто в год	
	Прибыль	ЧДД(NPV)	Прибыль	ЧДД(NPV)	Прибыль	ЧДД(NPV)
1	1388,46	-6839,3	2161,33	-6066,5	2934,21	-5293,6
2	1262,24	-5577,11	1964,85	-4101,62	2667,46	-2626,13
3	1147,49	-4429,62	1786,23	-2315,39	2424,97	-201,16
4	1043,17	-3386,45	1623,84	-691,55	2204,51	2003,35
5	948,34	-2438,11	1476,22	784,67	2004,1	4007,46
6	862,12	-1575,99	1342,02	2126,69	1821,91	5829,37
7	783,75	-792,24	1220,02	3346,71	1656,28	7485,65
8	712,5	-79,74	1109,11	4455,81	1505,71	8991,37
9	647,73	567,99	1008,28	5464,09	1368,83	10360,2
10	588,84	1156,83	916,62	6380,71	1244,39	11604,59
ИД (ID)	9384,63	0,14	14608,51	0,78	19832,39	1,41

Анализ таблицы 4.15 показал, что средний ремонт, проведенный для устранения длинных неровностей, позволяет получить экономию денежных средств на участках с малой, средней и высокой грузонапряженностью, а также позволяет уменьшить потребность в ППВ.

На единицу затраченных ресурсов начальных капитальных вложений (внеплановый средний ремонт) мы получаем 0,14, 0,78 и 1,41 прибыли при грузонапряженности 50, 100, 150 млн. ткм брутто / год соответственно.

По результатам расчётов ЧДД, приведенных в таблице 4.15 для различных вариантов грузонапряженности построены зависимости изменения ЧДД по годам (рисунок 4.13). Анализ графика показал, что период окупаемости  $T$  для разных вариантов составляет:

Вариант I,  $T_I (IRR) \approx 8,2$  года или  $\approx 99$  месяцев;

Вариант II,  $T_{II} (IRR) \approx 4,5$  года или  $\approx 54$  месяцев;

Вариант III,  $T_{III} (IRR) \approx 3,1$  года или  $\approx 37$  месяцев.

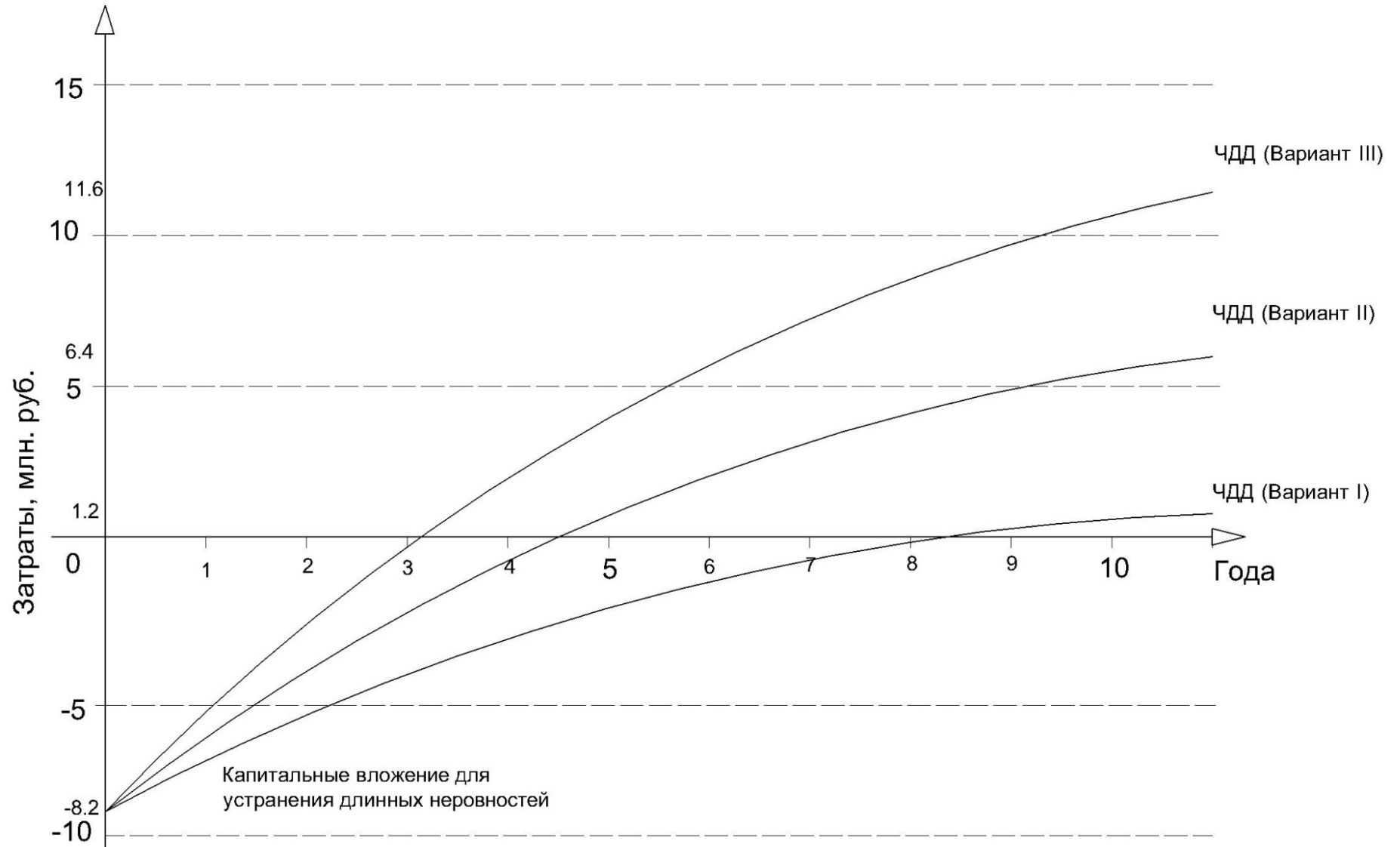


Рисунок 4.13 – Чисто-дисконтированный доход от устранения неровностей на участках с различной грузонапряженностью на 1 км пути:

I вариант 1,2 млн. руб. при  $\Gamma=50$ ; II вариант 6,4 млн. руб. при  $\Gamma=100$ ; III вариант, 11,6 млн. руб., при  $\Gamma=150$

На рисунке 4.14 приведена вторая половина жизненного цикла пути после проведения внепланового среднего ремонта для удаления длинных неровностей [211]. Показана разница в затратах на техническое обслуживание с учетом устранения длинных неровностей и без него, период стабилизации пути после его проведения и влияние ППВ на сокращение периода стабилизации, что подтверждается исследованиями [191].

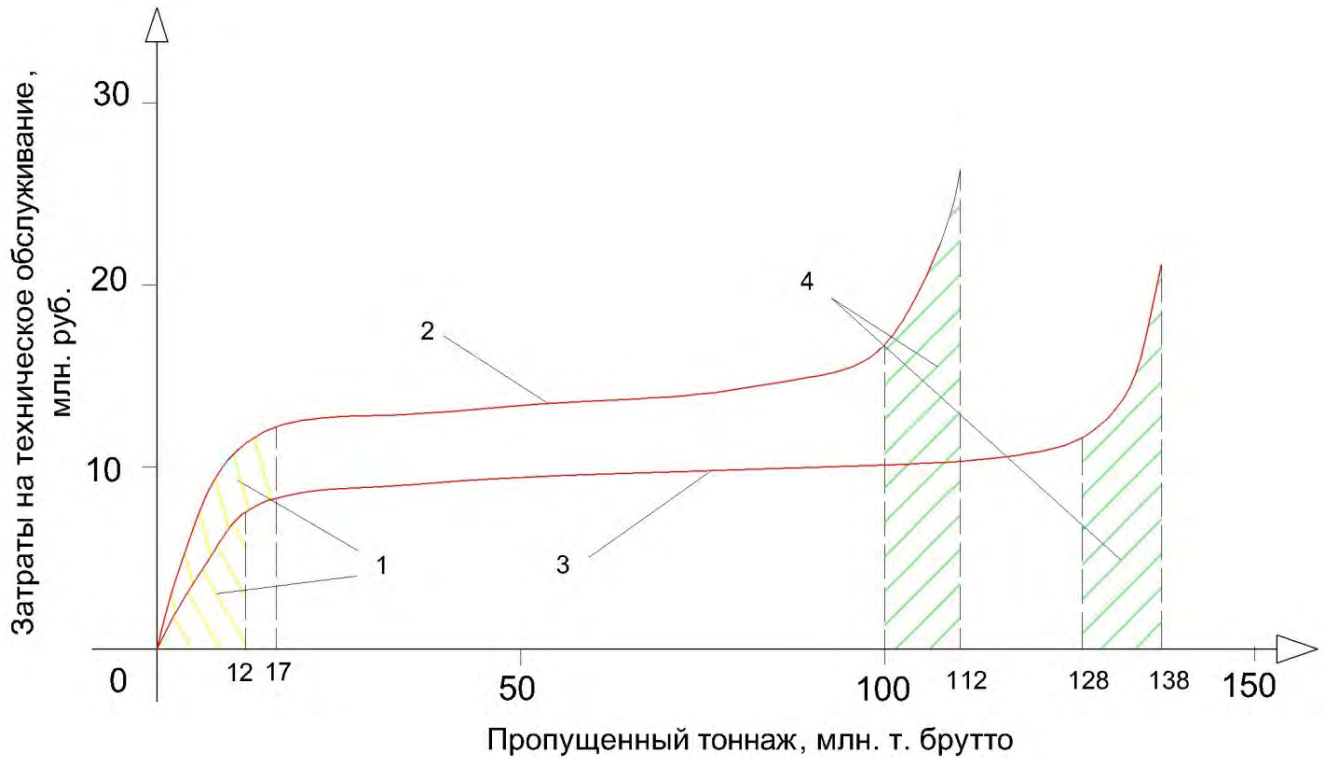


Рисунок 4.14 – Схема жизненного цикла пути после устранения длинных неровностей в профиле:

- 1) послеремонтная осадка пути;
- 2) стабильное положение пути без устранения длинных неровностей;
- 3) стабильное положение пути с устранением длинных неровностей;
- 4) зона роста затрат на техническое обслуживание

Анализ рисунка 4.14 показывает, что устранение длинных неровностей позволяет достигнуть экономии при техническом обслуживании за счёт увеличения стабильного периода работы пути.

## ВЫВОДЫ ПО ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

- 1) Устранение длинных неровностей в продольном профиле за счёт проведения внепланового среднего ремонта, позволяет получить экономический эффект, обусловленный сокращением энергии на тягу поездов. Величина полученного эффекта зависит от объема устраненных неровностей.
- 2) Величина полученного эффекта зависит также от качества выправки пути в процессе ремонта с точки зрения потребности в послеосаточных выправках.
- 3) Проведение внепланового среднего ремонта пути снижает последующие затраты на техническое обслуживание пути пропорционально величине грузонапряженности, за счёт изменения сроков проведения ППВ.
- 4) В среднем по сети железных дорог экономия достигнет 15%, увеличиваясь на участках с высокой грузонапряженностью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Введено новое определение «длинная неровность» как отклонение положения пути элементов равномерного уклона в продольном профиле, получаемое геодезическими методами от внешних реперов по отношению к пути или методом преобразования, представленного в работе.

2) Предложены показатели оценки деформативности пути, на основе данных изменения параметров длинных неровностей в продольном профиле, включенные в актуализированную методику оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности, утвержденную распоряжением ОАО «РЖД» № 2706/р от 22.12.2017 г.

3) Разработана методика и расчетная модель мониторинга состояния пути по параметрам длинных неровностей продольного профиля, включенные в методику дополнительного мониторинга состояния пути по параметрам длинных неровностей продольного профиля, базирующейся на соотношении длины, амплитуды и площадей неровностей, утвержденная распоряжением ОАО «РЖД» № 2191/р от 03.10.2019 г.

4) Изложены основные положения методики определения параметров длинных неровностей для их мониторинга в процессе эксплуатации.

5) Представлены систематизированные результаты мониторинга длинных неровностей в различных регионах сети.

6) Раскрыты зависимости изменения параметров длинных неровностей от пропущенного тоннажа.

7) Доказано влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения поездов.

8) Создана система практических рекомендаций в части мониторинга параметров состояния пути по данным, содержащим изменения характеристик длинных неровностей продольного профиля.

9) Определен экономический эффект от устранения длинных неровностей продольного профиля, оказывающих влияние на расход электроэнергии на тягу



поездов, составляющий 157 тыс. рублей на 100 км пути с длинными неровностями при грузонапряженности 100 млн т брутто в сутки.

10) Перспективой дальнейшей разработки темы является оценка связи параметров длинных неровностей с показателями динамики подвижного состава в широком диапазоне скоростей движения и очертаний профиля длинных неровностей с разработкой рекомендаций по использованию полученных результатов при подготовке распоряжения ОАО «РЖД» о «Допускаемых скоростях движения поездов по пути при наличии длинных неровностей».

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Верховых, Г.В. Эксплуатация пути при организации тяжеловесного движения / Г.В. Верховых //Железнодорожный транспорт. – 2016. – №. 10. – С. 28-30.
2. Гапанович, В.А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении / В.А. Гапанович //Железнодорожный транспорт. – 2016. – №. 10. – С. 10-15.
3. Иванов, П.А. Об эффективности технологии тяжеловесного движения и перспективах ее развития / П.А. Иванов //Железнодорожный транспорт. – 2016. – №. 10. – С. 16-18.
4. Гапанович, В.А. Инфраструктура в условиях интенсификации перевозок / В.А. Гапанович, В.О. Певзнер, О.А. Суслов [и др.] //Железнодорожный транспорт. – 2016. – №. 3. – С. 16-20.
5. Третьяков, В.В. Воздействие на путь вагонов с повышенной осевой нагрузкой / В.В. Третьяков, И.Б. Петропавловская, В.О. Певзнер [и др.] //Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2016. – Т. 75. – №. 4. – С. 233-238.
6. Мещерин, Ю.В. Особенности конструкции тележек с осевой нагрузкой 25-27 тс и их проявление в условиях эксплуатации / Ю.В. Мещерин //Вагоны и вагонное хозяйство. – 2015. – №. 2. – С. 24-25.
7. Пегов, Д.В. Высокоскоростное движение: начало положено / Д.В. Пегов //Железнодорожный транспорт. – 2010. – №. 6. – С. 50-51.
8. Инструкция по текущему содержанию железнодорожного пути. ЦП/2023 [Текст] : [Утв. 27/VI 1959 г.] / М-во путей сообщения СССР. Глав. упр. пути и сооружений. - Москва: Трансжелдориздат, – 1959. – 188 с.
9. Нормы оценки по показаниям путеизмерительных вагонов [Текст]: Утв. 14/X 1959 г. / Глав. упр. пути и сооружений МПС. – Москва: Трансжелдориздат, – 1960. – 17 с.

10. Технические указания по расшифровке записей путеизмерительных вагонов, оценке отступлений от норм содержания рельсовой колеи железнодорожного пути, мерам по обеспечению безопасности движения поездов при их обозначении (в отмену Техническим указаниям по расшифровке записей и оценке состояния пути по показаниям путеизмерительных вагонов, утвержденных 30.10.75 г.) – [М.] : Б. и., – 1981. – 34 с.

11. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов. № ЦП-515. М.: МПС РФ, – 1996.

12. МПС У. Инструкция по расшифровке лент и оценке состояния рельсовой колеи по показаниям путеизмерительного вагона ЦНИИ-2 и мерам по обеспечению безопасности движения поездов № ЦП-515. – 1997.

13. Технические указания по определению и использованию характеристик устройства и состояния пути, получаемых вагонами-путеобследовательскими станциями ЦНИИ-4 [Текст] : нормативно-технический материал. ЦПТ-55/15 / ОАО «РЖД». Департамент пути и сооружений. – Москва : ИКЦ «Академкнига», – 2004. – 112 с.

14. Временная инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов // Утверждена распоряжением Центральной дирекции инфраструктуры от. – 08 июля 2019 г. – № ЦДИ-586/р.

15. Инструкция по оценке состояния рельсовой колеи путеизмерительными средствами и мерам по обеспечению безопасности движения поездов // Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от. – 28.02.2020. – N 436/р.

16. Правила эксплуатации объектов инфраструктуры, подвижного состава и организации движения на участках обращения скоростных и высокоскоростных пассажирских поездов со скоростями более 140 до 250 км/ч включительно (с изменениями на 4 июля 2016 года) // Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от. – 13 февраля 2012 г. – N 283р.

17. Нормы допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм федерального железнодорожного транспорта: приказ МПС РФ от 12 ноября 2001 г. № 41. М.: Транспорт, 2001. – С.122-124.
18. Распоряжение ОАО «РЖД» от 08.11.2016 № 2240р (с изм. от 23.08.2018) «О нормах допускаемых скоростей движения подвижного состава по железнодорожным путям колеи 1520 (1524) мм».
19. Кулябко, А.М. Так что же такое неудовлетворительный километр? / А.М. Кулябко //Путь и путевое хозяйство. – 2012. – №. 1. – С. 23-24.
20. Standard B. Railway applications/Track-Track geometry quality //BS EN. – 2003. – С. 13848-1.
21. UIC Code 518:2009. Testing and approval of railway vehicles from the point of view of their dynamic behaviour — Safety — Track fatigue — Running behaviour, 4th edition, International Union of Railways (UIC), – 2009.
22. Takahara K., Miyamoto K. Survey automation and management improvement of profile and alignment for the Shinkansen track //Japanese railway engineering. – 1984. – Т. 24. – №. 1. – P. 13-17.
23. Esveld, C. Messen und Korrigieren der Glusgeometrie. //ETR-Eisenbahntechnische Rundschau. – 1980. 2-29. – №5. – S.351-359.
24. Esveld, C. Измерение и устранение вертикальных неровностей / C. Esveld // Железные дороги мира. – №4. – 1984. – С.32-36.
25. Esveld, C. Система измерений характеристик состояния пути / C. Esveld //Железные дороги мира. – №6. – 1986. – С.57-61.
26. Fendrich, L. Диагностика пути на железных дорогах ФРГ: контроль качества, методы определения объемов работ / L. Fendrich //Железные дороги мира. – №7. – 1992. – С.45-49.
27. Kampczyk. A. Überwachung der Gleisgeometrie bei den polnischen Bahnen (PKP) // Eisenbahningenieur. – 2011. – №4. – S.37-41.
28. Setzungsverhalten des Schotters / Ulf Gerber, Wolfgang Fengler // ETR: Eisenbahntechn. Rdsch. – 2010. – Vol. 59, N 4. – S.170-175.

29. Ашпиз, Е.С. Мониторинг эксплуатируемого земляного полотна: Теоретические основы и практические решения : дис. – диссертация... доктора технических наук: 05.22. 06 / Ашпиз Евгений Самуилович. – М., 2002. – 396 с.
30. Rene Kipper, Ulf Gerber, Jorg Schmeister. Bestimmung langwelliger Gleisverformungen und deren Bewertung // Eisenbahningenieur. – 2013. – Vol. 64, №2. – S.11-18.
31. Певзнер, В.О. Инфраструктура в условиях повышения осевых нагрузок / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, К.В. Шапетько, [и др.] // Железнодорожный транспорт. – №4. – 2018. – С.52-55.
32. Сереев, Б.Н. Пересмотр действующих правил расчета пути // Пересмотр путевых расчётов: сб. / Центральный институт научных исследований и реконструкции железнодорожного пути НКПС. Вып.11. – М.: ОГИЗ – Гострансиздат, – 1931. – С.133-185.
33. Сереев, Б.Н. Полевые испытания рельсового пути // Пересмотр путевых расчётов: сб. / Центральный институт научных исследований и реконструкции железнодорожного пути НКПС. Вып.11. – М.: ОГИЗ – Гострансиздат, – 1931. – С.7-29.
34. Стоянович, Г.М., Пупатенко, В.В. О необходимости снижения выбродинамического воздействия на железнодорожный путь при проходе тяжеловесных поездов/ Г.М. Стоянович, В.В. Пупатенко //Современные проблемы проектирования, строительства и эксплуатации железнодорожного пути. – 2016. – С.113-117.
35. Köhler J. Zur plastischen Verformung des Gleises Signal und Sschiene. – 1984. – Bd. 28, №4. – S. 130-132.
36. K. Lieberenz et al Track substructure improvements to increase load-bearing strength // Rail Engineering International. – 2011. – № 4. – P.6-10.
37. Евдокимов, Б.А. О неравномерности накопления остаточных деформаций пути // Транспортное строительство. – № 10. – 1970. – С.4-5.
38. Steven Chrimer. Seeking the subgrade threshold // Railway Track and Structures. – 1984. – № 6. – p. 31-32.

39. J. Eisenman, L. Matter, Auswirkung der Oberbakonstruktion auf die Schotter und Untergrundbeanspruchung // Eisenbahningenieur. – 1984. – № 3. – S.99-107.
40. U. Martin et al. Früherkennung von Instabilitäten an Bahnkörpern in Schotterbauweise // Eisenbahningenieur. – 2015. – № 1. – S. 31-36.
41. Shenton M.J. Ballast deformation and track deforiation track technol // Proc. Conf. Noftingham, 11-13, July, 1981, London. 1985. – p. 253-279.
42. Великий Транссиб. Трудные годы строительства (1891-1916) / З.Л. Крейнис. – Москва: – 2016. – 255с.
43. С.П. Першин. Деформационный расчет пути //Путь и путевое хозяйство. – №10. – 1996. – С.8.
44. Вериго, М.Ф. Исследование остаточных деформаций балластного слоя под шпалой при действии на нее повторных нагрузок / М.Ф. Вериго // Вестник ВНИИЖТ. – №4. – 1958. – С.9-16.
45. Барабошин, В.Ф. О накоплении остаточных деформаций в балласте при наличии неровностей на рельсе / В.Ф. Барабошин // Вестник ВНИИЖТ. – 1967. – № 3. – С.39-41.
46. Лысюк, В.С. Накопление остаточных деформаций в пути / В.С. Лысюк //Путь и путевое хозяйство. – №10, – 1973. – С.44.
47. Стоянович, Г.М. Прогнозирование несущей способности и деформативности подшпального основания при повышенных вибродинамических нагрузка / А.Ф.Колос, Е.И.Шехтман, В.В.Говоров [и др.] // Бюллетень результатов научных исследований. – 2018. - №2. – С.60-66.
48. Кистанов, А.И. Особенности работы железнодорожного земляного полотна в условиях повышенной интенсивности движения поездов. Проектирование, строительство и содержание железнодорожного пути и сооружений в условиях Урала и Сибири // Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта. – Вып.56. – 1977. – С.36-40.
49. Стоянович, Г.М. Натурное изучение величины вибродинамического воздействия подвижной нагрузки на грунты : монография / Г.М. Стоянович. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, – 2005. – 147с.

50. Железнов, М.М. Влияние длительности и частоты приложения нагрузки на напряженно-деформированное состояние пути / М.М. Железнов, В.О. Певзнер, В.П. Соловьев [и др.] //Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2018. – Т. 77. – №. 6. – С. 364-367.
51. Smith K. Meeting China's burning desire for coal //International Railway Journal. – 2013. – Т.53. – №.8. P.24-28.
52. Коншин, Г.Г. Напряжения и упругие деформации в земляном полотне под воздействием поездов / Г.Г. Коншин, В.П. Титов, В.И. Хромов [и др.] //Труды ЦНИИ МПС. – 1972. – №. 460. – 128с.
53. Коншин, Г.Г. Оценочные критерии воздействия на земляное полотно вагонов с повышенными осевыми нагрузками //Труды Международной научно-практической конференции. «Транссибирская магистраль на рубеже XX-XXI веков: Пути повышения эффективности использования перевозочного потенциала» М.: МИИТ, 2003. – С.367-369.
54. Рыбкин, В.В. Влияние осевой нагрузки вагонов на динамические показатели напряженно-деформированного состояния элементов пути / В.В. Рыбкин, В.И. Климов, А.М. Патласов [и др.] //Вопросы взаимодействия пути и подвижного состава: Межвуз. сб.науч.тр. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1990. – С.9-15.
55. Повышение эффективности работы железнодорожного пути на линиях обращения поездов с увеличенными осевой нагрузкой и весом : [Аналит. обзор] / А.К. Уразбеков; Каз. НИИ НТИ и техн.-экон. исслед. – Алма-Ата : КазНИИНТИ, 1990. – 66 с.
56. Hongyan Z. Dynamic Interact Heavy Haul Railways on Track Structures //Chinese Railways. – 2005. – Т. 1. – P. 38-42.
57. Певзнер, В.О. Деформативность и стабильность пути / В.О. Певзнер //Путь и путевое хозяйство. – № 2. – 2005. – С. 23-26.
58. Ашпиз, Е.С. Развитие системы мониторинга пути / Е.С. Ашпиз //Путь и путевое хозяйство. – №4. – 2015. – С.30-32.

59. Певзнер, В.О. Совершенствовать планирование путевых работ / В.О. Певзнер //Путь и путевое хозяйство. – 1993. – №. 9. – С. 10-12.
60. Певзнер, В.О. Проблемы контроля состояния пути на современном этапе / Певзнер В.О., Ромен Ю.С. //Железнодорожный транспорт. – 1994. – №. 2. – С.34-37.
61. Atsushi Yokoyama, Mitsunobu Takikawa. JP East aims at condition-based maintenance //Railway Gazette International. – 2014. – №1. – pp.37-39.
62. Ершков, О.П. Анализ накопления остаточных деформаций рельсовых нитей в профиле и плане / О.П. Ершков, А.А. Ильяшенко, Е.Д. Ткачев [и др.] //Тр. ВНИИЖТ. – 1980. – №.628. – С. 50-67.
63. Певзнер, В. О. Оценка влияния повышенных осевых нагрузок на второе предельное состояние-остаточные деформации пути/ В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.В. Третьяков [и др.]//Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9. – №. 9. – С. 20-25.
64. Певзнер, В.О. Деформативность пути на участках обращения тяжеловесных поездов / В.О. Певзнер, А.И. Лисицын, Е.Н. Гринь [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 9. – С. 36-41.
65. Кочнов, А.Д. Теоретические и экспериментальные методы выбора параметров рессорного подвешивания грузовых вагонов [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Кочнов Анатолий Дмитриевич. – М., – 1971. – 142 с.
66. Кочергин, В.В. Система выявления участков пути с повышенным уровнем воздействия на экипаж скоростного подвижного состава / В.В. Кочергин, Г. Грабнер, И.Н. Максимов [и др.] //Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2015. – №2. – С.3-8.
67. Липп, А. Высокоскоростной поезд Velaro для России / А. Липп, Д. Йон, Р. Манглер [и др.] //Железные дороги мира. – 2009. – № 1. – С. 36-50.
68. Ромен, Ю.С. Оценка состояния пути на основе моделирования процессов взаимодействия в системе колесо-рельс / Ю.С. Ромен, Я.М. Клебанов, О.Б. Симаков [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2014. – № 5. – С.58-62.



69. Зензинов, Б.Н. О новых нормативах оценки колеи / Б.Н. Зензинов, В.И. Корольков, Ю.Р. Трушина //Путь и путевое хозяйство. – №9. – 2005. – С.8-10.
70. Коган, А.Я. Вертикальные динамические силы, действующие на путь. // Труды ЦНИИ МПС, вып.402. – М.: Транспорт, – 1969, – 206 с.
71. Коган, А.Я. Расчеты железнодорожного пути на вертикальную динамическую нагрузку. //Труды ЦНИИ МПС, вып.502. – М.: Транспорт, – 1973, – 80 с.
72. Ефимов, А.Н. Исследование спектральных характеристик неровностей железнодорожного пути / А.Н. Ефимов, С.В. Малинский, В.О. Певзнер // Исследование взаимодействия пути и современного подвижного состава / Межвуз. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ДИИТ. – 1989. – С. 61-68.
73. Коган, А.Я. Спектральный состав неровностей пути и напряженно-деформированное состояние его элементов / А.Я. Коган, М.А. Левинзон, С.В. Малинский [и др.] // Вестник ВНИИЖТа. М.: ВНИИЖТ. – 1991. – №1. – С.39-41.
74. Ашпиз, Е.С. Оценка стабильности земляного полотна на основаниях из многолетнемёрзлых грунтов по информации лент вагона-путеизмерителя / Е.С. Ашпиз, С.В. Малинский // Межвуз. сб. науч. тр. М.: МИИТ. – 1992. – Вып. 844. – С.64-70.
75. Коган, А.Я. Оценка расстройтва пути в различных условиях эксплуатации/ А.Я. Коган, В.О. Певзнер, Е.В. Козеренко // Труды ВНИИЖТ, Вып. 660. М.: Транспорт, – 1983. – С.47-52.
76. Ефимов, А.Н. Исследование спектральных характеристик неровностей железнодорожного пути / А.Н. Ефимов, С.В. Малинский, В.О. Певзнер // Исследование взаимодействия пути и современного подвижного состава. / Межвуз. сб. науч. тр. –Днепропетровск: ДИИТ, – 1987. – С.45-52.
77. Haigermoser A., Bezin Y., Coudert F., Eickhoff B., Grabner G., Kraft S., Thomas D., Zacher M. Der Einfluss der Gleislage auf das Fahrverhalten der Fahrzeuge – Ergebnisse aus dem EU-Projekt DYNOTRAIN. ZEVrail: Zeitschrift für das gesamte System Bahn. – 2013. – No.137. – P.159-171.

78. K.U. Wolter, Franz Erhard. Beurteilung von Gleislage-abweichungen mit Hilfe von Fehlerreferenzfunktionen // Eisenbahntechnische Rundschau, – 2013, – №9, – S.48-51.
79. Певзнер, В.О. Уточнение оценки фактического состояния пути при планировании выправочных работ/ В.О. Певзнер // Решение задач взаимодействия подвижного состава и пути реального очертания: Труды ВНИИЖТ. – М.: Транспорт, – 1985. – С.25-33.
80. Певзнер, В.О. Статистические показатели пути / В.О. Певзнер, Э.К. Лецкий, Е.В. Козеренко [и др.] // Вестник ВНИИЖТ, – 1984, – №2, – С.41-45.
81. Рословец, А.А. Диагностика и мониторинг пути: современное состояние и перспективы / А.А. Рословец // Путь и путевое хозяйство. – №11. – 2017. – С.2-6.
82. Frederich F., Gleislage-aus fahrzeugtechnischer Sicht D. Effect of track geometry on vehicle performance //Zeitschrift für eisenbahnwesen und vekehrstechnik-Glasers auualen. – 1984. – Т. 108. – №. 12. – S. 355-362.
83. EN13803-2:2011-03 // Railway applications – Track; Track alignment design parameters. Track gauges 1 435 mm and wider Part 1: Plain line.
84. EN13803-2:2010-06 // Railway applications – Track. Track alignment design parameters - Track gauges 1 435 mm and wider; Part 2: Switches and crossings and comparable alignment design situations with abrupt changes of curvature.
85. Marriot, David. Track geometry standard deviation calculator. Part 1 / D. Marriot // Permanent Way Institution. - 2018. – Vol. 136, – № 3. – P.56-60.
86. Певзнер, В.О. Совершенствование нормативных документов по оценке состояния пути при скоростном движении / В.О. Певзнер О.Ю. Белоцветова, К.В. Шапетько //Путь и путевое хозяйство. – 2014. – №. 12. – С. 2-6.
87. Седёлкин, Ю.А. Анализ состояния верхнего строения пути и земляного полотна на основе результатов обследования диагностическими средствами / Ю.А. Седёлкин, В.В. Атапин // Путь и путевое хозяйство. – №7. – 2015. – С.13-15.
88. Михалкин, И.К. Система диагностики железнодорожной инфраструктуры: тенденция развития / И.К. Михалкин // Евразия Вести. – 2017. – №12. С.15-16.

89. Крачковский, В.П. Влияние начальной осадки шпал на статистические и динамические прогибы рельсов и напряжения в них / В.П. Крачковский // Труды МИИТа. Вып. VIII. М., – 1928. – С.257-374.
90. Шахунянец, Г.М. Земляное полотно. / Г.М. Шахунянец. Государственное транспортное железнодорожное издательство. Москва, – 1946. – 342с.
91. В.П. Титов, В.П. Земляное полотно грузонапряженных и скоростных линий / В.П. Титов // Железнодорожный транспорт. – 1985. – № 9. – С.52–56.
92. Колос, А.Ф. Расчёт осадок насыпей на слабом основании с использованием динамической теории упругости / А.Ф. Колос, В.С. Рыжов // Изв. Петерб. ун-та путей сообщ. – 2013. – Вып. 3. – С.23-28.
93. Перспективные направления развития мониторинга и диагностики земляного полотна ОАО «РЖД» // Евразия Вести. – 2010. – №9. С.4.
94. Лебедев, А.В. Анализ состояния земляного полотна / А.В. Лебедев // Путь и путевое хозяйство. – №8. – 2017. – С.8-10.
95. Колос, И.В. Проблемы повышения осевых нагрузок и скоростей движения поездов на участках распространения слабых грунтов / И.В. Колос, Е.С. Свинцов, Г.М. Стоянович [и др.] //Бюллетень результатов научных исследований. – 2017. – №. 4. – С.26-31.
96. Клименко, А.А. О путевой инфраструктуре Забайкалья / А.А. Клименко // Путь и путевое хозяйство. – №1. – 2018. – С.2-5.
97. Билев, И.Б. Повышение пропускной способности на участке Маленга – Обозерская Северной дирекции инфраструктуры / И.Б. Билев // Путь и путевое хозяйство. – №6. – 2017. – С.20-23.
98. Колос, А.Ф. Для повышения осевых нагрузок и скоростей движения / А.Ф. Колос // Путь и путевое хозяйство. – №11. – 2009. – С.9-10.
99. Козлов А.В. Профилактика деформаций подбалластного основания пути / А.В. Козлов // Путь и путевое хозяйство. – №9. – 2014. – С.2-7.
100. Инструкция по содержанию земляного полотна железнодорожного пути (ЦП-544) / МПС России. – М.: Транспорт, – 2000. – 189с.

101. Nogy, Eurling. Levente Railway Earthworks instability diagnosis using track geometry measurement data - CCQ and Top 35m / Eurling Levente Nogy // Permanent Way Institution. – 2016. – Vol. 134 № 2. – P. 18-25.
102. Шапетько, К.В. Исследования накопления деформаций железнодорожного пути на участке испытаний вагонов с осевой нагрузкой 27 тс / К.В. Шапетько // Вестник ВНИИЖТ. – 2017. – Т.76. – №4. – С.238-242.
103. Berggren E. Beating stiff track //International Railway Journal. 2013. – Т.53. – №. 10. – P.39-41.
104. Soldati, Giuliano. Kontinuierliche Messung der Gleiseinsenkung mit 20 t Achslast / G. Soldati, M. Meier, M. Zurkirchen // Der Eisenbahningenieur. - 2016. – № 2. – S. 24-26.
105. Liu, Duo Dynamische Radkräfte im Bericht von Unstetigkeitsstellen im Gleis = Dynamic Wheel Forces along Track Discontinuities / D. Liu, B. Lechner, St. Freudenstein // ZEVrail. – 2016. – № 4. – S. 132-137.
106. Крейнис, З.Л. Исследования спектрального состава случайного поля очертаний рельсовых нитей / З.Л. Крейнис // Сборник научных трудов ВЗИИТа. – 1975, Вып. 78. – С.70-85.
107. Лапина, Л. Г. Формирование расчетных входных возмущений по результатам спектрального анализа неровностей реальных участков железнодорожного пути / Л.Г. Лапина, И.А. Мащенко //Техническая механика. – 2010. – №. 2. – С. 10-18.
108. Малинский, С.В. Исследование спектральных свойств вертикальных неровностей железнодорожного пути / С.В. Малинский, В.О. Певзнер // Вопросы взаимодействия пути и подвижного состава в условиях интенсификации работы железнодорожного транспорта: межвузовский сборник научных трудов / ДИИТ. – 1990. – С.15-20.
109. Сергеева, Наталья Юрьевна. Требования к неровностям пути в вертикальной продольной плоскости на участках скоростного движения : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.06. – Москва, – 1999. – 150 с.

110. Певзнер, В.О. Сравнительный анализ воздействия на путь вагонов с различными осевыми нагрузками / В.О. Певзнер, И.Б. Петропавловская, В.В. Третьяков [и др.] //Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9. – №. 9. – С. 68-75.

111. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов / ред. ориг. изд. : Уолт Кестер ; пер. с англ. под ред. А.А. Власенко. – Москва: Техносфера, – 2010. – 326 с.

112. Pevzner V., Shapetko K., Slastenin A. (2021) Needed Additions to the Diagnostic System of High-Speed Lines. In: Murgul V., Pukhkal V. (eds) International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2019. EMMFT 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1258. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5\\_43](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57450-5_43).

113. Mauer L. Determination of track irregularities and stiffness parameters with inverse transfer functions of track recording vehicles //Vehicle System Dynamics. – 1995. – Т. 24. – №. sup1. – P.117-132.

114. Boldt, Arend (ed.). Fahrwegmessung. Fahrzeuge und Technik für Gleisgeometriemessung und Ultraschallschienenprüfung bei der DB Netz AG. [= Lok Rundschau Sonderheft]. 2003.

115. Певзнер, В.О. Инфраструктура в условиях применения вагонов с повышенными осевыми нагрузками / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.Б. Петропавловская [и др.] //Железнодорожный транспорт. – 2017. – №. 7. – С. 58-61.

116. Мишин, В.В. Комплексный показатель состояния геометрии пути / В.В. Мишин, В.О. Певзнер, Б.Н. Зензинов // Ж.-д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство»: ЭИ/ ЦНИИТЭИ МПС. – 1999. – Вып. 3. – С.1-15.

117. Варга, Э. Измерение неровностей рельсового пути инерциальным способом / Э. Варга // Вестник ВНИИЖТ. – №2. – 1991. – С.37-39.

118. Савоськин, А.Н. Вертикальные и горизонтальные возмущения на рельсовом полотне / А.Н. Савоськин, В.В. Кочергин, А.И. Поляков // Мир транспорта – 04-2015. – С.4-14.

119. Певзнер, В.О. Влияние неровностей пути на напряженное состояние его элементов при воздействии грузовых вагонов / В.О. Певзнер, Л.О. Грачева //Труды Всесоюз. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта, – 1976, – Вып. 549, – С.47-55.

120. Грачева, Л.О. Влияние неровностей в кривых участках пути на динамику и воздействие на путь грузовых вагонов при различных состояниях тележек / Л.О. Грачева, В.О. Певзнер, П.С. Анисимов //Труды Всесоюз. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта, –1976, – Вып. 549, – С.26-46.

121. Грачева, Л.О. Оценка влияния неровностей пути на динамические показатели различных типов вагонов (без износа ходовых частей) при движении по прямым участкам пути / Л.О. Грачева, А.А. Львов, В.О. Певзнер [и др.] //Труды Всесоюз. Науч.-исслед. ин-та ж.-д. транспорта, – 1976, Вып. 549, – С.56-71.

122. Титов, В.П. Земляное полотно и безопасность движения / В.П. Титов //Путь и путевое хозяйство. – 1996. – №. 6. – С. 29.

123. Черкашин, Ю.М. Безопасность движения железнодорожного подвижного состава: сб. науч. тр. ВНИИЖТ / Ю.М. Черкашин – М.: Интекст, – 2010. – 176с.

124. Фришман, М.А. Особенности определения изгибных напряжений в рельсах при высоких скоростях движения в зоне неровностей/ М.А. Фришман, В.И. Климов, Н.В. Иволга // Вестник ВНИИЖТ, – №3, – 1977, – С.32-35.

125. Методика оценки воздействия подвижного состава на путь по условиям обеспечения надежности // Утверждена распоряжением ОАО «РЖД» от. – 22 декабря 2017 г. – № 2706р.

126. Певзнер, В.О. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности //Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №. 1. – С. 26-30.

127. Певзнер В.О. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер, Е. С. Ашпиз, А. В. Замуховский [и др.] //Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №. 2. – С. 38-40.

128. Певзнер В.О. Общие положения методики оценки воздействия подвижного состава на путь по критериям прочности и надежности / В. О. Певзнер, Е. С. Ашпиз, А. В. Замуховский [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №. 3. – С. 34-37.

129. Ромен, Ю.С. Прогнозирование роста неровностей железнодорожного пути / Ю.С. Ромен, А.Н. Савоськин // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты Материалы XIII Международной научно-технической конференции. – 2018. – С. 181-184.

130. Бондаренко, И.А. Предложения по оценке деформативности железнодорожного пути / И.А. Бондаренко // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. – 2008. – №23. – С.117-122.

131. Heavy axle loading up another notch. // Progressive Railroading. -1990. - №12, P.38-42.

132. 125-ton Heavy Axle Load test: preliminary results come in // Railway Track & Structures, – 1989, – №7, – P.29-30.

133. Певзнер, В.О. Необходимые дополнения к системе оценки геометрии рельсовой колеи / В.О. Певзнер, В.В. Третьяков, И.В. Третьяков [и др.] // Вопросы развития железнодорожного транспорта : сб. трудов ученых АО «ВНИИЖТ» / под ред. М.М. Железнова, Г.В. Гогричиани. – М.: РАС, – 2017. – С.199-202.

134. Вериги, М.Ф. Метод расчета деформаций земляного полотна при действии на него динамических нагрузок / М.Ф. Вериги // Вестник ВНИИЖТ. – 1988. – № 5. – С.41-45.

135. R.E. Tuzik. When wheel meets rail // Railway Age. – 2000. – Т. 201. – №. 7. – P.42-45.

136. Ершков, О.П. Влияние последовательностей и сочетаний неровностей рельсовой колеи на динамическое взаимодействие грузовых вагонов и пути / О.П. Ершков, Ю.С. Ромен, В.Е. Николаев [и др.] // Вестник ВНИИЖТ. – № 8. – 1978. – С.35-38.

137. Певзнер, В.О. Основы разработки нормативов содержания пути и установления скоростей движения: науч. тр. ОАО «ВНИИЖТ» / В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен. – М.: Интекст, – 2013. – 224с.
138. Сергеева, Н.Ю. Разработка требований к длинным неровностям продольного профиля скоростных участков пути / Н.Ю. Сергеева, В.О. Певзнер // Ж.-д. транспорт. Сер. «Путь и путевое хозяйство»: ЭИ/ЦНИИТЭИ МПС. – 1999. – Вып. 3. – С.51-56.
139. Kentara, M. Track for new Tokaido frunk line // Permanent Way. 1962. № 4.
140. Певзнер, В.О. Научные основы системы управления состоянием пути / В.О. Певзнер. – М.: РАС, – 2018. – 272с.
141. Михалкин, И.К. Самоходная путеизмерительная лаборатория СПЛ-ЧС200 / И.К. Михалкин, О.Б. Симаков //Путь и путевое хозяйство. – 2013. – №. 3. – С. 2-4.
142. Михалкин, И.К. Диагностический комплекс СМДЛ-2ТЭ116 / И.К. Михалкин, Ю.А. Седёлкин // Техника железных дорог. –№1(33), –2016. – С.64-67.
143. Михалкин, И.К. «Инфотранс-Веларо Rus». Диагностика будущего/ И.К. Михалкин, О.Б. Симаков // Газета «Евразия» – №8. – 2015. – С.10.
144. Первая «Ласточка» информационной технологии //Локомотив – №4. – 2017. – С.4.
145. Непомнящих, Е.В. Диагностика состояния пути: учеб. Пособие по выполнению лабораторных работ для студентов очной и заочной форм обучения специальности 271501.65 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей». / Е.В. Непомнящих, К.А. Кирпичников. – Чита: ЗаБИЖТ, – 2013. – 120 с.
146. Циглер, В. Desiro RUS-перспективный пригородный электропоезд / Циглер В., Манглер Р. //Железные дороги мира. – 2012. – №. 4. – С. 44-51.
147. Певзнер, В.О. Совершенствование нормативных документов по оценке состояния пути при скоростном движении / В.О. Певзнер, О.Ю. Белоцветова, К.В.



Шапетько // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2014. – Т. 7. – № 7. – С.14-22.

148. Шарапов, С.Н. Малообслуживаемый путь: параметры подшпального основания / С.Н. Шарапов, Е.В. Яковлева // Путь и путевое хозяйство, – №3, – 2001. – С.24-28.

149. Wickens, A.H. Gilchrist, A.O. Vehicle Dynamics – a practical theory // Railway Engineer, – Volume 2, – Issue 4, – 1977, – P.26-34.

150. Лысюк, В.С. Методика расчета эквивалентных поездных нагрузок на путь / В.С. Лысюк // Вестник ВНИИЖТ. – №5. – 1973. – С.17-21.

151. Стоянович, Г.М. Конструкция переменной жесткости / Г.М. Стоянович, Л.Н. Марченко, В.В. Пупатенко [и др.] //Путь и путевое хозяйство. – 2000. – №. 1. – С.29-31.

152. Стоянович, Г.М. Обеспечение стабильности пути в зоне сопряжения искусственных сооружений и земляного полотна / Г.М. Стоянович, В.В. Пупатенко, К.В. Змеев //Путь и путевое хозяйство. – 2017. – №. 10. – С. 14-17.

153. Ciobanu, Constantin. Use of inherent standard deviations as track design parameters / С. Ciobanu // Permanent Way Institution. – 2018. – Vol. 136. – № 4. – P. 46-50.

154. Бернхард Х. Лихтбергер. Справочник «Железнодорожный путь»: Нижнее строение – верхнее строение – текущее содержание – экономическая эффективность [Текст] / Бернхард Х. Лихтбергер . -1-е изд.– Гамбург : DVV Media GmbH I Eurailpress, – 2010. – 432 с.

155. Sakuma, Koji. Monitoring of track maintenance – in pursuit of condition-based maintenance (CBM) / К. Sakuma, К. Takeda, J. Sato // Japanese Railway Engineering. – 2018. – Vol. 58. – № 3(201). – P. 9-12.

156. Соколов, А.М. Осевая нагрузка 27 тс – новая веха развития вагоностроения / А.М. Соколов, А.М. Орлова // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2016. – №3 (47). – С.5-7.

157. Брынь, М.Я. Исследования деформаций земляного полотна при тяжеловесном движении поездов / М.Я. Брынь, Н.Н. Богомолова, Д.А. Афонин [и др.] // Путь и путевое хозяйство. – №12. – 2018. – С.19-21.
158. Hellmich, Magnus. Überwachung der Infrastruktur ist mehr als nur ein Monitoring / M. Hellmich // Der Eisenbahningenieur. – 2017. – № 9. – S.44-49.
159. K. Wachter, K. Geyer. Ein ortsbewegliches Verfahren zur Messung der Rollinie Glasers Annalen, – 1987, – №5, – S.149-155.
160. H. Takai. Maintenance of track with long-wave track irregularity on Shinkansen. Quarterly Report of RTRI, – 1990, – №3, – pp.128-131.
161. Высокоскоростное пассажирское движение (на железных дорогах). Под ред. Н.В. Колодяжного М., «Транспорт», – 1976, – 416 с.
162. EN 12299-2009 Railway applications. Ride comfort for passengers. Measurement and evaluation is classified in these ICS categories: – 66s.
163. B.W. Lichtberger. Kostensenkung durch Qualitätsvorrat in der Fahrweginstandhaltung // Eisenbahningenieur, – 1999, – №1, – S.39-42.
164. Андреев, В.Е. Система контроля устойчивости хода на поезде «Сапсан»/ В.Е. Андреев // Железнодорожный транспорт. – №6, – 2015, – С.59-61.
165. Бржезовский, А.М. О причинах аварийного срабатывания системы контроля устойчивости хода вагонов ЭВС «Сапсан» / А.М. Бржезовский, В.Е. Андреев, Д.Н. Аршинцев, И.В. Смелянский // Вестник ВНИИЖТ. – 2, – 2014, – С.13-22.
166. Mochinaga T., Horikawa Y. Test production of track riding quality measuring instrument and brief measurements //Permanent Way. – 1983. – Т. 25. – №. 2. – P.5-23.
167. Путь и безопасность движения поездов / В.И. Белый, В.И. Болотин, В.А. Лаптев, А.Н. Дмитриев, В.Я. Шульга; Под ред. В.Я. Шульги. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, – 1983. – 151 с.
168. Путь и безопасность движения поездов /В.И. Болотин, В.А. Лаптев, В.С. Лысюк, В.Я. Шульга; Под ред. В.Я. Шульги. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, – 1994. – 199 с.

169. Динамика вагонов. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Челноков И.И. М., «Транспорт», – 1972, – С.1-304.
170. Обобщение мирового опыта тяжеловесного движения. Управление содержанием системы колесо – рельс / пер. с англ. под ред. С.М. Захарова. – М.: Интекст, – 2017. 420 с.
171. Черкашин, Ю. М. Динамика наливного поезда / Ю.М. Черкашин // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 543. М.: Транспорт, – 1975. – 136 с.
172. Черкашин, Ю.М. Безопасность движения железнодорожного подвижного состава: сб. науч. тр. ВНИИЖТ / Ю.М. Черкашин. – М.: Интекст, – 2010. – 176с.
173. Ромен, Ю.С. Характеристики возмущений, вызывающих колебания рельсовых экипажей / Ю.С. Ромен, А.Н. Савоськин, А.А. Акишин // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2013. – №. 6. – С. 21-30.
174. Бидуля, А.Л. Геометрически-силовой метод оценки устойчивости порожних вагонов / А.Л. Бидуля, О.Г. Краснов, М.Г. Акашев [и др.] // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – №. 2. – С.45-46.
175. Краснов, О.Г. Исследование устойчивости порожних вагонов при движении по искусственным неровностям / Краснов О.Г., Акашев М.Г. // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2011. – №. 4. – С.38-40.
176. Максимов, В.Н. Силы, действующие на вагон на сортировочных горках / В.Н. Максимов // Вестник ВНИИЖТ. – 1963. – № 4 – С.36-40.
177. Певзнер, В.О. Влияние длинных неровностей продольного профиля на безопасность движения в процессе интенсификации перевозочного процесса / В.О. Певзнер, А.И. Чечельницкий, К.В. Шапетько [и др.] // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (Вестник ВНИИЖТ). – 2020;79(5): – С.271-275.
178. Певзнер, В.О. О влиянии длинных неровностей пути на безопасность движения / В.О. Певзнер, Е.А. Сидорова, К.В. Шапетько [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2021. – № 11. – С. 40-44.

179. Вершинский, С. В. Динамика вагона / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов //М.: Транспорт. – 1991. – Т. 359.
180. Schranil, Steffen. Ein Energiekonzept für die Appenzeller Bahnen / St. Schranil // Eisenbahn Österreich. – 2017. – № 8. – S. 396-399.
181. Wimmer, Dirk. Energy consumption remains a key challenge in rail's efficiency battle / D. Wimmer // International Railway Journal. – 2017. – № 6. – P.42-43.
182. Reduction of energy consumption for running in pre-mass-production train set of series E235 / K. Watanabe [et al.] // Japanese Railway Engineering. – 2018. – Vol. 58, – № 1(199). – P.2-4.
183. Peak load management – reducing power peaks for a 1 AC 15 kV 16,7 Hz railway / N. Biedermann [et al.] // Elektrische Bahnen. – 2017. – International. – P. 1-12.
184. Fidansoy, Yigit. Design Thinking bei der Anwendung der energiesparsamen Fahrweise / Y. Fidansoy, S. Wanjani // Der Eisenbahningenieur. – 2017. – № 2. – S. 42-44.
185. Allianz pro Schiene startet Projekt zu Fahrerassistenzsystemen // Deine Bahn. – 2017. – № 6. – S.4.
186. Иванов, Б.И. Энергоэффективность и энергосбережение в ОАО «РЖД» / Б.И. Иванов //Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 9. – С. 40-42.
187. Виноградов, С.В. Цифровые технологии повышения энергетической эффективности железнодорожных перевозок/ С.А. Виноградов, К.М. Попов //Железнодорожный транспорт. – 2019. – № 9. – С. 42-45.
188. Веденисов, Б.Н. Повышение скорости движения, веса составов, мощности и эффективности тяговых средств транспорта / Б.Н. Веденисов, А.В. Комаров, С.П. Надежин. // Выпуск 1. Сопротивление движению на транспорте и методы его снижения. РИСО АН СССР. Москва, – 1950. – Ленинград. – 267с.
189. Вериго, М.Ф. О сопротивлении движению колеса по рельсу, обусловленному рассеиванием энергии в железнодорожном пути / М.Ф. Вериго // Техника железных дорог, – 1950, – № 8, – С.13-15.

190. Краснов, О.Г. Дополнительные топливно-энергетические затраты на тягу поездов из-за наличия неровностей на поверхности катания колес / О.Г. Краснов // Вестник транспорта Поволжья. – № 6 (66). – 2017. – С.29-34.

191. Певзнер, В.О. Управление энергетическими аспектами взаимодействия пути и подвижного состава / В.О. Певзнер, Ю.С. Ромен, К.В. Шапетько // Интеллектуальная энергетика на транспорте и в промышленности: Материалы всероссийской молодежной научно-практической конференции с международным участием / Омский гос. ун-т путей сообщения. Омск, – 2018. – С.167-173.

192. Грачева, Л.О., Влияние рассеивания энергии в рессорном подвешивании тележек на сопротивление движению грузовых вагонов / Л.О. Грачева, А.А. Худяков // Вестник «ВНИИЖТ». – №3, – 1979. –С.37-39.

193. Захаров, А.Н. Оценка сопротивления движению грузовых вагонов в зависимости от положения осей колесных пар в тележках и состояния пути / А.Н. Захаров, Ю.С. Ромен, В.О. Певзнер // Вестник «ВНИИЖТ». – №2, – 1996. – С.33-36.

194. Певзнер, В.О. Влияние состояние пути на энергетическое взаимодействие с подвижным составом / В.О. Певзнер, В.И. Рахманинов, И.Б. Петропавловская [и др.] // Железнодорожный транспорт. – №2, – 1996. – С.46-49.

195. Петров Н. Сопротивление поезда на железной дороге //СПб.: Тип. В. Демакова, Новый пер., д. – 1889. – Т. 7. – С. 371.

196. Астахов, П. Н. Сопротивление движению железнодорожного подвижного состава / П.Н. Астахов //Труды ВНИИЖТ–М.: Транспорт. – 1966. – №. 311. – 178с.

197. Рахманинов, В.И. Исследования автоматизации и эффективности применения средств экономии электроэнергии на электровозах: Дис... кан. техн. наук / ВНИИЖТ. – М., 1977. – С.73-97.

198. Кантор, И.И. Изыскание и проектирование железных дорог. – М.; ИКЦ «Академкнига», – 2003. – 288 с.

199. Правила тягового расчета для поездной работы //Нормативное производственно-практическое издание. – М.: ОАО «РЖД», 2016. – 515 с. – Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» № 867р от 12.05.2016 г.
200. Victor Pevzner, Uriy Romen, Kirill Shapetko. Control of energy aspects of track and rolling stock interaction // MATEC Web Conf. Volume 239, 2018 Siberian Transport Forum - TransSiberia 2018 MATEC Web of Conferences 239, 01044 (2018) <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823901044>.
201. Гапанович, В.А. О необходимости актуализации нормативов оценки геометрии рельсовой колеи / В.А. Гапанович, В.О. Певзнер, В.В. Кочергин [и др.] //Вестник Института проблем естественных монополий: Техника железных дорог. – №4(48), – 2019. – С.22-27.
202. Лаптев, В.А. Повышение эффективности и качества планирования работ текущего содержания пути по лентам путеизмерительных вагонов / В.А. Лаптев //Труды МИИТа, «Вопросы повышения эффективности строительства железных дорог и путевого хозяйства». – 1977, – Вып. 556. – С. 111-118.
203. Лаптев В.А. Система управления качеством эксплуатации пути / В.А. Лаптев //Путь и путевое хозяйство. – 1980. - № 8. – С. 38-40.
204. Третьяков, В. В. Влияние характеристик подбалластного основания на интенсивность накопления расстройств пути в вертикальной плоскости : диссертация ... кандидата технических наук : 05.22.06 / Третьяков Василий Владимирович; [Место защиты: Науч.-исслед. ин-т железнодорожного транспорта]. – Москва, 2008. – 163 с.
205. Певзнер, В.О. Современные методы планирования путевых работ / В.О. Певзнер // Транспорт, наука, техника, управление. Сборник обзорной информации. – 1993. – №7. – С.17-29.
206. Громова, Т.И. Окупаемость ремонтов пути / Т.И. Громова, В.О. Певзнер //Путь и путевое хозяйство. – 2000. – №. 10. – С. 30-31.
207. Средняя рыночная цена выполнения работ по среднему ремонту пути протяженностью 1 км с корректировкой на индексы Минэкономразвития РФ 104,1 и 104 // Протокол № 7 заседания Правления РЭК КО от 05.02.2019.

208. Приложение № 1 к приказу ФАС России от 12.04. 2011г № 263 Форма 9ж-1 за 2018 г. (электрическая энергия).
209. Венцель, Е.С. Теория вероятностей: учебник / Е.С. Венцель. – 12-е изд., стер. – Москва : ЮСТИЦИЯ, 2018. – 658 с.
210. Стандарт С. Т. О. РЖД 08.005-2011 «Инновационная деятельность в ОАО «РЖД» //Порядок оценки эффективности инновационных проектов». Утвержден распоряжением ОАО «РЖД» от. – 2012. – №. 1267р.
211. Певзнер, В.О. Организация технического обслуживания пути на осбогрузонапряженных участках / В. О. Певзнер, А. И. Лисицын, Е. А. Сидорова [и др.] //Путь и путевое хозяйство. – 2021. – №. 9. – С. 18-21.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

4311 ⇒ 26 мая

*Жуковскому Д.П. отв.  
 Батомову Ю.И. исп.  
 Мисюкову Д.И.  
 Мисюкову Е.Н.  
 Тавилову В.А.  
 Иванова Б.И. - куратор.  
 Ермишину В.М. (по совм.)*

Старшему Вице-президенту  
 по инновационному  
 развитию – главному  
 инженеру ОАО «РЖД»  
 В.А. Гапановичу

*Впервые оцифровано.  
 Очень интересные выводы в т.ч.  
 и в поддержку цифровой модели пути.  
 Ср. рассмотреть  
 и методичку из центра  
 Росинформинформации.  
 совещание 24.06.16г*

По Вашему поручению докладываю:

1. Основное сопротивление движению поезда согласно ПТР 2013 определяется по формуле:

$$\omega_0'' = 5,2 + \frac{35,4 + 0,785V + 0,027V^2}{q_0}$$

При скорости 60 км/ч оно составит:

$$q_0=20 \text{ т/ось} - \omega_0'' = 14,185 \text{ Н/т}$$

$$q_0=23,5 \text{ т/ось} - \omega_0'' = 12,846 \text{ Н/т}$$

$$q_0=25 \text{ т/ось} - \omega_0'' = 12,388 \text{ Н/т}$$

2. Дополнительное сопротивление от неровности по данным В.Б. Каменского «Направления совершенствования системы ведения путевого хозяйства» составляет:

$$\omega_{\text{доп}} = 5i \text{ Н/т, где } i - \text{уклон неровности}$$

3. При анализе данных длинных неровностей на участке Забайкальской железной дороги было установлено, что они в основном имеют уклон около 1-1,5 %. При наличии таких неровностей расчет показывает, что если весь километр состоит из таких неровностей, то дополнительное сопротивление составит ≈ 30-40% основного.

4. Планируем провести проверку этих показателей в испытаниях 2016 года соединенных поездов и работах с Б.Д. Никифоровым по оценке

*не шло  
 для обновления  
 5-6 ноября  
 27.04.16*

Секретариат старшего вице-президента ОАО «РЖД» В.А. Гапановича	Вх. №	« 24 »	04	2016 г.
			ЕАСД	14/388



скольжения колес электровоза. Необходимо привязать записи тяги к пикетажу.

5. Расчеты показывают, что устранение длинных неровностей в рамках среднего ремонта может, за счет экономии энергии на тягу, окупиться:

5 лет при грузонапряженности 40 млн.т в год;

4 года при грузонапряженности 50 млн.т в год;

3 года при грузонапряженности 70 млн.т в год;

2 года при грузонапряженности 100 млн.т в год;

1,5 года при грузонапряженности 140 млн.т в год.

С Уважением,  
д.т.н., профессор



В.О. Певзнер

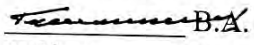
19.09.16

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

**Приложение 1.**

Утверждаю:

Старший вице-президент  
ОАО «РЖД»


 В.А. Гапанович  
« 04 » 05 2016 г.

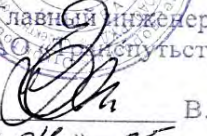
**Программа и методика испытаний  
по оценке влияния длинных неровностей продольного профиля на расходы  
электроэнергии при тяге поезда**

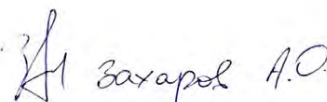

Продолжение титульного листа

Первый заместитель начальника  
Департамента экономической политики  
  
А. Тергулов  
« 2016 г.

Заместитель генерального  
директора АО «НИИЖТ»  
  
Ф. Косарев  
« 2016 г.

Директор ПКБ ЦТ – филиала  
ОАО «РЖД»  
  
Ю.И. Попов  
« 2016 г.

Главный инженер  
АО «Спутьстрой»  
  
В.М. Ермаков  
« 04 » 05 2016 г.

 Захаров А.О. 

## **1. Общие положения**

1.1. Анализ абсолютных деформаций пути на участках испытаний вагонов с повышенной осевой нагрузкой показал, что при недостаточной несущей способности грунтов основной площадки земляного полотна возникают неравномерные осадки пути на отрезках длиной до 100 м. Последующий анализ параметров продольного профиля на участках тяжеловесного движения также показал наличие подобных неровностей. В ряде научных работ отмечалось, что наличие профильных неровностей может вызвать увеличение сопротивления движению поезда, но приводимые зависимости и численные оценки требуют верификации для современных условий эксплуатации.

1.2. Целью настоящих испытаний является оценка влияния длинных неровностей продольного профиля на расход электроэнергии при тяге поездов.

## **2. Общие требования к условиям, обеспечению и проведению испытаний**

2.1. Испытания должны быть проведены на перегоне Бабаево – Тимошкино Октябрьской ж.д.

2.2. Для определения расхода электроэнергии должна быть использована Система информирования машиниста автономная с функцией электронного маршрута машиниста АСИМ-ЭММ, установленная на электровозе ВЛ80С №2048 приписки локомотивного эксплуатационного депо Лоста Северной дирекции тяги.

2.3. Испытания должны быть проведены в два этапа: первый – до проведения ремонтных работ, второй – после проведения ремонтных работ и послеосадочной выправки пути.

2.4. Перед проведением каждого этапа испытаний на данном перегоне должна быть произведена съемка параметров продольного профиля и плана с помощью измерительной тележки Amberg.

2.5. Для проведения каждого этапа испытаний должен быть сформирован грузовой поезд массой от 6000 до 6500 т с учетом массы вспомогательного локомотива, расположенного в хвосте поезда.

2.6. На время проведения каждого этапа испытаний расформирование опытного поезда не допускается.

2.7. Для ведения опытных поездов на участке испытаний должны быть выделены две локомотивных бригады, которые закрепляются за электровозом ВЛ80С №2048 на весь период испытаний.

2.8 Для получения устойчивых результатов должно быть выполнено не менее 10 поездок до и 10 поездок после проведения ремонта пути.

### 3. Методы испытаний

3.1 Параметры длинных неровностей продольного профиля определяются:

- Построением продольного профиля при непрерывном измерении в системе ВКС по типовой методике измерения;
- Восстановлением параметров длинных неровностей на базе промеров штатными путеизмерителями КВЛ-П с помощью передаточных функций.

Численная оценка параметров длинных неровностей осуществляется по абсолютным значениям их параметров и статистическим методом на базе интегрирования полученных результатов измерения.

3.2 С целью определения расхода электроэнергии проводятся опытные поездки между станциями Бабаево и Тимошкино. Учет расхода электроэнергии ведется при движении опытного поезда от ст. Бабаево до ст. Тимошкино. При наличии возможности перестановки электровоза ВЛ80С №2048 допускается осуществлять учет расхода электроэнергии при движении опытного поезда от ст. Тимошкино до ст. Бабаево.

3.3 Места начала замера расхода электроэнергии и его окончания должны быть определены на месте по согласованию с начальниками станций Бабаево и Тимошкино.

3.4 По результатам измерений параметров натуральных длинных неровностей, полученных различными методами, должны быть получены обобщённые статистические характеристики этих неровностей до и после проведения ремонтных работ с постановкой пути в проектное положение S1 и S2 и определения величин их различия  $\Delta S$  с оценкой статистической значимости различия средних значений по Стьюденту с вероятностью 0,95.

По результатам обработки данных измерений расхода энергии, должны быть получены обобщённые статистической характеристикой этих величин до и после производства капитальных работ с постановкой пути в проектное положение Э1 и Э2 и определения величины их различия  $\Delta Э$  с оценкой статистической значимости различия средних значений по Стьюденту с вероятностью 0,95.

Итоговым результатом должно быть получение отношения  $\Delta Э / \Delta S$  с оценкой статистической значимости полученного результата.

#### 4. Отчетность

По результатам всех измерений оформляются соответствующие протоколы. По результатам обработки результатов измерений формируется отчет с результатами измерений и предложениями по методике ранжирования участков тяжеловесного и особогрузонапряженного движения по степени наличия длинных натуральных неровности продольного профиля.

#### 5. Требования безопасности

5.1. Все работы по проведению испытаний должны проводиться под руководством лиц, отвечающих по кругу своих обязанностей за соблюдение требований производственной санитарии, правил и инструкций по охране труда и технике безопасности в промышленности и на железнодорожном транспорте.

5.2. Все участники перед началом проведения испытаний должны пройти инструктаж по охране труда.

5.3. Используемые во время подготовки и проведения испытаний оборудование, вспомогательные средства и инструмент должны обеспечивать безопасность обслуживания и использования, иметь соответствующие свидетельства о калибровке или поверке, удовлетворять требованиям ГОСТ 12.2.003.

5.4. При нахождении опытного тепловоза на путях ОАО «РЖД» безопасность обеспечивается выполнением требований ПТЭ и других нормативных документов, определяющих порядок работы и безопасность на железнодорожном транспорте.

5.5. К проведению испытаний допускаются локомотивные бригады, ознакомленные с конструкцией и особенностями управления электровоза серии ВЛ80С и имеющие заключение машиниста инструктора для работы на данном участке.

5.6. При проведении опытных поездок должны выполняться все требования ПТЭ и его приложений, местных инструкций, а также приказы и распоряжения ОАО «РЖД», дирекций, служб Октябрьской железной дороги, обеспечивающих безопасность движения поездов.

5.7. Обслуживание электровоза в процессе подготовки и проведения испытаний должно выполняться в соответствии с действующими нормативными документами по охране труда для обеспечения безопасности производства работ в период подготовки и проведения испытаний.

---

## ПРИЛОЖЕНИЕ В



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ПРОЕКТНО –  
КОНСТРУКТОРСКОЕ БЮРО  
ЛОКОМОТИВНОГО ХОЗЯЙСТВА**

пер. Ольховский, 205,  
г. Москва, 105066,  
Тел. (499) 262-73-62, факс (499) 262-12-10,  
E-mail: mail@pkbct.ru, www.pkbct.ru

«12» мая 2016 г. № ИСХ-2442/ПКБЦТ

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Первому заместителю начальника  
Департамента технической  
политики

О.А. Терегулову

Копия: Генеральному директору  
АО «ВНИИЖТ»

В.В. Степову

Уважаемый Олег Александрович!

В соответствии с поручениями старшего вице-президента ОАО «РЖД» Гапановича В.А. №731 от 21 апреля 2016 г. и №ВХ-14438 от 28 апреля 2016 г. сообщая о первом этапе испытаний по оценке влияния длинных неровностей продольного профиля на расход электроэнергии на тягу поездов.

Испытания были организованы в соответствии с телеграммой ОАО «РЖД» №ИСХ-7687 от 29 апреля 2016 г. на участке Бабаево – Тимошкино. В период с 23 ч. 51 мин. 4 мая по 13 ч. 42 мин. 5 мая 2016 г. проведено 10 опытных поездок с электровозом серии ВЛ80С №2048 и поездом массой 6076 т.

Расход электроэнергии составил:

- 1-я поездка – 240 кВт·ч;
- 2-я поездка – 320 кВт·ч;
- 3-я поездка – 340 кВт·ч;
- 4-я поездка – 342 кВт·ч;
- 5-я поездка – 342 кВт·ч;
- 6-я поездка – 348 кВт·ч;
- 7-я поездка – 352кВт·ч;
- 8-я поездка – 352 кВт·ч;
- 9-я поездка – 388 кВт·ч;
- 10-я поездка – 386 кВт·ч.

Суммарный расход составил 3410 кВт·ч, средний расход составил 341 кВт·ч. Расход фиксировался при помощи счетчика статической электрической энергии постоянного и переменного тока и делителя ДНЕ-25 системы информирования машиниста с функцией электронного маршрута машиниста АСИМ-ЭММ от 356 км пк 9 (выходной сигнал ст. Бабаево) до 362

км (после входного сигнала ст. Тимошкино). Класс точности указанного счетчика 0,5.

Первые 7 поездок были проведены машинистом локомотивного эксплуатационного депо Бабаево Смирновым, с 8-й по 10-ю поездку машинистом этого же депо Пачевым.

Разброс между первой и последними поездками обусловлен следующим. Первая опытная поездка начиналась с 6 пути ст. Бабаево, до выходного сигнала ст. Бабаево более 3 км. В связи с этим поезд развил скорость 25 км/ч, и для его движения требовалось меньше электроэнергии. При этом расход фиксировался от выходного сигнала ст. Бабаево.

Остальные поездки начинались с 100-го пути ст. Бабаево, который ограничен выходным сигналом. Повышенный расход в 9-й поездке связан с отключением напряжения в контактной сети при отправлении со ст. Бабаево и необходимостью повторного разгона поезда. Повышенный расход в 10-й поездке связан с интенсивным набором скорости машинистом.

Прошу учесть данную информацию при подготовке доклада старшему вице-президенту ОАО «РЖД» Гапановичу В.А.

Директор



Ю.И. Попов



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г



**ПРОТОКОЛ**  
**СОВЕЩАНИЯ У СТАРШЕГО ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТА ОАО «РЖД»**  
**В.А. ГАПАНОВИЧА**

от « 24 » июня 2016 г. № РД-325/ур

Присутствовали:

- |  |                    |
|--|--------------------|
| Первый заместитель начальника Управления<br>пути и сооружений Центральной дирекции<br>инфраструктуры         | – Калинин В.А.     |
| Первый заместитель начальника Управления<br>планирования и нормирования материально-<br>технических ресурсов | – Школьников Е.Н.  |
| Начальник отдела Департамента<br>технической политики  | – Шилкин В.П.      |
| Главный специалист Департамента<br>технической политики  | – Нирконэн В.Т.    |
| Заместитель директора Проектно-<br>конструкторского бюро локомотивного<br>хозяйства                          | – Слонков Г.В.     |
| Начальник отдела Проектно-<br>конструкторского бюро локомотивного<br>хозяйства                               | – Захаров А.О.     |
| Начальник отдела Дирекции тяги   | – Рудашевский А.Л. |
| Главный научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»  | – Певзнер В.О.     |
| Главный инженер АО «Транспутьстрой»  | – Ермаков В.М.     |

**О влиянии длинных неровностей продольного профиля пути на расход  
электроэнергии при тяге поездов**

(Слонков, Певзнер, Ермаков, Школьников, Рудашевский, Гапанович)

1. Принять к сведению информацию заместителя директора Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства Слонкова Г.В. что по результатам опытных поездок отмечено снижение на 2,45% суммарного расхода электроэнергии на тягу поездов после проведения реконструкции пути участка Бабаево – Тимошкино Октябрьской железной дороги.

2. Принять к сведению информацию главного научного сотрудника АО «ВНИИЖТ» Певзнера В.О. о принятой схеме оценки изменения расхода

энергии на тягу поездов в зависимости от различных факторов и что проведенная выправка пути с помощью высокоточной координатной системы способствовала уменьшению пиковых значений длинных неровностей в диапазоне от 30 до 150 м на 50 %, почти двукратному снижению статистических показателей неровностей пути после проведения реконструкции пути участка Бабаево – Тимошкино Октябрьской железной дороги.

3. Отметить, что методика проведения исследований по оценке влияния длинных неровностей на расход энергии работоспособна и может быть применена для более широкого круга исследований. Продолжить начатые в 90-х годах исследования по оценке влияния статистических показателей неровностей пути на расход энергии на современных конструкциях пути с поездами стандартных весовых норм.

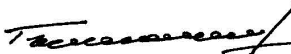
4. Главному научному сотруднику АО «ВНИИЖТ» Певзнеру В.О. (по согласованию) доработать и до 24 июля 2016 г. представить для рассмотрения новую схему оценки расхода энергии на тягу поездов с учетом полного спектра факторов, влияющих на сопротивление движению подвижного состава, в том числе материалов верхнего строения пути, уложенных в путь.

5. Директору Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства Попову Ю.И., главному инженеру Северной железной дороги Кошубарову А.Н., генеральному директору АО «ВНИИЖТ» Степову В.В. (по согласованию) до 15 июля 2016 г. подготовить проект программы проведения второго цикла испытаний по определению влияния различных факторов, в том числе длинных неровностей пути, на расход энергии при тяге поездов на фронте ремонта пути перегона Туфаново - Бушуиха Северной железной дороги, проводимого с применением высокоточной координатной системы.

6. Начальнику Управления диагностики и мониторинга инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры Зайцеву Н.И., генеральному директору НПЦ «Инфотранс» Михалкину И.К. (по согласованию) до 6 июля 2016 г. подготовить предложения по внедрению типового программного обеспечения для определения параметров длинных неровностей пути на путеизмерительных вагонах.

7. Контроль за исполнением настоящего протокола возложить на заместителя начальника Департамента технической политики Чернина М.А.

Старший вице-президент  
ОАО «РЖД»

 В.А. Гапанович

ЕАСД ОАО "РЖД"

Распечатано: 29.06.2016, 13:13:44, Углянкин Д.М., 4-02-01

**Вид документа:** Протокол совещания у ЦЗс Гапановича В.А.**Название:**

О влиянии длинных неровностей продольного профиля пути на расход электроэнергии при тяге поездов

**Тех. номер РК:** 27959346**Виза редактора:** нет**Номер, дата документа:** О влиянии длинных неровностей**ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЯ****Маршрут:**

Подразделение	Ф.И.О. согласующего	Дата согласования	Согласование	Дата замечания	Текст замечания	Ф.И.О. доверенного лица в ЕАСД
ПКБ ЦТ	Попов Юрий Иванович	28.06.2016	Согласовано без замечаний			Садян Армина Тиграновна
ЦДИ	Зайцев Николай Иванович	29.06.2016	Согласовано без замечаний			Зайцев Николай Иванович

ЦТЕХЗ



М.А. Чернин  
«\_\_» июня 2016 г.

ЦДИДМ

*совещание в ЕАЭС*

Н.И. Зайцев  
«29» июня 2016 г.

ПКБ ЦГ

*совещание в ЕАЭС*

Ю.И. Попов  
«28» июня 2016 г.

ЦЗС-Н

А.П.Рыков  
«\_\_» июня 2016 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ОАО «РЖД»  
ТЕЛЕГРАММА

НЗ-1, НГ, Т, ТР, Д, ДИ СЕВ, ЦУТР СП  
ЦД, ЦТЕХ, ЦТ, ЦДИ, ПКБ ЦТ  
ОАО «АВП-Технология» (по согласованию)  
ООО «ТМХ-Сервис» (по согласованию)  
АО «Транспутьстрой» (по согласованию)

В целях оценки влияния длинных неровностей продольного профиля на расход электроэнергии при тяге поездов ОАО «РЖД» обязывает:

1. НЗ-1, НЗ-РБ, НГ, Т, Д, ДИ, СЕВ, ЦУТР СП:
  - а) организовать в период с 13.07.2016 по 15.07.2016 на перегоне Бушуиха – Туфаново СЕВ испытания в нечетном направлении с грузовым поездом массой 6000 – 6500 т. ведомого электровозом ВЛ80С № 2048;
  - б) обеспечить участие в испытаниях ответственных руководителей.
2. Руководителем опытных поездок с правом назначения веса, длины поезда, условий пропуска с правом пользования всеми видами связи в системе ОАО «РЖД» назначить начальника технического отдела ПКБ ЦТ Захарова А.О.
3. ЦТ, Т СЕВ обеспечить своевременную подвязку локомотивных бригад приписки ТЧЭ-11 Лоста.
4. Т, ТР, СЕВ, ООО «ТМХ-Сервис» (по согласованию) обеспечить:
  - а) подготовку и передислокацию сроком до 20-00 12.07.2016 на ст. Лоста СЕВ для участия в испытаниях двух электровозов серии ВЛ80С, один из них ВЛ80С № 2048.
5. Схема формирования опытных поездов определяется программой и методикой.
6. ЦП, П СЕВ, АО «Транспутьстрой» (по согласованию) обеспечить съемку параметров продольного профиля и плана с помощью измерительной тележки Amberg и нивелировку пути.
7. ЦД, Д СЕВ обеспечить:
  - 7.1. формирование одного опытного поезда, состоящего из полувагонов, на все опытные поездки;
  - 7.2. разработку графика движения 10 опытных поездок с учетом сокращенного опробования тормозов по рзд. Туфаново.
8. ЦВ, ДИ, В СЕВ обеспечить техническое обслуживание опытного поезда.
9. Контроль за ходом подготовки и проведения испытаний возложить на НГ СЕВ.

ЦЗ-С

*Гаспарович* / В.А. Гапанович

«01.» 07. 2016 г.

№ Иск-11606

ОАО «РЖД»  
ТЕЛЕГРАММА

НЗ-1, НГ, Т, ТР, Д, ДИ СЕВ, ЦУТР СП  
ЦД, ЦТЕХ, ЦГ, ЦДИ, ПКБ ЦТ  
ООО «ТМХ-Сервис» (по согласованию)  
АО «ВНИИЖТ» (по согласованию)  
ОАО «АВП-Технология» (по согласованию),  
факс 8-(495)-710-77-83  
АО «Транспутьстрой» (по согласованию),  
факс 8-(495)-739-41-11

В целях оценки влияния длинных неровностей продольного профиля на расход электроэнергии при тяге поездов ОАО «РЖД» обязывает:

1. НЗ-1, НЗ-РБ, НГ, Т, Д, ДИ, СЕВ, ЦУТР СП организовать в период с 13.09.2016 по 15.09.2016 на перегоне Бушуиха – Туфаново СЕВ испытания в нечетном направлении с грузовым поездом ведомого электровозом ВЛ80С № 2048.
2. Руководителем опытных поездок с правом назначения веса, длины поезда, условий пропуска с правом пользования всеми видами связи в системе ОАО «РЖД» назначить начальника технического отдела ПКБ ЦТ Захарова А.О.
3. ЦТ, Т СЕВ обеспечить вождение опытных поездов машинистами ТЧЭ-11 Лоста. Пикулиным С.В. и Титовым В.В.
4. Т, ТР, СЕВ, ООО «ТМХ-Сервис» (по согласованию) обеспечить подготовку и передислокацию сроком до 03-00 13.09.2016 на ст. Буй СЕВ для участия в испытаниях двух электровозов серии ВЛ80С, один из них ВЛ80С № 2048.
5. Схема формирования опытных поездов определяется программой и методикой.
6. ЦП, П СЕВ, АО «Транспутьстрой» (по согласованию), АО «ВНИИЖТ» (по согласованию) обеспечить съемку параметров продольного профиля и плана с помощью измерительной тележки Amberg и нивелировку пути.
7. ЦД, Д СЕВ обеспечить:
  - 7.1. формирование одного опытного поезда массой 6260-6270 т, 268 осей на все время опытных поездок;
  - 7.2. разработку графика движения 10 опытных поездок с учетом сокращенного опробования тормозов по рзд. Туфаново.
8. ЦВ, ДИ, В СЕВ обеспечить техническое обслуживание опытного поезда.
9. Контроль за ходом подготовки и проведения испытаний возложить на НГ СЕВ.

ЦЗ-С

В.А. Гапанович

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.  
№ \_\_\_\_\_



Электронная подпись. Подписал: Гапанович В.А.  
№ИСХ-15874 от 01.09.2016

Козлов

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж



**ПРОТОКОЛ  
СОВЕЩАНИЯ У СТАРШЕГО ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТА ОАО «РЖД»  
В.А.ГАПАНОВИЧА**

от « 4 » октября 2016 г. № \_\_\_\_\_

Присутствовали:

начальник отдела Департамента технической политики	– Трудов О.Г.
главный инженер Управления пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры	– Лисицын А.И.
начальник Управления пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры	– Янович О.А.
первый заместитель начальника Управления диагностики и мониторинга инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры	– Рословец А.А.
начальник отдела Управления планирования и нормирования материально-технических ресурсов	– Фролов В.Н.
заместитель главного инженера Дирекции тяги	– Никольский К.Ю.
начальник отдела Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства	– Захаров А.О.
заведующий отделением АО «ВНИИЖТ»	– Савин А.В.
главный научный сотрудник АО «ВНИИЖТ»	– Певзнер В.О.

Об опытных поездках на Северной железной дороге по определению  
энергоэффективности от устранения длинных неровностей пути

(Певзнер, Захаров, Трудов, Гапанович)

1. Принять доклад главного научного сотрудника АО «ВНИИЖТ» Певзнера В.О. о полученных результатах проведения опытных поездок на полигоне Северной железной дороги – филиала ОАО «РЖД» по определению энергоэффективности от устранения длинных неровностей пути.

2. Принять доклад начальника отдела Проектно-конструкторского бюро локомотивного хозяйства Захарова А.О. о проведении опытных поездок на полигоне Северной железной дороги – филиала ОАО «РЖД» по определению энергоэффективности от устранения длинных неровностей пути.

3. Принять доклад начальника отдела Департамента технической политики Трудова О.Г. о ходе выполнения работы плана научно-

Электронная подпись. Подписал: Гапанович В.А.  
№ВГ-491/пр от 04.10.2016

технического развития ОАО «РЖД» «Определение потерь электроэнергии при организации движения грузовых поездов от наличия неровностей в пути» (шифр 5.231).

4. Отметить необходимость проведения процедур конкурентной закупки при выборе исполнителя по работе плана научно-технического развития ОАО «РЖД» «Определение потерь электроэнергии при организации движения грузовых поездов от наличия неровностей в пути» (шифр 5.231).

5. Главному инженеру Дирекции тяги Чикиркину О.В. провести анализ всех факторов, оказывающих влияние на сопротивление движению поезда и расход электроэнергии на тягу поездов.

6. Главному инженеру Управления пути и сооружений Центральной дирекции инфраструктуры Лисицыну А.И. осуществить ознакомительную поездку для изучения опыта содержания пути для тяжеловесного движения в Европе.

7. Контроль исполнения решений протокола возложить на начальника Департамента технической политики Назарова А.С.

Старший вице-президент  
ОАО «РЖД»

В.А.Гапанович

Исп. Трудов О.Г., ЦТЕХ,  
(499) 262 74-17

Электронная подпись. Подписал: Гапанович В.А.  
№ВГ-491/пр от 04.10.2016