

ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



На правах рукописи

Выплавень Владимир Сергеевич

**ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДИНАМИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА И
ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ СРЕДСТВАМИ
ВИБРОДИАГНОСТИКИ И ТЕНЗОМЕТРИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.2.8 – Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий,
веществ и природной среды

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «**Сибирский государственный университет путей сообщения**» (СГУПС).

Научный руководитель: **Бехер Сергей Алексеевич**,
доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой
«Электротехника, диагностика и сертификация»
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Сибирский государственный университет путей
сообщения»

Официальные
оппоненты: **Скрипняк Владимир Альбертович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий кафедрой механики деформируемого
твердого тела Национального исследовательского
Томского государственного университета

Федоров Алексей Владимирович,
доктор технических наук, профессор факультета
системы управления и робототехники
Национального исследовательского университета
ИТМО

Защита диссертации состоится 03 июня 2025 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.13 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте dis.tpu.ru при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «__» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'E. A. Shevelova'.

Е. А. Шевелева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Один из ключевых аспектов безопасности движения на железнодорожном транспорте связан с динамикой взаимодействия ходовых частей вагонов с элементами верхнего строения пути. Дефекты подвижного состава увеличивают динамические силы, которые, с одной стороны, сокращают срок службы деталей и узлов вагонов, а с другой стороны, оказывают негативное влияние на техническое состояние пути.

Балластная призма, как элемент верхнего строения пути, обеспечивает проектное положение рельсовой колеи в плане и в профиле, жесткость подрельсового основания. Все эти параметры в значительной степени определяют динамику движения вагона и уровень динамических сил, воздействующих на подвижной состав и верхнее строение пути. При многократных динамических нагрузках на путь, в том числе и сверхнормативных, вызванных дефектами поверхности катания, оценка устойчивости балластного слоя имеет первостепенное значение.

Нарушения положения пути относительно нормативного приводят к ограничениям скорости движения, уменьшают пропускную способность, требуют значительных финансовых вложений для их устранения и представляют собой угрозу безопасности движения. Таким образом, техническое состояние балластной призмы напрямую влияет на устойчивость железнодорожного пути под действием эксплуатационных нагрузок, от которого, в свою очередь, зависит его межремонтный ресурс.

В контексте решения задачи повышения ресурса железнодорожного пути и подвижного состава особую актуальность приобретает проблема разработки и внедрения согласованных систем мониторинга подвижного состава и верхнего строения пути, критерии предельного состояния которых основываются на уровне допустимого динамического воздействия.

Степень разработанности темы исследования. Последние достижения в области обработки цифровых диагностических сигналов неразрушающего контроля тензометрическим методом и исследования дефектов поверхности катания колес подвижного состава подробно изложены в работах российских и зарубежных авторов: Бороненко Ю. П., Исаков А. Л., Ковалев Ю. Л., Краснов О. Г., Муравьев В. В., Степанова Л. Н., Парахненко И. Л., Tomasz Nowakowski, Pawel Komorski, Qixin He, Gabriel Krummenacher, Mohammadreza Mohammadi. Методики контроля упругих характеристик и

степени уплотнения железнодорожного балласта с использованием вибродиагностики представлены в работах авторов: Лапшин В. Л., Сазонова С. А., Фокин С. В., Sönke Kraft, Carlton L. Ho, Pavel Kulich, Mykola Sysyn, Andrea Bergamini, в которых подробно рассмотрено влияние дефектов поверхности катания железнодорожных колес на верхнее строение пути.

Большинство современных работ посвящено моделированию движения вагона, взаимодействию дефектного колеса с рельсом. На основе построенных моделей подробно исследованы амплитудные и спектральные методы обработки диагностических сигналов, возможности современных методов машинного обучения для обнаружения дефектов и оценки параметров динамического воздействия на путь дефектных и бездефектных колес. Однако для достоверной оценки применимости и эффективности предлагаемых методов натурных экспериментов, особенно в условиях повторяемости, очевидно, недостаточно.

Контроль параметров балластного основания железнодорожного пути реализуется различными способами: метод замещения объема, радиометрический метод, метод на основе математической модели и фотографии поверхности балласта, метод динамического штампа. Все методы являются косвенными и не позволяют оценить несущую способность контролируемого основания в условиях динамического воздействия поездной нагрузкой. Применение вибродиагностики при динамическом воздействии на балластное основание является новым перспективным направлением развития систем контроля, которое позволит оценить параметры объекта в условиях близких к воздействию динамической поездной нагрузки.

Идея работы заключается в создании комплексной методики контроля балластной призмы и ходовых частей вагонов, основанной на оценке параметров балласта при динамическом воздействии с использованием виброметрии и контроле динамических сил от подвижного состава, в том числе в режиме мониторинга, методами тензометрии. Комплексная диагностика направлена на повышение ресурса верхнего строения пути и ходовых частей вагонов за счет обеспечения возможности управления динамикой их взаимодействия.

Цель исследования – разработка методического, алгоритмического и программного обеспечения средств комплексной диагностики поверхности катания колесных пар вагонов в движении и балластной призмы верхнего строения пути с использованием тензометрии и виброметрии, направленная на

повышение достоверности и информативности контроля, увеличение их эксплуатационного ресурса.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие **задачи**:

1) разработать алгоритмы и программное обеспечение обработки сигналов тензометрической системы для мониторинга динамических сил, действующих на верхнее строение пути от движущегося подвижного состава;

2) автоматизировать тензометрический контроль ходовых частей вагонов в движении для повышения надежности обнаружения дефектов и обеспечения достоверности оценки их параметров;

3) разработать математическую модель установки контроля механических характеристик балластного слоя, на основе которой определить информативные параметры диагностических сигналов акселерометра и оптимальные параметры установки;

4) разработать методическое и алгоритмическое обеспечение контроля балласта методом динамического нагружения на основе численного решения обратной задачи и результатов мониторинга динамических сил от подвижного состава.

Объект исследования – тензометрический и вибродиагностический методы контроля.

Предмет исследования – алгоритмы обработки диагностических сигналов тензометрических и виброметрических систем при контроле подвижного состава и балластной призмы верхнего строения пути.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) экспериментально обоснована возможность раздельного контроля динамических сил реакций шпалы и колеса с дефектом поверхности катания на основе частотно-временного преобразования сигналов тензометрической системы;

2) установлены параметры статистических распределений вероятности обнаружения дефектов колес в движении на основе экспериментальных исследований в условиях повторяемости;

3) предложена математическая модель вибродиагностической установки контроля балласта методом динамического нагружения, на основе которой разработаны алгоритмы и программное обеспечение для решения задачи оптимизации характеристик установки и выбора информативных параметров диагностических сигналов;

4) разработан метод определения механических характеристик балластного основания железнодорожного пути при динамическом нагружении с использованием вибродиагностики и на основе численного решения обратной задачи в условиях нелинейной упругости, неупругих деформаций и демпфирования.

Теоретическая значимость работы. Разработанные алгоритмы обработки тензометрических и вибродиагностических сигналов расширяют возможности контроля уровня динамических сил, передаваемых от подвижного состава на верхнее строение пути, в условиях влияния мешающих факторов.

Практическая значимость работы. Разработан способ тензометрического контроля динамических нагрузок от подвижного состава, который позволяет обнаружить дефекты поверхности катания колес и оценить их влияние на верхнее строение пути. Способ реализован в программном обеспечении мониторинга динамического воздействия подвижного состава на верхнее строение пути (свидетельство № 2023682160 от 23.10.2023 г.). Результаты исследования и разработанное программное обеспечение применялись при сравнительных испытаниях, организованных АО «ЕВРАЗ-ЗСМК» и ОАО «РЖД», рельсов разных категорий качества в условиях динамического воздействия поездной нагрузкой в кривых малого радиуса.

На основе алгоритмов обработки виброметрических сигналов акселерометра разработано устройство и программное обеспечение (свидетельство № 2023610175 от 09.01.2023 г.), которые использовались компанией ООО «НЭКС» для вибродиагностики опасных промышленных объектов нефтеперерабатывающих предприятий. Разработан способ измерения несущей способности насыпных грунтов (патент № RU 2801164 C1), который позволяет измерить динамический модуль деформации балластного слоя железнодорожного пути.

Методология и методы исследования. В работе использовались экспериментальные и теоретические методы исследования, тензометрический, виброметрический методы контроля. Диагностические сигналы обрабатывались методами частотно-временного анализа, математической статистики и регрессионного анализа. Для решения обратной задачи использовались методы численного интегрирования, аналитический и численный методы решения дифференциальных уравнений, методы многопараметрической оптимизации.

Положения, выносимые на защиту.

1) Метод разделения информативных составляющих сигналов тензометрической диагностической системы контроля ходовых частей вагонов в движении, основанный на разложении сигналов в частотно-временной области.

2) Метод мониторинга динамических сил, воздействующих на верхнее строение пути, основанный на экспериментально установленных закономерностях статистических распределений сил от размера дефекта.

3) Физическая и математическая модель динамического нагружения и реализующие ее алгоритмы, программное обеспечение оптимизации характеристик динамического нагружения и выбора информативных параметров сигналов.

4) Алгоритмы и программное обеспечение контроля модуля деформации балластной призмы, основанные на применении численного решения обратной задачи, позволяющие уменьшить влияние мешающих факторов, связанных с неконтролируемыми величинами.

Достоверность результатов работы обеспечивается применением современных и метрологически обеспеченных измерительных приборов, методов обработки цифровых сигналов, методов численного моделирования, методов многомерной оптимизации, методов статистической обработки экспериментальных данных, корреляционного и регрессионного анализа. Достоверность подтверждается совпадением теоретических и экспериментальных данных, непротиворечивостью и воспроизводимостью результатов,

Апробация результатов. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «РТТ-2021» (г. Екатеринбург, УрГУПС, 24-25 ноября, 2021 г.); молодежной секции XXXIII Уральской конференции ФМНК (Янусовские чтения), (19-20 апреля 2022 г.); XII международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, СГУПС, 21-22 сентября 2022 г.); V всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте», (г. Омск, ОмГУПС, 27-28 октября 2022 г.); XXIII всероссийской научно-технической конференции по неразрушающему контролю и технической диагностики (23-25 октября, 2023, г. Москва); молодежной научно-технической конференции в рамках XI Международного промышленного Форума

«Территория NDT 2024» в области технологий и средств неразрушающего контроля и технической диагностики (15-17 апреля, 2024, г. Москва).

Личный вклад автора. Постановка целей и задач теоретических и экспериментальных исследований, формулировка положений, выносимых на защиту, выводов и рекомендаций. Автором лично разработано программное обеспечение и алгоритмы обработки цифровых сигналов тензометрического и виброметрического контроля, математическая модель установки динамического штампа и сформулирована оптимизационная проблема для решения обратной задачи. При участии автора проведены испытания системы тензометрического контроля на кольцевом участке пути АО «ВНИИЖТ» и системы тензометрического контроля совместно с установкой динамического штампа на действующем участке пути, проведен статистический и корреляционный анализ результатов испытаний.

Полнота изложения материалов диссертации в опубликованных работах. По результатам работы опубликованы 15 статей в научных изданиях, в том числе 2 статьи в изданиях, индексируемых в SCOPUS и WoS, 2 статьи в издании из перечня ВАК, получено 2 патента РФ на изобретения и 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который содержит 138 наименований, в том числе 61 на английском языке, 2 приложений. Диссертация изложена на 128 страницах, содержит 65 рисунков и 3 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обоснована необходимость использования систем обнаружения дефектов поверхности катания колес и оценки динамической нагрузки от подвижного состава на верхнее строение пути, приводится анализ современных методов и средств для их реализации. Описаны существующие подходы к обработке цифровых диагностических сигналов неразрушающего контроля. Проанализированы исследования, посвященные изучению влияния расположения датчиков на точность измерений и достоверность контроля, а также разработке алгоритмов разложения диагностических сигналов на информативные составляющие.

Во второй главе представлены результаты разработки способов и алгоритмов обнаружения дефектов поверхности катания колес в движении с использованием тензометрии. Исследования проводились на кольцевом

испытательном железнодорожном пути АО «ВНИИЖТ». Спроектирован измерительный участок контроля (рис. 1) протяженностью 3,5 м, что соответствует развертке колеса железнодорожного вагона диаметром 1050 мм. В качестве первичных преобразователей использовались восемь пар проволоочных тензодатчиков типа ПКС с номинальным сопротивлением 200 Ом и базой 22 мм. Каждая пара тензодатчиков наклеивалась на расстоянии 0,5 м друг от друга на высоте средней линии шейки рельса (83 мм от подошвы) над центрами шпал. При обнаружении специализированным ультразвуковым датчиком приближающегося поезда включалась регистрация и запись сигналов с тензодатчиков тензометрическим измерительным комплексом «Динамика-3».

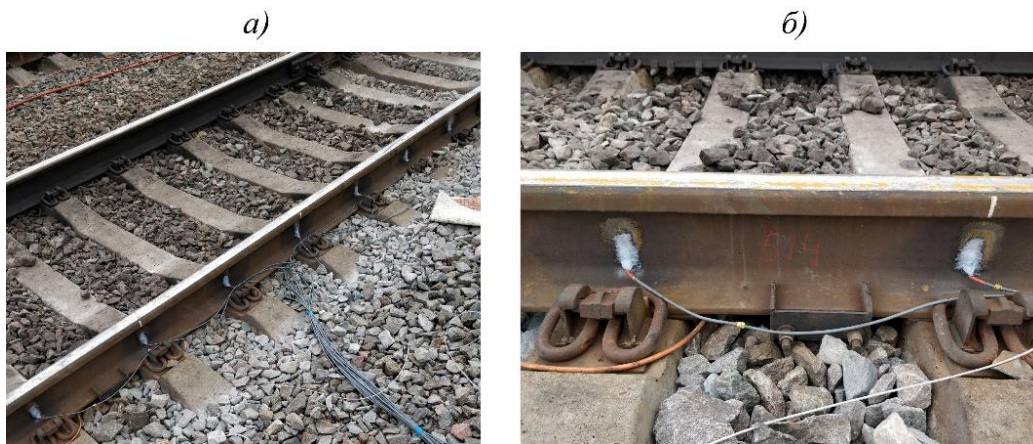


Рисунок 1 – Фотографии участка тензометрического контроля на испытательном пути АО «ВНИИЖТ» (а) и расположения двух пар тензодатчиков (б)

В зарегистрированных тензометрических сигналах методом Шлюмпфа выделялись информативные составляющие деформаций, соответствующие вертикальному сжатию шейки рельса:

$$s = \frac{\varepsilon_{in} + \varepsilon_{out}}{2}, \quad (1)$$

где ε_{in} , ε_{out} – относительные деформации тензодатчиков на внутренней и наружной сторонах шейки рельса.

Сигналы, вызванные проездом колеса над парой тензодатчиков, представляют собой однократный импульс, ширина которого зависит от скорости движения поезда, а амплитуда – от вертикальной силы. Дефекты поверхности катания проявляются в форе импульсов меньшей амплитуды, вызванные ударным воздействием дефектного участка колеса (см. рис. 2, б).

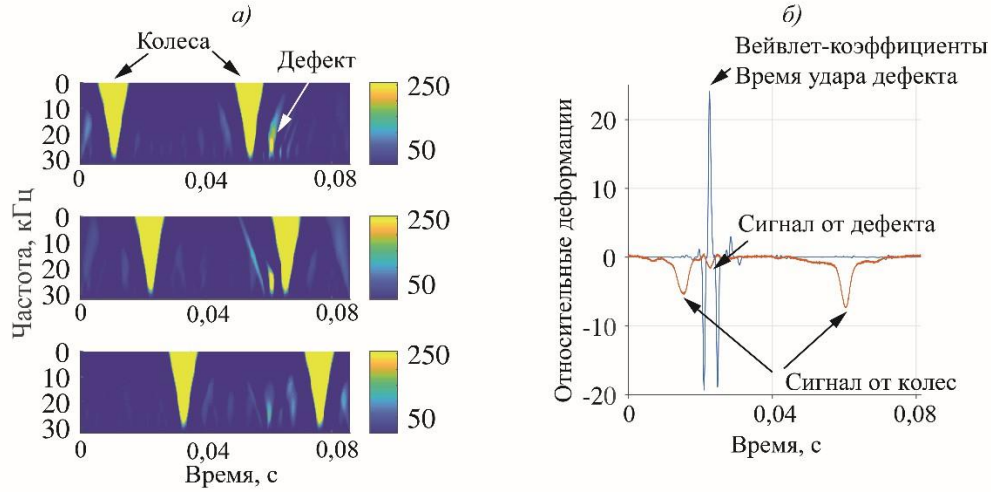


Рисунок 2 – Скалограммы вейвлет-преобразования сигнала вертикальных деформаций, полученных с соседних пар тензодатчиков при проезде тележки с дефектным колесом (а), и сигнал вертикальных деформаций от колеса с дефектом с поэлементным произведением вейвлет-коэффициентов разложения на масштабе 25 кГц (б)

Определение характеристик подвижного состава и оценка его динамического воздействия на путь основаны на разложении тензометрического сигнала на информативные составляющие методом вейвлет-преобразования:

$$C_b^a = \sum_{j=1}^N s_j \cdot \varphi_b^a, \quad (2)$$

где N – длина исходного сигнала; s_j – исходный дискретный сигнал относительных деформаций, ед. АЦП; φ_b^a – функция материнского вейвлета, сдвинутая на значение коэффициента b и масштабированная на значение коэффициента a .

Составляющие тензометрического сигнала, связанные с воздействием колеса и дефекта, коррелируют с функцией косинуса с коэффициентом корреляции 0,99. Поэтому в качестве материнского вейвлета выбрана, несмотря на простоту, тригонометрическая функция вида:

$$\varphi = \frac{2 \cdot a}{T \cdot f_{ADC}} \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot x \cdot a}{T \cdot f_{ADC}} + b\right), \quad (3)$$

где T – период вейвлета, с; f_{ADC} – частота дискретизации АЦП, Гц; a , b – коэффициенты масштабирования и сдвига вейвлета.

Экспериментально установлено, что при разложении тензометрического сигнала с материнским вейвлетом (3) на скалограмме (рис. 2, а) составляющие, связанные с проездом колеса на скорости (40-50) км/ч над парой тензодатчиков, соответствуют области частот от 0,01 до 30 кГц. При наличии дефектов на

поверхности катания колеса на скалограмме появляются локальные максимумы в диапазоне (20 – 30) кГц.

Для определения момента прохода колеса над парой тензодатчиков используется вейвлет-преобразование с частотой 25 Гц, так как на данном уровне масштабирования отсутствует влияние дефектов поверхности катания. Момент проезда колеса соответствует пиковым значениям вейвлет коэффициентов. Компоненты сигнала, связанные с дефектами, находятся на тех же уровнях масштаба, что и компоненты от колеса. При ударном воздействии дефектного колеса на рельс, сигнал от дефекта регистрируется несколькими соседними парами тензодатчиков. Поэтому для повышения достоверности определения момента удара дефектных колес вейвлет-коэффициенты разложения сигналов с трех пар тензодатчиков на частоте 25 кГц поэлементно перемножаются (см. рис. 2, б).

Оценка вертикальной динамической нагрузки от колес подвижного состава и дефектов на рельс проводится с помощью разработанного алгоритма исключения низкочастотной составляющей, связанной с силами реакции шпал. Для этого сигнал в области вне пика аппроксимировался многочленом четвертой степени (рис. 3). Сила от бездефектного колеса на рельс определялась по максимальным значениям деформаций в области пика от колеса без учета деформаций, вызванных реакцией шпалы:

$$F_w = k_Q \cdot (\varepsilon_{max} - \varepsilon_s), \quad (4)$$

где ε_{max} – максимальное значение деформаций, вызванное воздействием колеса, 10^{-6} ; ε_s – значение деформаций, вызванных силой реакции шпалы, 10^{-6} ; k_Q – коэффициент пропорциональности, определенный на этапе калибровки подвижным составом с известной осевой нагрузкой, кН· 10^6 .

Приращение динамической нагрузки, вызванное воздействием дефектного колеса, описывается как отношение деформации ε_d к деформациям от бездефектного колеса ε_0 , которая вычисляется интерполяцией сигнала вертикальных деформаций в области дефекта полиномом второй степени:

$$F_d = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} \cdot F_w. \quad (5)$$

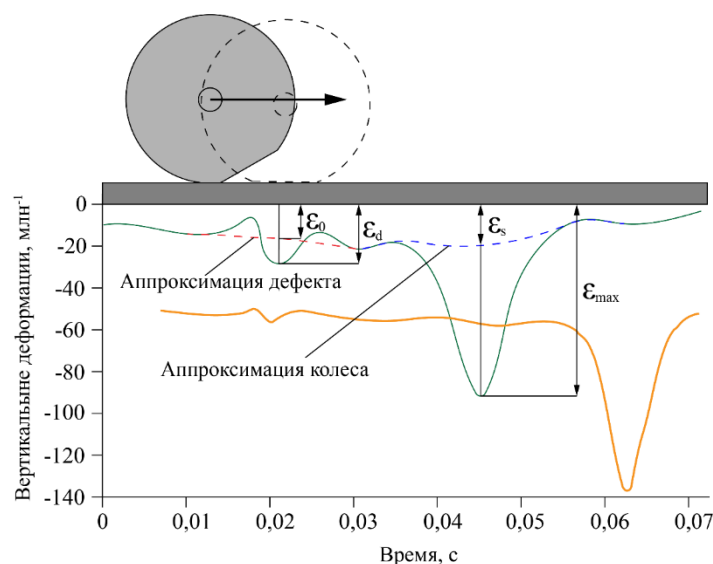


Рисунок 3 – Схема оценки динамического воздействия колеса и дефекта на рельс

На основе частотно-временного разложения и интерполяции тензометрического сигнала на информативные составляющие разработан алгоритм оценки динамического воздействия подвижного состава на путь (рис. 4, а). С применением алгоритма проведен тензометрический контроль в условиях повторяемости (см. рис. 4, б) с 70 повторными проездами поезда с 280 колесными парами по кольцевому маршруту на скорости (43 – 66) км/ч.

В результате обработки сигналов от колес с дефектами поверхности катания зарегистрированы значения сил в диапазоне от 180 до 604 кН, что превышает допустимую статическую нагрузку в (1,5-5) раз. Шесть колес с дефектами поверхности катания протяженностью от 50 до 80 мм забракованы тензометрическим методом в (83 – 96) % проездов испытательного поезда (рис. 4, б). Для дефектов длиной менее 30 мм частота обнаружения не превышала 1,3 %. Условный размер дефекта, выявляемого с вероятностью 50 %, составил 40 мм. В испытаниях тензометрическим методом зарегистрированы 3 дефекта, которые не были обнаружены визуально из-за ограничения доступа к поверхности катания под тормозными колодками и в месте контакта с рельсом.

Экспериментально установленные вероятности обнаружения дефектов, обусловлены случайностью их формы и места расположения на поверхности катания, характером движения колеса по рельсу и являются параметрами метода контроля, а не аппаратуры. При статической нагрузке от бездефектного колеса 122 кН и площади шпалы 0,6 м² статическое давление на балласт составит 203 кПа. В случае проезда колес с дефектами поверхности катания давление на балласт варьируется в пределах от 300 кПа до 1 МПа в зависимости от характера

и размеров дефекта. При этом устойчивость железнодорожного пути определяется не только способностью воспринимать регулярную нормативную нагрузку на путь, но и перегрузку, вызванную дефектами поверхности катания.

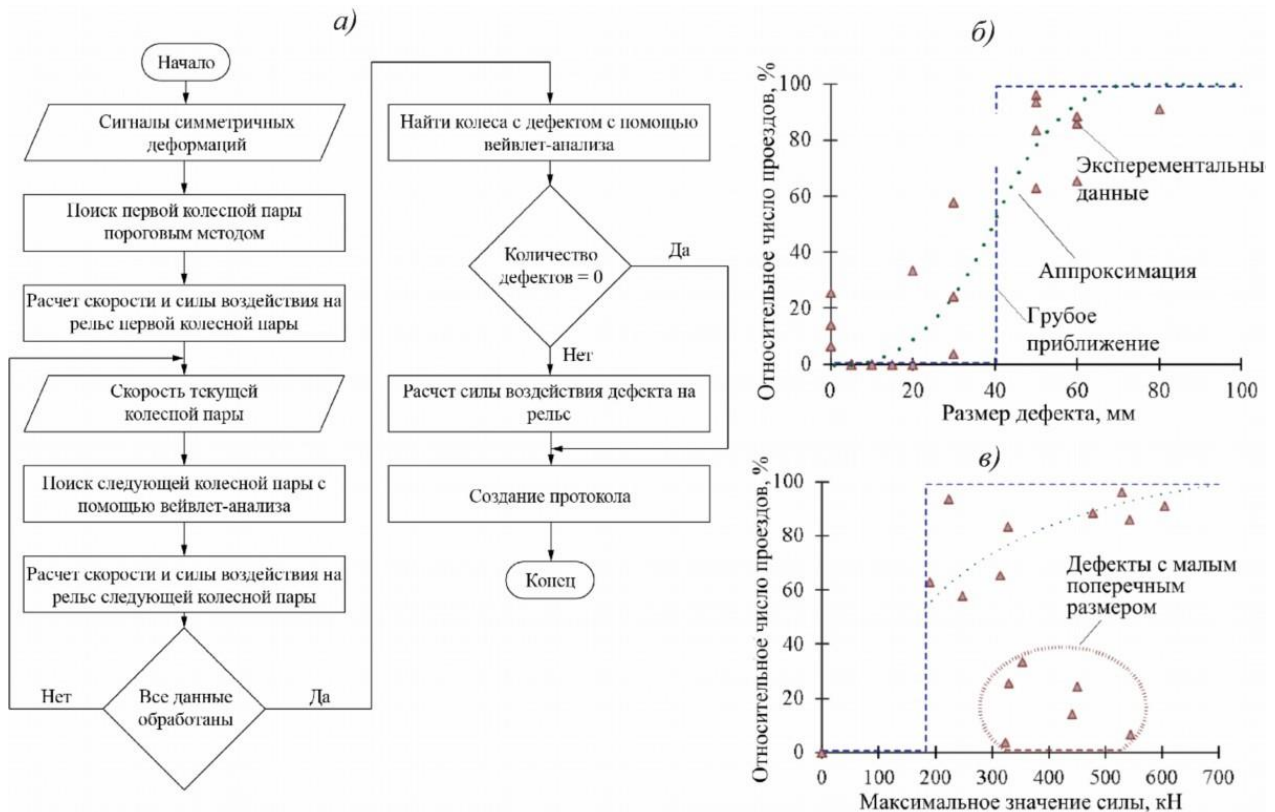


Рисунок 4 – Блок схема алгоритма обработки сигналов симметричных деформаций (а), зависимость относительного количества проездов с обнаруженными дефектами от их длины (б) и максимальной силы воздействия (в)

В третьей главе представлена физическая и математическая модель установки динамического контроля основания рельсового пути – балласта (рис. 5, а). Диапазоны возможных значений параметров экспериментальной установки составляют (см. рис. 5, б): $m_1 = 2 \dots 10$ кг, $m_2 = 17$ кг, $k_1 = 5 \dots 50$ МН/м, $k_2 = 10 \dots 70$ МН/м, $h = 0,2 \dots 1,2$ м. Ускорение нагрузочной плиты измеряется акселерометром с чувствительностью 57 мВ/г и рабочим диапазоном частот от 0,5 до 1600 Гц. Скорость и перемещение плиты определялись косвенно, с использованием численного интегрирования сигнала ускорения по времени.

В рамках модели падающий груз и нагрузочная пластина являются абсолютно жесткими элементами с массами m_1 и m_2 . Блок пружин и контролируемое основание – упругими элементами, жесткостью k_1 и k_2 . Движения груза и плиты описываются дифференциальными уравнениями второго порядка. Из-за отсутствия жесткой связи между падающим грузом,

нагрузочной пластиной и контролируемым основанием в системе не могут возникать растягивающие упругие силы. Движение элементов установки при этом состоит из нескольких этапов, начало и конец каждого этапа связан с моментом времени, в который одна из упругих сил становится равной нулю. Каждый из этих этапов описывается отдельной системой дифференциальных уравнений.

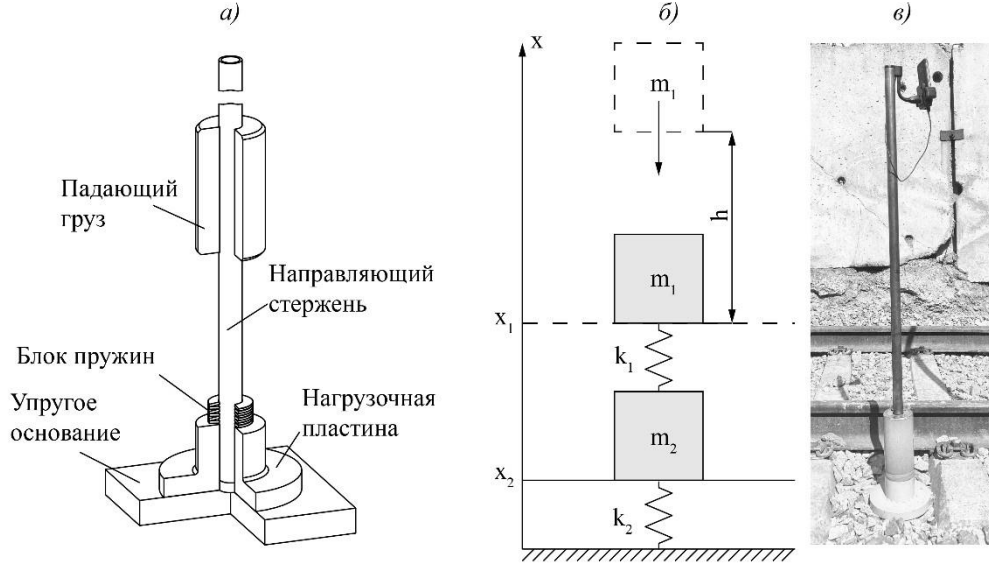


Рисунок 5 – Схема (а), физическая одномерная модель (б) установки динамического штампа и фото на участке пути (в)

В начальный момент времени $t_1 = 0$ груз массой m_1 непосредственно перед столкновением с блоком пружин обладает начальной скоростью $v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$. После столкновения груза с блоком пружин на первом этапе модель описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = -k_1 \cdot (x_1 - x_2) - m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = -k_2 \cdot x_2 + k_1 \cdot (x_1 - x_2) - m_2 \cdot g \end{cases} \quad (6)$$

Работа системы сопровождается упругими колебаниями на частотах:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}}, \quad \omega_{12} = \sqrt{\frac{k_1}{m_2}}.$$

При соотношении частот $\omega_1 \leq \omega_2$ возникает второй этап, на котором нагрузочная пластина отрывается от основания, а блок пружин продолжает взаимодействовать с падающим грузом:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = -k_1 \cdot (x_1 - x_2) - m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = k_1 \cdot (x_1 - x_2) - m_2 \cdot g \end{cases} \quad (7)$$

При $\omega_1 > \omega_2$ возникает третий этап, на котором груз отрывается от пружин, а нагрузочная пластина взаимодействует только с основанием:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = -m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = -k_2 \cdot x_2 - m_2 \cdot g \end{cases} \quad (8)$$

Последний, четвертый этап – это движение двух масс в поле тяжести, когда массы не взаимодействуют между собой:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \ddot{x}_1 = -m_1 \cdot g \\ m_2 \cdot \ddot{x}_2 = -m_2 \cdot g \end{cases} \quad (9)$$

На рисунке 6 показаны зависимости ускорения, скорости и перемещения нагрузочной пластины от времени, полученные при моделировании единичного ударного воздействия установки. Для оценки жесткости основания используются информативные параметры сигнала: экстремальные значения $a_1, \dots, a_5$ и времена их достижения $\tau_1, \tau_3, \tau_4, \tau_6, \tau_8$, времена пересечения сигналом нулевой линии $\tau_2, \tau_5, \tau_7, \tau_9$.

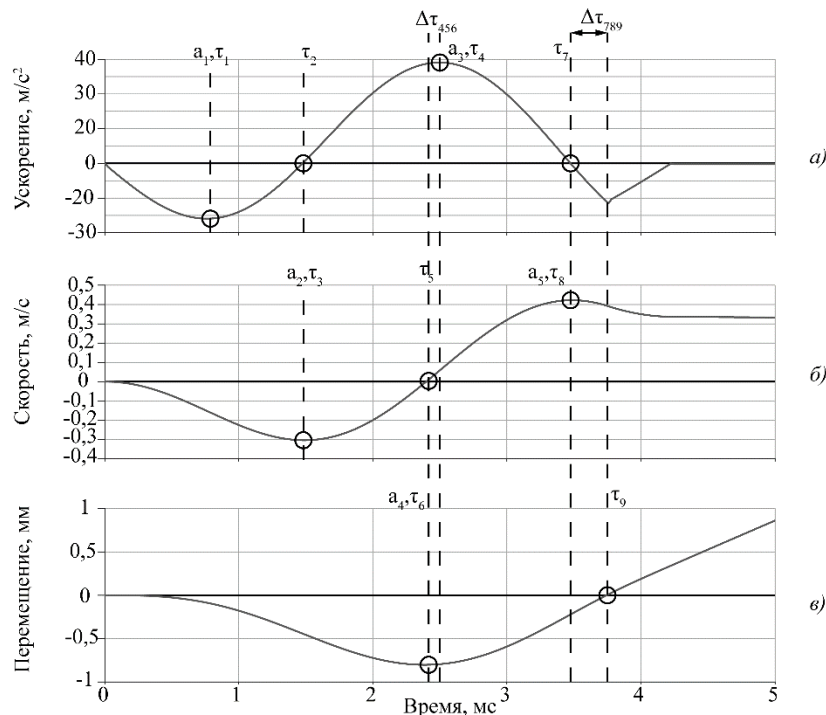


Рисунок 6 – Графики зависимости ускорения (а), скорости (б), перемещения (в) нагрузочной пластины от времени при упругом взаимодействии с падающим грузом, информативные амплитудные ($a_1 - a_5$) и временные ($\tau_1 - \tau_9$) параметры

Зависимости амплитудных и временных параметров от жесткости контролируемого основания в диапазоне от 10 до 70 МН/м приведены на рисунке 7. Один из критериев отбора параметров для оценки жесткости основания является его монотонность при изменении жесткости. Для параметров a_3 и τ_4 (рис. 6) требование монотонности при произвольных собственных частотах установки не выполняется (рис. 7). С помощью моделирования показано, что для обеспечения взаимнооднозначного соответствия параметра и жесткости системы необходимо и достаточно выполнение условий на собственные частоты: $\omega_1 > \omega_2/1,34$.

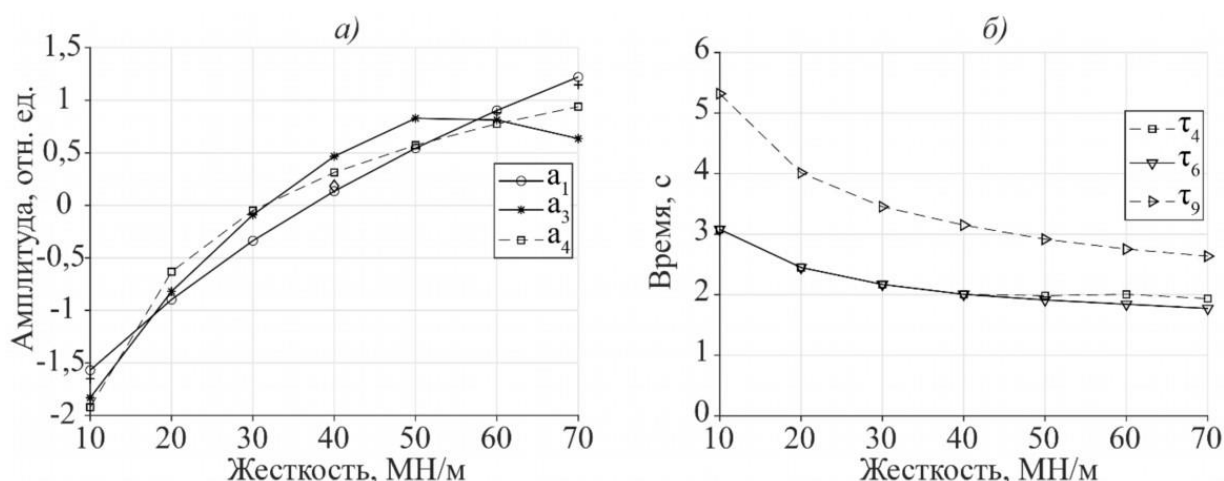


Рисунок 7 – Графики зависимости амплитудных (а) и временных (б) параметров от жесткости основания на интервале (10 – 70) МН/м при $\omega_1 < \omega_2/1,34$

Временные параметры сигналов зависят не только от жесткости основания, но и от массы балласта, участвующего в динамическом процессе, неопределенности скорости удара, нелинейности и непостоянстве упругого элемента установки. В разработанную модель вносились случайные отклонения параметров установки и основания и рассчитывались средние квадратические отклонения результата измерений жесткости (табл. 1). Мешающие факторы оказывают минимальное влияние на амплитудный параметр a_4 и временные параметры: $\tau_4, \tau_6 - \tau_9$. Погрешность измерений с использованием амплитудного параметра не превышает 5 МН/м, временных параметров – 2 МН/м.

Таблица 1 – Значения среднеквадратических отклонений σ информативных параметров сигналов для разных жесткостей контролируемого основания k_2

Жесткость, МН/м	Среднее квадратическое отклонения, МН/м												
	Амплитудные				Временные								
	a_1	a_2	a_3	a_4	τ_1	τ_2	τ_3	τ_4	τ_5	τ_6	τ_7	τ_8	τ_9
15	19	7	2	2	14	4	4	1	1	1	1	1	1
40	22	11	7	5	15	7	6	2	3	2	2	2	2
65	16	10	11	4	17	9	9	2	3	2	2	2	2

Параметры установки динамического контроля должны обеспечивать соответствие испытательной и реальной нагрузок в эксплуатации. Для диапазона жесткостей основания k_2 от 10 до 70 МН/м и максимального испытательного давления в диапазоне от 0,2 до 1,0 МПа, что соответствует нормальной поездной нагрузке в эксплуатации и нагрузке от дефектов поверхности катания,

соответственно, рассчитаны необходимые параметры установки: $m_1 = 10$ кг, $m_2 = 17$ кг, $k_1 = 25$ МН/м, $h = 1,2$ м.

В четвертой главе представлены методика и алгоритмы определения модуля деформации балластной призмы, основанные на численном решении обратной задачи. На достоверность результатов контроля с использованием информативных параметров сигналов влияют факторы, связанные с нелинейностью объекта контроля: инерционная масса контролируемого основания под нагрузочной пластиной, неконсервативные силы трения, необратимые изменения в балласте, приводящие к его осадке. Для учета этих факторов модель динамического штампа уточнена с помощью модели Кельвина-Фойгта, в которой основание является нелинейным упруго-пластичным элементом с демпфером (рис. 8, а).

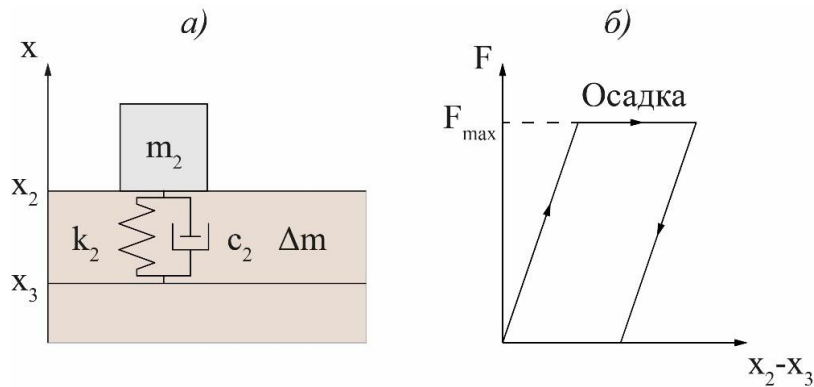


Рисунок 8 – Механическая модель воздействия нагрузочной пластины на упруго-пластичский грунт (а) и иллюстрация формы петли гистерезиса осадки грунта (б)

В системы уравнений (6) – (8) добавлена сила трения в контролируемом основании:

$$F_c = -c_2 \cdot \dot{x}_2, \quad (10)$$

где c_2 – коэффициент демпфирования балласта, Н·с/м.

Нелинейность основания учтена добавлением в жесткость слагаемого, линейного по перемещению x_2 :

$$k_2(x_2) = k_{21} + k_{22} \cdot x_2 \quad (11)$$

Инерционная масса щебня Δm учитывается в модели как добавочное значение к массе нагрузочной пластины m_2 . Осадка балласта от ударной нагрузки является упруго-пластической деформацией. Петля гистерезиса для исследуемой модели приведена на рисунке 8, б. При превышении упругой силой $F = k_2(x_2 - x_3)$ критического значения F_{max} , балласт проседает на значение $x_3 = x_2 - \frac{F_{max}}{k_2}$.

Для решения систем уравнений с учетом нелинейности, демпфирования и осадки, применялось численное интегрирование методом конечных разностей:

$$v_2^j = \frac{x_2^j - x_2^{j-1}}{\Delta}, \quad (12)$$

$$a_2^j = \frac{x_2^{j+1} + x_2^{j-1} - 2 \cdot x_2^j}{\Delta^2}. \quad (13)$$

где $j = 0, \dots, f_{\text{АЦП}} \cdot t - 1$ – номер узла расчетной сетки; $f_{\text{АЦП}}$ – частота дискретизации АЦП, Гц; v_2 – скорость движения нагрузочной пластины, м/с; a_2 – ускорение нагрузочной пластины, м/с²; t – длительность измерения, с; Δ – шаг расчетной сетки, с.

Итоговое уравнение смещения нагрузочной пластины имеет вид:

$$x_2^{j+1} = 2 \cdot x_2^j - x_2^{j-1} + \frac{\Delta^2 \cdot (-\beta \cdot (k_2(x_2^j - x_3^j) \cdot x_2^j - c_2 \cdot \frac{x_2^j - x_2^{j-1}}{\Delta}) + \alpha \cdot k_1 \cdot (x_1^j - x_2^j) + (m_2 + \beta \cdot \Delta m) \cdot g)}{(m_2 + \Delta m)} \quad (14)$$

$$x_3^{j+1} = x_2^{j+1} - \frac{F_{\max}}{k_2(x_2^{j+1} - x_3^j)}, \text{ если } k_2(x_2^{j+1} - x_3^j) \geq F_{\max} \quad (15)$$

где α и β принимают значения 0 или 1, в зависимости от этапа, в котором находится система.

Алгоритм решения обратной задачи основан на сравнении численного решения обратной задачи с экспериментальными данными и подбором параметров модели таким образом, чтобы смоделированные сигналы совпадали с экспериментальными данными (рис. 9).

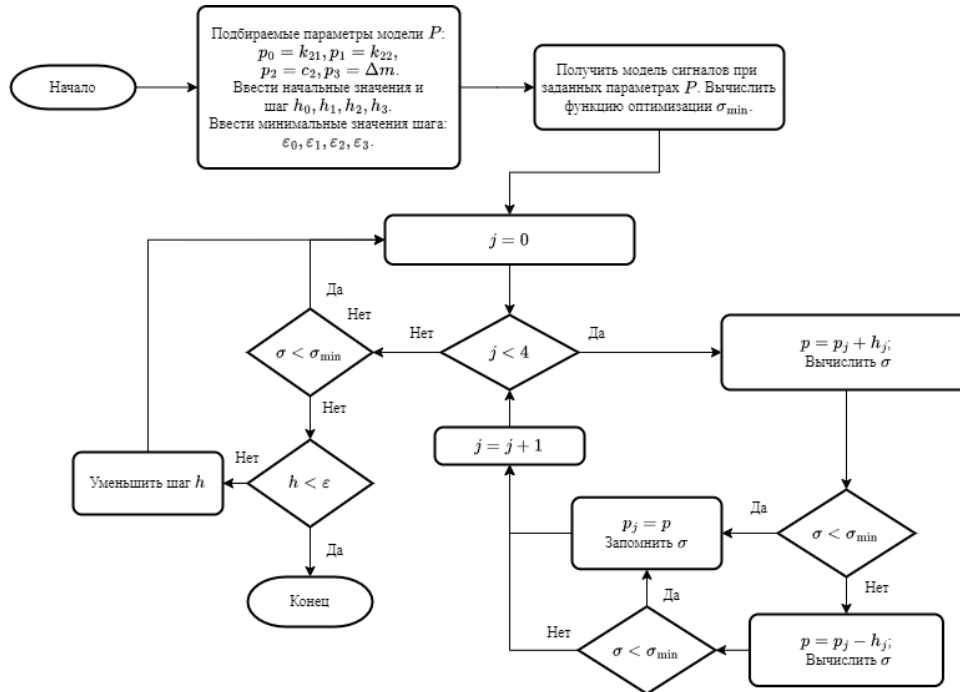


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритма обратной задачи определения жесткости балласта

Решение обратной задачи и поиск параметров модели сведен к решению задачи оптимизации, в которой в качестве функции оптимизации выбрано среднеквадратическое отклонение экспериментального сигнала скорости от рассчитанного сигнала:

$$\sigma(k_2, c_2, \Delta m) = \sqrt{\frac{\sum_i (v_2(t_i) - \hat{v}_2(t_i))^2}{N}} \rightarrow \min, \quad (16)$$

где $v_2(t_i)$ – значение скорости нагрузочной пластины в момент времени t_i ; $\hat{v}_2(t_i)$ – экспериментальное значение скорости в момент времени t_i ; N – количество временных отчетов t_i .

Из-за многопараметрической постановки задачи оптимизации для поиска минимума функции (16) использовался метод Хука-Дживса. Входными параметрами метода являются начальная точка поиска минимума и ограничения оптимизируемых переменных. Для определения ограничений исследовалось влияние каждой оптимизируемой переменной на функцию оптимизации. За начальную точку принимались значения параметров, соответствующие нижней границе принятых ограничений.

Верификация разработанных алгоритмов решения обратной задачи проводилась на упругом основании с известной жесткостью, определенной при статическом нагружении. При проведении испытаний фиксировался сигнал акселерометра (рис. 10, а), в котором наблюдаются высокочастотные колебания на собственной частоте, связанной с ударным воздействием груза на пружину. Скорость (см. рис. 10, б) и перемещение (см. рис. 10, в) находились численным интегрированием сигнала ускорения. Одновременно с экспериментальными данными на рисунке 10 показаны численные решения обратной задачи. Результаты решений задачи оптимизации методом Хука-Дживса при обработки экспериментальных данных, полученные в лабораторном эксперименте на упругих пластинах представлены на рисунке 10 г. Изменения жесткости основания близки к линейной зависимости с коэффициентом детерминации 0,996.

Возможность использования алгоритма решения обратной задачи для оценки модуля деформации балласта подтверждена испытаниями установки динамического штампа на полигоне Сибирского государственного университета путей сообщения и на участке железнодорожного пути. Проведены испытания на балластной призме на трех участках между шпалами. На каждом участке груз 10 раз падал с высоты 0,6 м. Значения оказываемых на балласт динамических

нагрузок находились в диапазоне от 9 до 12 кН, а соответствующие напряжения от 0,2 до 0,3 МПа. Модуль деформации балласта под нагрузочной плитой определялся из соотношения:

$$E_d = \frac{k_2 \cdot 1,5}{\pi \cdot r^2} \quad (17)$$

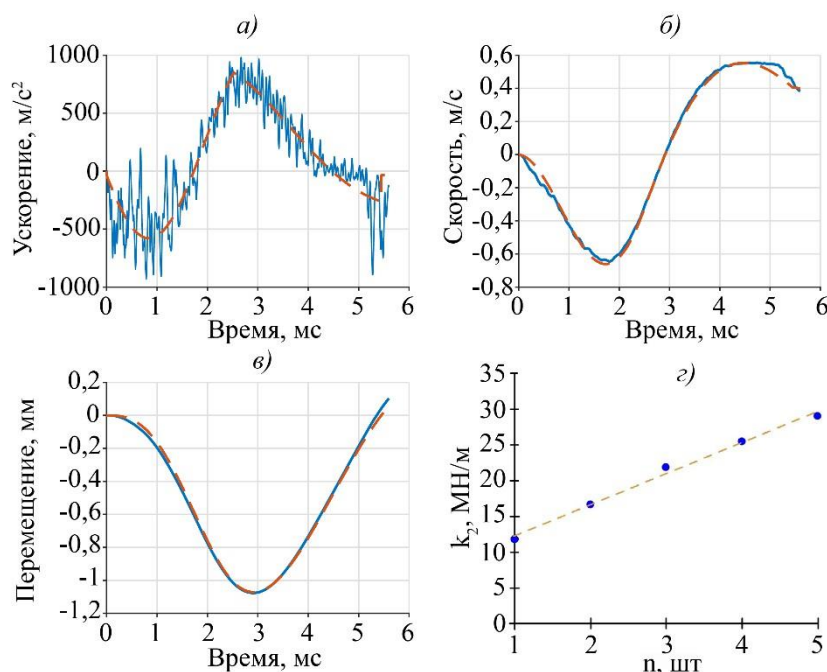


Рисунок 10 – Экспериментально-расчетные зависимости ускорения (а), скорости (б) и перемещения (в) при ударном нагружении упругого основания и зависимость экспериментально-расчетных значений жесткости основания от количества параллельно установленных резиновых пластин (г)

На рисунке 12 приведены полученные средние значения модуля деформации балласта в трех областях. Полученные значения отклонения динамического модуля деформации зависят от случайного расположения камней щебня под нагрузочной плитой. Зависимость модуля деформации от порядкового номера измерения представлена на рисунке 12, б. В первых четырех испытаниях наблюдается процесс уплотнения щебня и значение модуля упругости возрастает, а при последующих испытаниях с 4-го – 12-ое значения модуля деформации находится в диапазоне (83 ± 13) МПа. Перед каждым измерением, начиная с 13-го, щебень удаляли по одному из-под нагрузочной плиты, что уменьшало количество ее контактов с балластом. Модуль деформации при этом увеличился до 120 МПа, а затем уменьшился до 40 МПа. При дальнейшем уменьшении количества точек контакта наблюдалась осадка балласта, в результате которой количество точек контакта стабилизировалось и жесткость основания снова увеличилась. Таким образом, значение

динамического модуля деформации зависит как от первоначальной степени уплотнения, так и от уплотнения в процессе испытания, и от случайного положения камней под нагрузочной пластиной.

За модуль деформации балластной призмы принято средневзвешенное значение 65 МПа со средневзвешенным средним квадратическим отклонением 6 МПа (рис. 12 а). Результаты измерения модуля деформации балласта методом динамического штампа с численным решением обратной задачи сравнивались с результатами статических нагрузжений: $E_s = 70$ МПа со средним квадратическим отклонением 5 МПа. Таким образом, результаты измерений динамического модуля деформации согласуются со значениями, полученными при статических испытаниях, с погрешностью не более 8%.

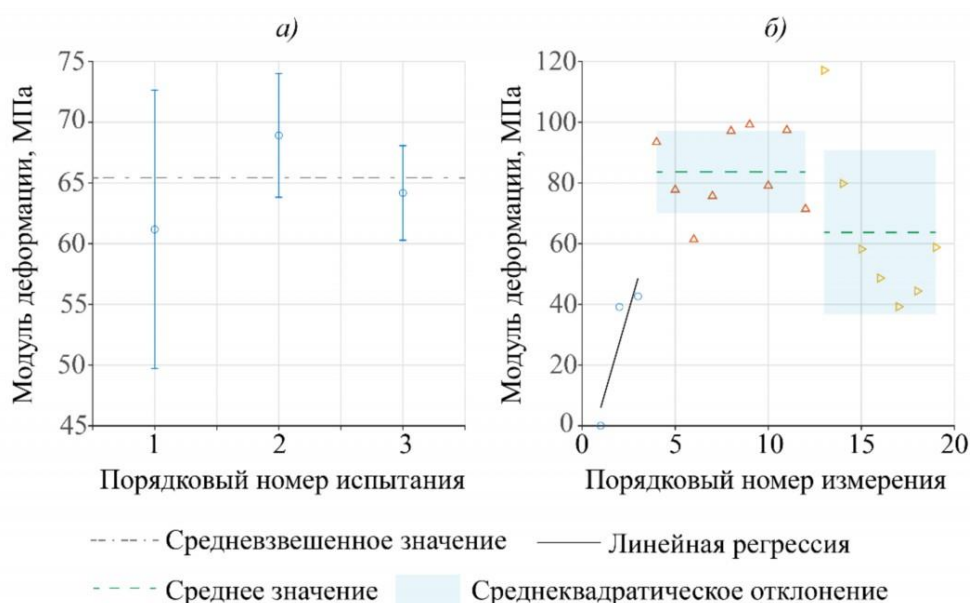


Рисунок 12 – Средние значения и среднеквадратические отклонения измерений модуля деформации между шпалами в трех точках (а) и иллюстрация исследования влияния положения камней щебня под штампом на значение модуля деформации (б)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования создано алгоритмическое и программное обеспечение средств контроля ходовых частей вагонов тензометрическим методом и балласта верхнего строения пути вибродиагностическим методом. Обнаружение в эксплуатации дефектов, вызывающих сверхнормативное воздействие на вагон и путь, и контроль устойчивости пути под действием реальных поездных нагрузок обеспечивают повышение информативности контроля и эксплуатационного ресурса колесных пар и верхнего строения пути.

Основные результаты и выводы:

1. На испытательном железнодорожном кольце АО «ВНИИЖТ» создан участок тензометрического контроля для оценки динамики воздействия подвижного состава на путь. Разработаны алгоритмы обработки тензометрических сигналов на основе частотно-временного разложения деформаций на информативные составляющие, вызванные проездом колеса, воздействием дефекта поверхности катания и силами реакций шпал.

2. Разработано программное обеспечение для идентификации и оценки параметров динамики воздействия дефектов поверхности катания колес на верхнее строение пути. Проведены испытания программного обеспечения в составе комплекса в условиях повторяемости при 70 повторных контроля. Установлены вероятностные характеристики динамического тензометрического контроля: дефекты длиной более 50 мм обнаруживаются с вероятностью 97 %, 39 мм – с вероятностью 50 %, дефекты длиной не более 30 мм – 1,3 %.

3. Разработана физическая и математическая модель установки динамического нагружения, учитывающая упруго-пластические деформации балласта и демпфирование в установке. На основе модели определены параметры установки для создания динамической нагрузки, эквивалентной нагрузке в эксплуатации с напряжениями в балласте от 300 кПа до 1 МПа.

4. Предложен способ выбора амплитудных и временных информативных параметров виброметрических сигналов и установлена их связь с жесткостью контролируемого основания. Разработан критерий информативности параметров в зависимости от соотношения собственных частот испытательной установки: $\omega_1 > \omega_2/1,3$.

5. Предложен способ и разработаны алгоритмы обработки вибродиагностических сигналов на основе численного решения обратной задачи восстановления неизвестных контролируемых параметров балластной призмы.

6. Исследована применимость численного решения обратной задачи при испытаниях на упругом основании жесткостью от 3 до 16 МН/м. Результаты испытаний коррелируют со значениями жесткости при статических испытаниях с коэффициентом детерминации 0,996.

7. Проведены сравнительные испытания щебеночного балласта между разработанным способом и статическим нагружением. Выявлено, что разработанный способ обеспечивает результаты измерений, которые отличаются от данных статических испытаний с относительной погрешностью менее 8 %.

Выполненные исследования являются основой для разработки методов и средств динамического и тензометрического контроля.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

*Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, индексируемых в
международных базах Scopus и WoS*

1. **Vyplaven V. S.**, Bekher S. A., Kolomeets A. O. et al. Reproducibility and repeatability of the results of strain gauge control of the tread of moving wagon wheels. Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. 2022, Vol. 63, No. 4, P. 721-730, DOI 10.1134/s0021894422040204.

2. Fedorinin V. N., Bekher S. A., **Vyplaven V. S.** et al. Optical Tensometry in the Wheel–Rail Interaction Problem. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2023, Vol. 59, No. 3, P. 313-320, DOI 10.3103/s8756699023030068.

*Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, рекомендуемых
ВАК Минобрнауки РФ*

3. **Выплавень В. С.**, Бехер С. А. Упруго-линейная модель динамического контроля жесткости балластного слоя железнодорожного пути. Интеллектуальные системы в производстве. 2023, Т. 21, № 1, С. 4-13, DOI 10.22213/2410-9304-2023-1-4-13.

4. **Выплавень В. С.**, Бехер С. А. Использование численного решения обратной задачи для совершенствования метода динамического штампа для контроля балластного слоя // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27, № 11. С. 04 – 13. DOI: 10.14489/td.2024.11.pp.004-013

Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

5. Пат. 2 784 392 Российская Федерация, С1 МПК G01B 7/34, G01B 7/16, B61K 9/12. Способ контроля поверхности катания железнодорожных колес в движении / С. А. Бехер, **В. С. Выплавень**, А. О. Коломеец, А. С. Кочетков, А. А. Попков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2021139001; заявл. 24.12.2021; опубл. 24.11.2022.

6. Пат. 2 801 164 Российская Федерация, С1 МПК G01N 3/32, G01N 33/24. Способ измерения несущей способности насыпных грунтов / **В. С. Выплавень**, А. А. Попков, Д. И. Школина, С. А. Бехер; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2023100126; заявл. 09.01.2023; опубл. 02.08.2023.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021666794 / С. А. Бехер, **В. С. Выплавень**, А. О. Коломеец, А. А. Попков; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2021665911; заявл. 11.10.2021; опубл. 20.10.2021.

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023682160 / А. С. Ададунов, **В. С. Выплавень**; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2023680959; заявл. 11.10.2023; опубл. 23.10.2023.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus

9. **Vyplaven V.**, Gulyaev M., Popkov A. et al. Mathematical modelling of elastic vibrations arising from four-body impact interaction. E3S Web of Conferences : International Scientific Siberian Transport Forum – TransSiberia. 2023, Vol. 402, P. 03055, DOI 10.1051/e3sconf/202340203055.

10. **Vyplaven V.**, Kolomeets A., Popkov A. Methods for freight cars wheels rolling surface defects detecting in motion by using tensometry. Fundamental and Applied Transport Issues. 2021, Vol. 1(2), P. 5-10, DOI 10.52170/2712-9195/2021_2_5.

Публикации в журналах, научных сборниках и других научных изданиях

11. Коломеец, А. О., **Выплавень В. С.** Сравнительный анализ временных параметров обработки сигналов тензометрического контроля линейной сверткой и фильтром Калмана. Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2020, № 1, С. 174-182, DOI 10.25586/RNU.V9187.20.01.P.174.

12. **Выплавень В. С.**, Бехер С. А., Коломеец А. О. Обнаружение дефектов поверхности катания колесных пар грузовых вагонов в движении с использованием тензометрии. Наука. Технологии. Инновации: Сборник научных трудов. 2019, С. 12-14.

13. **Выплавень В. С.**, Коломеец А. О. Бехер С. А. Способы обнаружения дефектов поверхности катания колесных пар грузовых вагонов в движении с использованием тензометрии. Фундаментальные и прикладные вопросы транспорта. 2021, № 1, С. 5-10, DOI 10.52170/2712-9195/2021_2_5.

14. **Выплавень В. С.**, Бехер С. А. Использование численного решения обратной задачи в неразрушающем контроле для уменьшения влияния мешающих факторов. Умные технологии НК. Единство теории и практики: Сборник трудов XXIII Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 23–25 октября 2023 года, С. 50-52.

15. Игумнова, Т. В., **Выплавень В. С.**, Гуляев М. А. Метрологическое обеспечение способов определения сил, действующих от подвижного состава на рельс для разработки методологической базы расчета ресурса подвижного состава и инфраструктуры. Умные технологии НК. Единство теории и практики: Сборник трудов XXIII Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике, Москва, 23–25 октября 2023 года, С. 244-247.