

На правах рукописи



КОЛОМЕЕЦ АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ
КОЛЕС ВАГОНОВ В ДВИЖЕНИИ**

Специальность 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Сергей Алексеевич Бехер

Официальные оппоненты: **Науменко Александр Петрович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Радиотехнические устройства и системы диагностики»

Бернс Владимир Андреевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное унитарное предприятие «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина», руководитель отдела динамической прочности авиационных конструкций

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «04» апреля 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета кандидат технических наук, доцент



Васендина
Елена Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Дефекты ходовых частей вагонов оказывают негативное влияние на безопасность эксплуатации объектов железнодорожного транспорта. Ползуны, выщербины, навары на поверхности катания колесных пар увеличивают динамические силы в системе «колесо – рельс» в несколько раз и, следовательно, повышают вероятность образования в них усталостных дефектов. Развитие дефектов способно привести к разрушению ходовых частей вагонов и рельсов в процессе эксплуатации, сходу или крушению подвижного состава. Для железных дорог РФ эта тема особенно актуальна, так как движение пассажирских и грузовых поездов осуществляется по общим железнодорожным путям, и сход грузового состава может произойти одновременно с движением по соседнему пути пассажирского поезда.

На отечественных железных дорогах основным методом обнаружения дефектов поверхности катания колес является визуально-измерительный контроль, выполняемый осмотрщиками вагонов после остановки поезда на пунктах технического освидетельствования. На достоверность результатов контроля существенное влияние оказывает психологическое и физиологическое состояния осмотрщика вагонов, его квалификация и опыт, внешние условия. Напольные средства диагностики для обнаружения дефектов поверхности катания колесных пар пока не нашли массового применения на железных дорогах РФ. В нашей стране и за рубежом активно проводятся работы по созданию аппаратуры и совершенствованию методик контроля ходовых частей вагонов по показателям динамики их взаимодействия с рельсами.

Одним из наиболее перспективных методов контроля динамических сил является тензометрический метод, основанный на регистрации деформаций рельса под проходящим поездом. Метод позволяет обнаруживать дефекты и классифицировать их по степени влияния на динамику движения, имеет меньше ограничений, связанных с необходимостью изменения конструкции бесстыкового пути. Поэтому задача создания и внедрения автоматизированных тензометрических систем контроля колесных пар на железных дорогах РФ является **актуальной**.

Объектом исследования является поверхность катания колеса железнодорожного подвижного состава.

Предметом исследования являются тензометрические сигналы, вызванные воздействием на рельс движущихся железнодорожных колес с различным техническим состоянием поверхности катания.

Основная идея работы – заключается в разработке и использовании алгоритмов временной, частотной фильтрации и корреляционного анализа сигналов тензометрической диагностической системы контроля колес вагонов в движении для разделения трех составляющих деформаций: от воздействия колес, шпал и импульсного воздействия дефекта поверхности катания, что позволяет уменьшить количество необходимых тензодатчиков, требования к конструкции и содержанию пути.

Цель диссертационной работы – создание алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки диагностических сигналов тензометрической системы для повышения достоверности результатов контроля поверхности катания колесных пар вагонов в движении.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи исследования**:

1. Разработать алгоритмы обработки тензометрических сигналов для уменьшения влияния подрельсового основания на неопределенность результатов измерений вертикальной силы, действующей от колес на рельсы.

2. Экспериментально исследовать закономерности формирования тензометрических сигналов в рельсах при воздействии колес с дефектами поверхности катания и разработать алгоритмы их обработки для получения информативных параметров.

3. Разработать методику калибровки тензометрической системы для обоснования критериев браковки дефектов типа ползун, выщербина, навар по значениям динамических сил в системе колеса и рельса.

4. Разработать, провести испытания в реальных условиях эксплуатации и внедрить программное обеспечение тензометрической системы для автоматизированного контроля колес грузовых вагонов в движении.

Методы исследования. При выполнении диссертационной работы использовались экспериментальные методы неразрушающего контроля: визуально-измерительный, тензометрический и электрический. Для теоретических исследований физических процессов в системе «колесо – рельс» применялись методы математического моделирования, аналитические решения систем дифференциальных уравнений. Обработка сигналов проводилась с

использованием методов корреляционного, регрессионного и Фурье-анализа, математической статистики и прикладного программирования.

Достоверность полученных результатов определяется сходимостью результатов тензометрического, визуального и измерительного контроля, согласованностью экспериментальных результатов с аналитическими расчетами и результатами математического моделирования, статистически значимым объемом экспериментальных исследований, при котором доверительная вероятность неопределенностей измерений составила не менее 95 %, сходимостью экспериментальных результатов в различных условиях: в лаборатории, на полигоне и на действующих участках пути.

Научная новизна работы заключается в том, что:

1) разработана методика и алгоритмы обработки тензометрических сигналов для измерения динамических сил в системе «колесо – рельс» по регистрируемым с одной пары тензодатчиков сигналам, основанные на различии временных зависимостей деформаций, вызванных силой реакции колеса и силой реакции шпалы, с погрешностью не более 5 % в условиях неопределенности параметров подрельсового основания;

2) обосновано применение двухэлементной модели для определения зависимости информативных параметров диагностических сигналов в процессе движения колеса с дефектом поверхности катания от жесткости подрельсового основания;

3) разработан комплекс временных и амплитудных информативных параметров сигналов тензометрической системы, установлена корреляционная связь амплитудного параметра импульсной составляющей сигнала с приращением динамической силы от воздействия дефектного колеса на рельс с коэффициентом корреляции 0,83;

4) установлено, что неопределенность динамического коэффициента преобразования силы, действующей на поверхность катания рельса, в деформации шейки рельса в диапазоне частот от 0 до 800 Гц не превышает 2 %.

Практическая значимость работы. На основе разработанных алгоритмов определения динамических сил в системе колеса и рельса создано программное обеспечение (свидетельство № 2013619321 от 01.10.2013 г.) для автоматизированного контроля показателей динамики подвижного состава, которое внедрено в быстродействующей микропроцессорной тензометрической

системе «Динамика-3» (СГУПС, Новосибирск). Результаты исследований закономерностей распределения деформаций в стальных объектах внедрены в учебный процесс СГУПСа в виде лабораторной работы «Измерение деформаций и механических напряжений». Результаты исследования комплекса информативных параметров и методик выделения импульсных составляющих тензометрических сигналов, позволили разработать алгоритмы и программу (свидетельство № 2015613124 от 05.03.2015 г.) обнаружения и определения параметров дефектов поверхности катания железнодорожных колес, которые внедрены в составе подсистемы автоматизированного цифрового комплекса измерения геометрических параметров колесных пар подвижного состава Комплекс-2 (ООО «ТрансТех», г. Новосибирск).

Положения, выносимые на защиту:

1. При движении железнодорожного колеса с постоянной скоростью V в вертикальных симметричных деформациях выделяются две составляющие, связанные с силой реакции колеса и силой реакции шпалы. Временные зависимости этих составляющих различаются, при этом характерные времена изменения деформаций составляют не более $0,18 / V$ и не менее $0,5 / V$ соответственно, что позволило разработать алгоритмы временной фильтрации с использованием полинома четвертой степени и уменьшить влияние подрельсового основания на результаты измерения динамической силы, действующей от бездефектного колеса на рельс, с погрешностью не более **5 %**.

2. Переход от одноэлементной модели формирования диагностических сигналов к модели с двумя упругими элементами, воспроизводящими подсистемы «колесо – рельс» и «рельс – подрельсовое основание», позволяет на расстоянии более **90 мм** от тензодатчика определить с погрешностью не более **3 %** зависимость амплитуды симметричных деформаций от приращения силы, вызванной воздействием колеса с дефектом поверхности катания.

3. Воздействие на рельс движущегося колеса с дефектом поверхности катания приводит к появлению импульсной составляющей на зависимости симметричных деформаций от времени, причем длительность переднего фронта импульса связана с протяженностью дефекта, а амплитудное значение деформаций – с приращением динамической силы от колеса на рельс с коэффициентом корреляции **0,83**.

4. В диапазоне частот от 0 до 800 Гц, что соответствует основной частоте сигналов деформаций при движении колес с дефектами поверхности катания протяженностью 60 мм на скорости 90 км/ч, отличие коэффициентов преобразования динамической и статической сил от колеса на рельс в вертикальные симметричные деформации шейки рельса не превышает 2 %, что позволило разработать методику калибровки измерительного участка статической силой.

Апробация результатов работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы Транссиба», г. Новосибирск, 2012 г.; на XIV научно-практической конференции «Безопасность движения поездов», г. Москва, 2013 г.; на Международной научно-практической конференции «Планово-предупредительный вид ремонта тягового подвижного состава с учетом его технического состояния», посвященной 25-летию образования ОАО «НИИТКД», г. Омск, 2013 г.; на VIII Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», г. Екатеринбург (ИМАШ УрО РАН), 2014 г.; на VIII Международной научно-практической конференции «Политранспортные системы», г. Новосибирск, 2014 г.; на V Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Неразрушающий контроль: электронное приборостроение, технологии, безопасность», г. Томск (ТПУ), 2015 г.; на III Всероссийской научно-практической конференции с международным участием по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest», Горный Алтай (ТПУ), 2015 г.

Личный вклад автора. Автором лично разработаны программы и алгоритмы первичной обработки и фильтрации сигналов тензометрической системы, анализа информативных параметров, спроектировано и разработано специализированное ударное устройство. При непосредственном участии автора подготовлены измерительные участки железнодорожного пути, проведены эксперименты по статическому и динамическому силовому воздействию на рельс, обработка экспериментальных данных. При участии автора подготовлены основные публикации и осуществлена регистрация специализированного программного обеспечения, результаты исследований представлены на всероссийских и международных научных конференциях и внедрены на предприятиях, в том числе неразрушающего контроля.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 13 работ в центральных научно-технических журналах и изданиях, в том числе четыре из них в изданиях, включенных в перечень, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации (перечень ВАК), одна в издании, индексируемом в реферативной базе Scopus, получено два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 162 листах, содержит 89 рисунков, включает одну таблицу и четыре приложения, состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, который содержит 122 источника.

Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю кандидату технических наук, доценту Сергею Алексеевичу Бехеру за формулирование цели и постановку задач исследования, постоянную научную и моральную поддержку, за понимание проблем и оказание неоценимой помощи, без которой данная работа не могла состояться. Автор особо хочет отметить доктора технических наук, профессора Людмилу Николаевну Степанову и поблагодарить ее за ценные советы и замечания при написании данной работы. Автор признателен всему коллективу научно-исследовательской лаборатории «Физические методы контроля качества» и кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС, а также специалистам ООО «ТрансТех» за помощь в организации и проведении большого количества экспериментов и натурных измерений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, рассмотрена степень проработанности темы исследования другими авторами, определены цель и задачи, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражающие новизну и практическую значимость.

Глава 1 – Особенности применения тензометрии в неразрушающем контроле объектов железнодорожного транспорта. Приводится классификация методов тензометрии на основе применяемых физических эффектов. Значительный вклад в развитие методов тензометрии, основанных на физических эффектах: рентгеновском, поляризационно-оптическом, муаровых полос, хрупких и гальванических покрытий, внесли И. Краус, В.В. Трофимов,

В.В. Чижиков, Р.У. Ильясов, П.П. Панов, С.С. Колесов, Г.Н. Албаут, М.Х. Ахметзянов, Н.В. Харитонов, В.Б. Титов, Т.А. Дудник, В.М. Тихомиров, Н.А. Махутов, Б.Н. Ушаков, И.Е. Васильев, Ю.В. Лисин, Е.С. Васин, В.Н. Пермяков, Л.Б. Хайруллина. Наиболее широкое распространение в промышленных условиях получили методы, основанные на преобразовании деформаций поверхности объекта в более удобную для измерения физическую величину. В зависимости от вида используемого физического эффекта или явления тензометрические преобразователи классифицируются следующим образом: механические, оптические, пневматические, струнные (акустические), электрические. Такие устройства активно используются при контроле и испытаниях ответственных элементов машин, механизмов и конструкций, в частности объектов железнодорожного транспорта. Значительный вклад в этой области внесли ученые В.Л. Гапонов, А.С. Гуринов, В.В. Дудник, В.Ф. Ушкалов, С.А. Кострица, А.В. Султан, К.В. Елисеев, Ю.Г. Исполов, А.М. Орлов, М.П. Клокова, А.М. Серьезнов и др.

В данной главе рассматривается современное состояние исследований в области создания и внедрения систем контроля колесных пар вагонов в движении в нашей стране и за рубежом. Приводится краткое описание применяемых методов неразрушающего контроля, технические и метрологические характеристики измерительного оборудования, конструкции систем, способы регистрации диагностических сигналов, программное обеспечение, алгоритмы обработки и анализа информативных параметров сигналов, основные преимущества и недостатки систем.

Необходимость обработки значительных объемов диагностических данных становится общей проблемой для неразрушающего контроля, решение которой может быть найдено в применении современных методов цифровой фильтрации и анализа сигналов. В третьем параграфе первой главы приведен обзор методов и алгоритмов цифровой фильтрации диагностических сигналов. Рассмотрены методы спектрального анализа, алгоритмы корреляционного анализа, обратная и прямая свертка сигналов, специальные алгоритмы линейного предсказания, алгоритмы сжатия информации для хранения, передачи и распознавания образов. Описаны методы фильтрации цифровых сигналов и проведено сравнение их с аналоговыми методами. Приводится описание алгоритмов вейвлет-фильтрации, описывается принцип действия алгоритмов адаптивной фильтрации.

Глава 2 – Методика измерения вертикальной силы от колеса на рельс в условиях неопределенности состояния подрельсового основания. Представлены результаты экспериментальных исследований, разработаны алгоритмы и программное обеспечение для измерения вертикальной силы от колеса на рельс тензометрическим методом.

Исследования проводились на измерительном участке протяженностью 5 м, организованном на действующем железнодорожном пути. Проволочные тензодатчики типа ПКС-12-200 наклеивались на шейку рельса на средней линии и ориентировались для регистрации вертикальных деформаций, на подошву рельса – продольных деформаций (рисунок 1). Сигналы с тензодатчиков измерялись микропроцессорной быстродействующей тензометрической системой «Динамика-3», разработанной совместно специалистами ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» и СГУПСа. Синхронизация системы с движением поезда осуществлялась по сигналам извещения, которые поступали от штатного средства

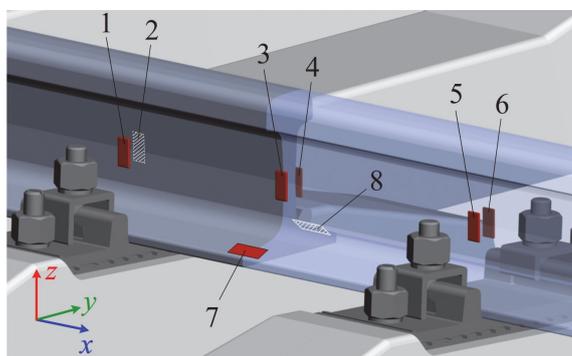


Рисунок 1 – Схема установки тензодатчиков над центрами шпал (1-2, 5-6) и между шпалами (3-4, 7-8)

контроля гребня колеса «Комплекс-2» (ООО «ТрансТех», г. Новосибирск). Оцифрованные тензометрические сигналы обрабатывались в специализированном программном обеспечении, разработанном автором исследования (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2013619321 от 01.10.2013 г.).

Первичной задачей анализа тензометрических сигналов является получение информации о временах прохода колес над тензодатчиками. Без ее достоверного решения невозможна дальнейшая обработка сигналов. Алгоритм определения временных параметров движения колеса основывается на анализе сигналов симметричных деформаций, которые вычисляются как полусумма сигналов с тензодатчиков, установленных с внутренней и наружной сторон шейки рельса относительно железнодорожной колеи. Для уменьшения влияния собственных шумов аппаратуры и низкочастотной составляющей, связанной с изгибом рельса и реакцией шпал, в алгоритме используется фильтрация сигналов симметричных деформаций, основанная на алгоритме линейной свертки:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m (\varepsilon_{j+i} \cdot E_j) / m, \quad (1)$$

где Q_i – сигнал после фильтрации, отн. ед.; ε_{j+i} – сигналы симметричных деформаций, млн^{-1} ; E_j – эталонная функция свертки с периодом T , отсчетов АЦП; i – номер отсчета АЦП; j – номер значения эталонной функции от 0 до m .

На рисунке 2 представлен фрагмент зависимости сигнала симметричных деформаций (поз. 2) от времени и график эталонной функции (поз. 1). Для повышения эффективности фильтрации в работе выполнена оптимизация периода эталонной функции по условиям минимума отношения шум/сигнал $K_{S/N}^{-1}$ и максимума амплитуды симметричных деформаций. На рисунке 3 представлены графики зависимости коэффициента $K_{S/N}^{-1}$ (поз. 1) и амплитуды сигнала симметричных деформаций (поз. 2) от периода эталонной функции. Экспериментально установленное оптимальное значение периода эталонной функции зависит от скорости движения колеса V и определяется из выражения $T \cdot V = 0,48$ м. Поиск времен прохода колесных пар над тензодатчиками проводится пороговым методом.

Для уменьшения влияния на результаты измерения времени импульсных помех, связанный с воздействием дефектов поверхности катания, разработан алгоритм проверки и уточнения времени прохода колеса, основанный на корреляции времен с продольной координатой тензодатчиков. Алгоритм позволяет исключать ложные превышения порога и исправлять времена прохода с использованием аппроксимации методом наименьших квадратов.

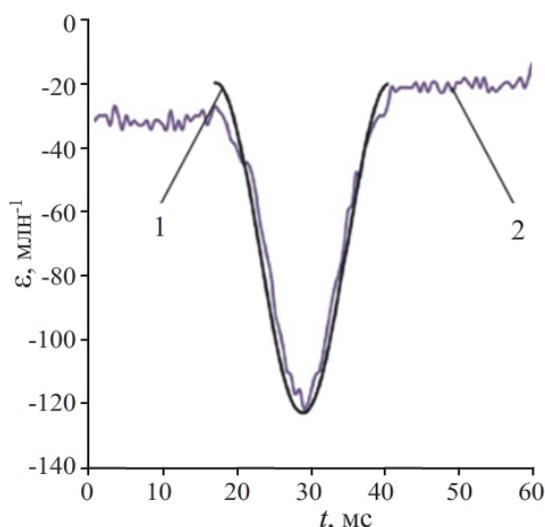


Рисунок 2 – График зависимости эталонной функции (1) и симметричных деформаций (2) от времени при проходе бездефектного колеса

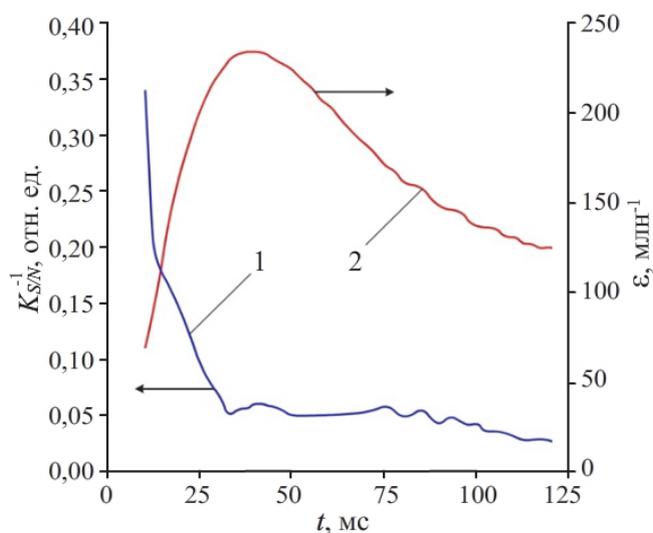
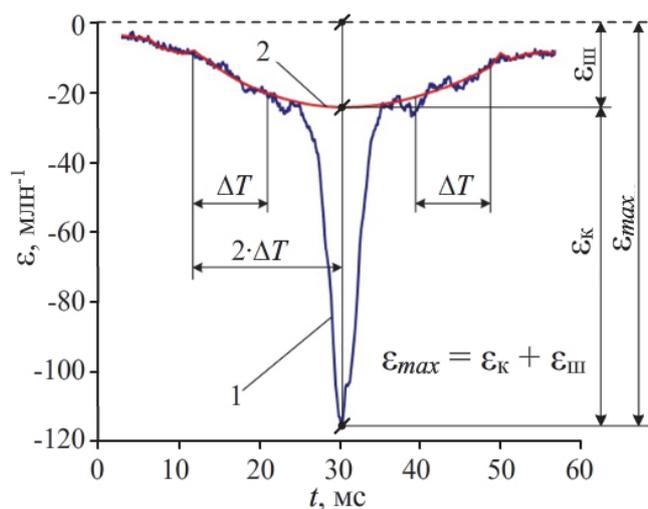


Рисунок 3 – График зависимости отношения шум/сигнал (1) и амплитуды деформаций (2) от длительности периода эталонной функции

В СГУПСе проведены эксперименты по статическому нагружению участка верхнего строения пути с различной высотой балластного слоя (от 0,35 до 0,75 м). Статическая сила изменялась в диапазоне от 100 до 500 кН. Неопределенность результатов измерений деформаций пропорциональна статической силе, что свидетельствует о ее мультипликативном характере с границами неопределенности $\pm 10\%$. Коэффициент пропорциональности между симметричными деформациями и силой определяется состоянием



1 – импульсная составляющая,
2 – низкочастотная составляющая

Рисунок 4 – Зависимость симметричных деформаций от времени при проходе бездефектного колеса

подрельсового основания и напрямую не связан с высотой балластного слоя.

Для уменьшения неопределенности измерений создан алгоритм обработки сигналов, позволяющий уменьшить влияние неинформативной составляющей сигнала. Временная зависимость симметричных деформаций, зарегистрированных при движении бездефектного колеса (рисунок 4), включает две составляющие. Медленная компонента (поз. 2 на

рисунок 4) связана с реакцией подрельсового основания. Импульсная высокочастотная составляющая (поз. 1 на рисунке 4) связана с реакцией колеса в зоне чувствительности тензодатчика от -90 до 90 мм. Основой работы алгоритма разделения составляющих является регрессионный анализ, метод максимального правдоподобия (наименьших квадратов) и экстраполяция. Временная область вблизи пика (поз. 1 на рисунке 4) деформаций разбивается на три участка: $(-2 \cdot \Delta T; -\Delta T)$, $(-\Delta T; \Delta T)$, $(\Delta T; 2 \cdot \Delta T)$. Сигнал вне пика деформаций в областях $(-2 \cdot \Delta T; -\Delta T)$ и $(\Delta T; 2 \cdot \Delta T)$ аппроксимируется теоретической зависимостью $\varepsilon_{ir}(t)$ (поз. 2 на рисунке 4) и экстраполируется в область пика $(-\Delta T; \Delta T)$.

Для аппроксимации использовался полином четвертой степени:

$$\varepsilon_{ir}(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4. \quad (2)$$

Оптимальное значение параметра аппроксимации ΔT и степени полинома определялись в результате обработки экспериментальных данных. Критерием

выбора служил коэффициент корреляции экспериментальных данных и результатов аппроксимации, который для полинома четвертой степени составил $R = 0,981$. Длительность направляющего отрезка зависит от скорости движения подвижного состава и описывается зависимостью $\Delta T = k_T / V$, где коэффициент $k_T = 0,0625$ м. Разработанное на основе алгоритма программное обеспечение повышает информативность сигналов симметричных деформаций за счет выделения импульсной составляющей, что обеспечивает неопределенность измерения силы от бездефектного колеса на рельс не более 5 %.

Глава 3 – Исследование деформаций рельсов при движении колес с дефектами поверхности катания. Исследованы тензометрические сигналы при движении колес вагонов с дефектами поверхности катания, разработаны алгоритмы и программа обнаружения дефектов и оценки их влияния на силы в системе «колесо – рельс».

Установлены закономерности диагностических сигналов, возникающих при взаимодействии дефектного колеса и рельса, и функциональные зависимости параметров диагностических сигналов от параметров системы «колесо – рельс – подрельсовое основание». В работе предложена модель с двумя упругими элементами (рисунок 5). Элемент k_2 имитирует подсистему «колесо – рельс», элемент k_1 – подсистему «рельс – подрельсовое основание». Система описывается двумя дифференциальными уравнениями второго порядка:

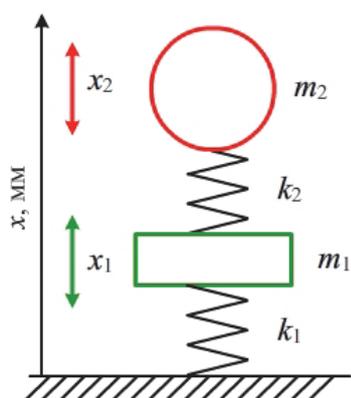


Рисунок 5 – Модель системы «колесо – рельс – подрельсовое основание»

$$m_1 x_1'' = -k_1 x_1 + k_2 (x_2 - x_1), \quad (3)$$

$$m_2 x_2'' = -k_2 (x_2 - x_1). \quad (4)$$

В начальный момент времени масса m_2 имеет вертикальную скорость v , связанную с наездом на дефект поверхности катания. В системе возникают колебательные процессы, в которых перемещения x_1 и x_2 описываются тригонометрическими функциями. Система решена аналитически, полученные зависимости перемещений (рисунок 6) от времени определяются собственными частотами системы ω_1 , ω_2 и ω_{12} .

Вариации жесткости подрельсового основания, которые вызывают изменение собственной частоты ω_1 более чем в три раза (от 13 до 40 % ω_2), изменяют амплитуду деформаций ε_1 на 10,6 % и ε_2 на 7,6 % (рисунок 7, а). При этом изменение деформаций, вызванных реакцией подрельсового основания, относительно деформаций, определяемых реакцией колеса, не превышает 3 %.

Изменения жесткости k_2 в подсистеме «колесо – рельс» (рисунок 7, б), которые вызывают изменение собственной частоты ω_2 в диапазоне от 160 до 525 % частоты ω_1 , оказывают различное по знаку воздействие на амплитуду деформаций: ε_1 увеличивается на 68 %, ε_2 уменьшается на 61 %.

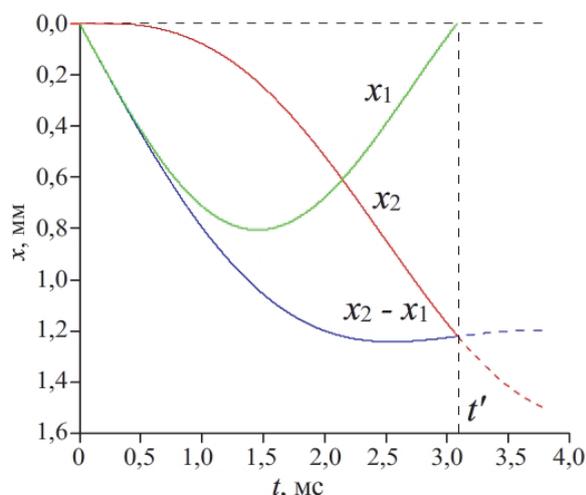


Рисунок 6 – График зависимости рассчитанных перемещений от времени

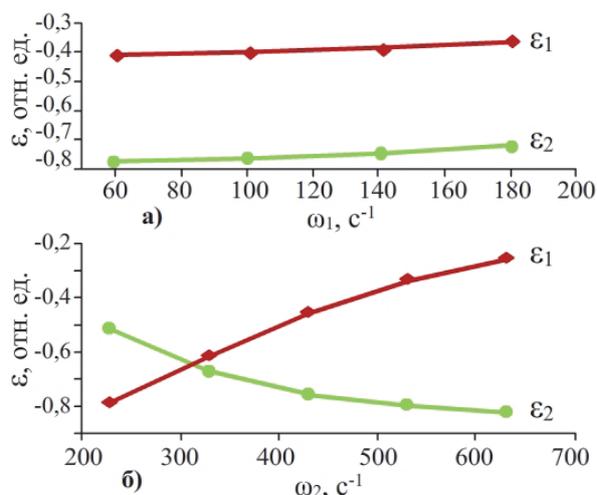


Рисунок 7 – График зависимости амплитуды деформаций ε_1 и ε_2 от частот ω_1 (а) и ω_2 (б)

Временные параметры сигналов тензодатчиков связаны с фазами взаимодействия дефекта поверхности катания колеса и рельса. Выделяются три фазы взаимодействия: наезд на переднюю кромку дефекта, касание дальней кромки дефекта и выезд на бездефектную поверхность колеса. В сигналах деформаций выделяются участки, соответствующие фазам движения. На рисунке 8, а представлен фрагмент сигнала от дефекта и выделены временные отрезки АБ, БВ, ВГ и ГД, определяемые взаимодействием колеса с дефектом поверхности катания и рельса. Длительность переднего фронта t_{AB} связана с протяженностью дефекта с коэффициентом корреляции 0,74.

Силовые характеристики взаимодействия колеса и рельса коррелируют с амплитудными параметрами сигналов симметричных деформаций. Методика оценки силы воздействия основана на сравнении сигналов, возникающих при проезде бездефектного колеса (поз. 1 на рисунке 8, б) и сигналов от дефектного колеса (поз. 2 на рисунке 8, б). Силовое воздействие колес с дефектами характеризуется коэффициентами разгрузки:

$$K_r = \varepsilon_1 / \varepsilon_2, \quad (5)$$

и нагрузки

$$K_n = \varepsilon_3 / \varepsilon_4. \quad (6)$$

Коэффициенты в формулах (5) и (6) количественно описывают приращение деформаций, возникающих от дефектного колеса, относительно деформаций при движении бездефектного колеса. Динамические силы, воздействующие на рельс от колеса с дефектом, определяются как произведение коэффициента нагрузки K_n на половину осевой нагрузки P_0 :

$$F = K_n \cdot P_0 / 2. \quad (7)$$

Коэффициент нагрузки позволяет проводить контроль по схеме сравнения. Импульсная сила, вызванная воздействием колеса, сравнивается силой при нормальном качении бездефектного участка колеса.

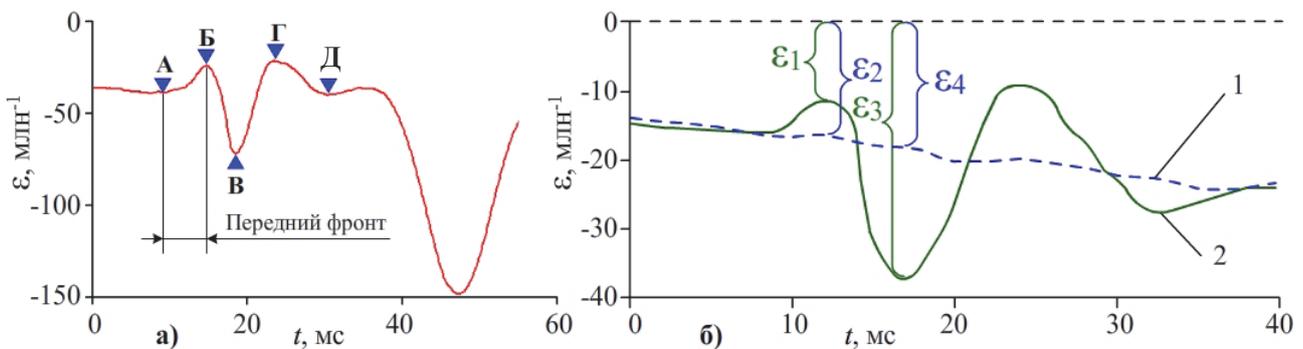


Рисунок 8 – Зависимость сигнала симметричных деформаций от времени при проезде колеса с дефектом поверхности катания: а) фазы движения колеса и временные параметры сигналов; б) амплитудные параметры сигналов

Определение времени локального максимума сигнала от дефекта поверхности катания основано на анализе сигналов симметричных деформаций на нескольких последовательно установленных тензодатчиках. В разработанном алгоритме проводится фильтрация низких частот в сигналах тензометрической системы, что позволяет исключить деформации рельса, связанные с силами реакции колеса и шпалы, изгибом рельса в вертикальной плоскости. Для повышения отношения сигнал/шум после фильтра определяется амплитуда диагностического сигнала равная произведению деформаций на соседних парах тензодатчиков:

$$U_{i,j} = \prod_{k=1}^n \varepsilon_{i,j+k}, \quad (8)$$

где $U_{i,j}$, $\varepsilon_{i,j}$ – амплитуда диагностического сигнала и симметричные деформации в i -й момент времени на j -м канале, отн. ед.; i – номер отсчета АЦП; j – номер канала; n – количество перемножаемых каналов; k – индекс произведения. На

рисунке 9, а представлен исходный сигнал симметричных деформаций, в котором присутствуют сигналы от дефекта поверхности катания. Результаты расчета диагностических сигналов по двум и трем каналам приведены на рисунках 9, б и 9, в соответственно. После получения диагностических сигналов используется пороговый метод, при превышении установленного порога производится поиск локального максимума диагностического сигнала. Время локального максимума сигнала симметричных деформаций считается моментом появления дефекта поверхности катания.

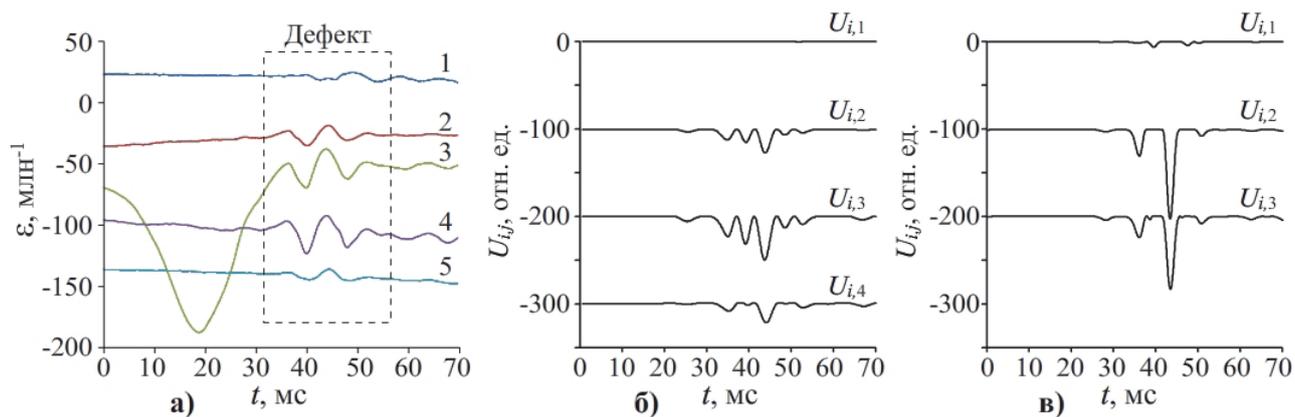


Рисунок 9 – Графики зависимостей симметричных деформаций от времени при движении колеса с дефектом поверхности катания (а), зависимости диагностических сигналов $U_{i,j}$, рассчитанные по двум (б) и трем (в) сигналам с тензодатчиков

Алгоритмы поиска времени локального максимума сигнала от дефекта поверхности катания и анализа его информативных параметров встроены в разработанное специализированное программное обеспечение.

Глава 4 – Результаты эксплуатации системы контроля колес в движении. Представлены результаты калибровки измерительного участка для контроля сил в системе «колесо – рельс», опытной эксплуатации тензометрической системы с разработанным программным обеспечением, статистический анализ полученных экспериментальных данных.

В целях повышения достоверности результатов контроля выполнена калибровка тензометрической системы с использованием динамического (рисунок 10, а) и статического (рисунок 10, б) нагружения. Динамическое воздействие оказывалось специально разработанным ударным устройством (рисунок 10, а), которое свободно падало на поверхность катания рельса с высоты H . Сила определялась по изменению импульса и продолжительности удара, которая фиксировалась с помощью электрической цепи. Статическая сила воспроизводилась гидравлическим домкратом (рисунок 10, б),

устанавливаемым под поперечную балку железнодорожной платформы на расстоянии не менее 4 м от ближайшего колеса.

Коэффициенты преобразования механической силы в вертикальные симметричные деформации, измеряемые между шпалами, при динамическом и статическом нагружении совпадают с точностью до 5 % (рисунок 11, а). Среднее значение коэффициента преобразования составляет $k_{\epsilon} = 1,79 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{Н}^{-1}$.

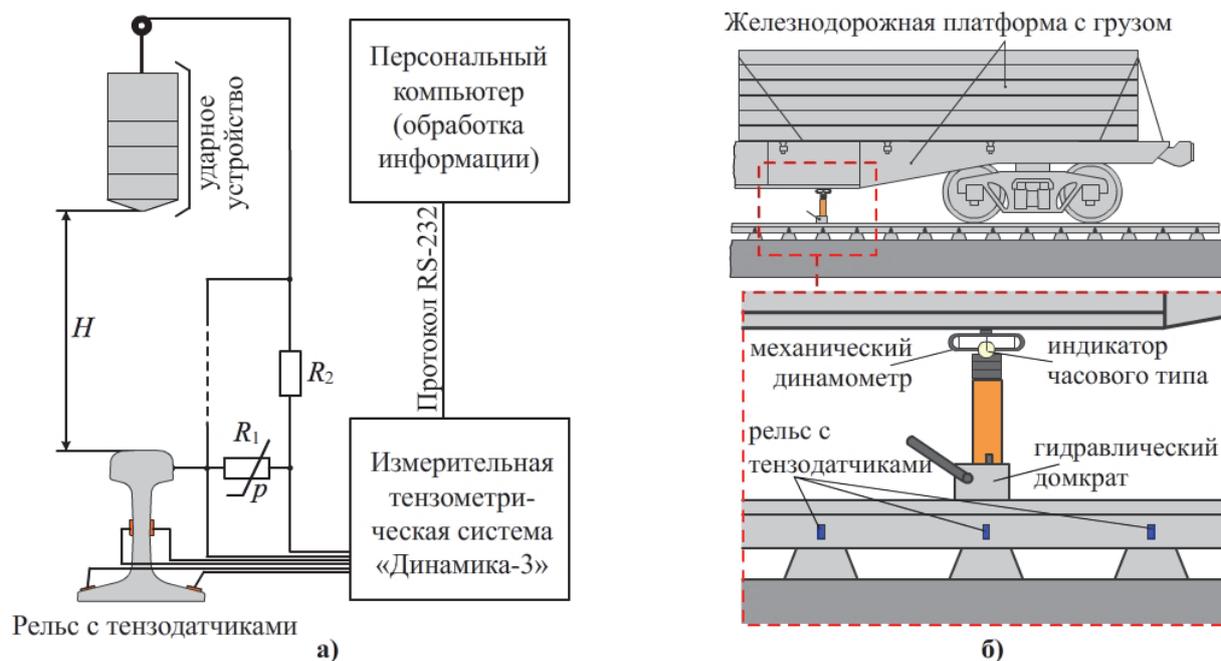


Рисунок 10 – Схема проведения экспериментов по динамическому (а) и статическому (б) нагружению рельса

Для тензодатчиков, установленных над шпалами, статический коэффициент преобразования превышает динамический на 13 % (рисунок 11, б), что превышает границы допустимой погрешности и связано с инерцией подрельсового основания. Коэффициенты пропорциональности составляют $k_{\epsilon} = 2,08 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{Н}^{-1}$ для динамических испытаний и $k_{\epsilon} = 2,38 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{Н}^{-1}$ для статических. Увеличение обоих коэффициентов связано с появлением дополнительной силы – реакции опоры, которая, в свою очередь, оказывает существенно меньшее воздействие при динамическом нагружении.

С использованием разработанного программного обеспечения выполнен контроль сил воздействия подвижного состава на верхнее строение пути. Амплитудное распределение сил, построенное для грузового поезда без учета дефектов поверхности катания, приведено на рисунке 12. Распределения, полученные в различных точках измерительного участка, существенно различаются, так как сила воздействия от колеса на рельс зависит от жесткости подрельсового основания. Средние значения сил в разных сечениях отличаются

на 20 %, а среднее квадратическое отклонение изменяется от 10 до 13 %. Распределение амплитуд динамических сил по критерию Пирсона не принадлежит нормальному распределению с уровнем значимости 5 %.

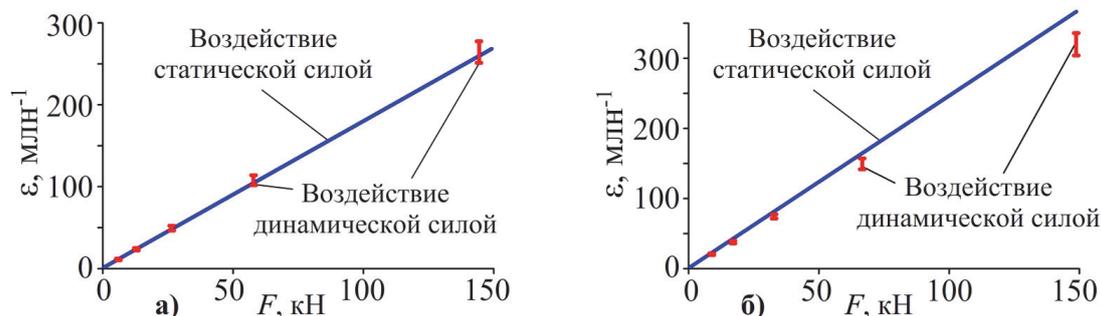


Рисунок 11 – Результаты сравнительного анализа динамического и статического воздействия на рельс между шпалами (а) и над шпалой (б)

В амплитудных распределениях силы на рисунке 12 дифференцируются два локальных максимума, которые связаны с отличием условий движения первых и вторых колес тележки грузового вагона. Первая колесная пара движется по относительно «мягкому» ненагруженному пути и при этом средние значения силы и средние квадратические отклонения составляют 100 кН и 13 кН соответственно. Для второй колесной пары, которая движется по предварительно нагруженному пути, средние значения силы и средние квадратические отклонения составляют 119 кН и 6 кН соответственно.

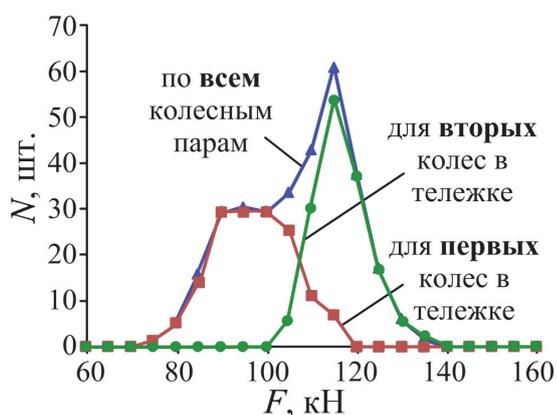


Рисунок 12 – Распределение колесных пар по уровню динамической силы на рельсы в грузовом поезде на расстоянии $y = 3,5$ м от начала измерительного участка

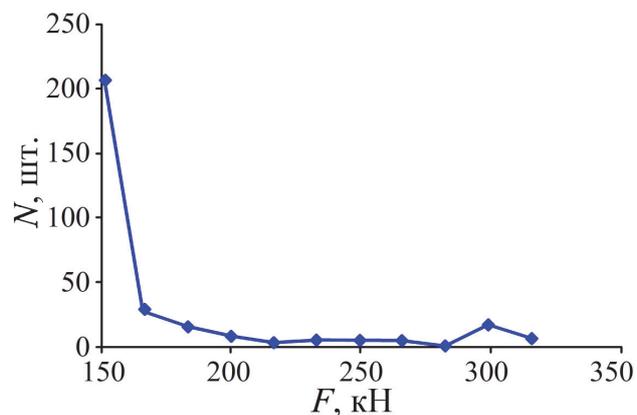


Рисунок 13 – График зависимости количества обнаруженных дефектов от значения динамической силы

Используя полученные экспериментальные данные по 10 поездам, построены средние распределения обнаруженных дефектов по максимальному значению динамической силы (рисунок 13). В области малых значений до 200 кН распределение описывается экспоненциальным законом. В случае

нормального взаимодействия колеса и рельса амплитудное значение силы составляет 100–150 кН и не превышает 200 кН для 90 % колесных пар.

Локальный максимум амплитудного распределения динамической силы в области от 270 до 300 кН содержит около 9 % колесных пар. Все колесные пары, вызывающие динамическое воздействие свыше 270 кН, содержат дефекты поверхности катания, размеры которых вдоль поверхности катания составляют от 30 до 100 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены результаты разработки алгоритмов и программно-технического обеспечения контроля колес вагонов в движении с использованием быстродействующей тензометрии, что позволяет повысить безопасность эксплуатации грузовых вагонов и верхнего строения пути за счет своевременного обнаружения сверхнормативных динамических сил в системе «колесо – рельс».

По итогам диссертационного исследования сформулированы **основные выводы и результаты работы**:

1. На действующем пути создан участок контроля поверхности катания колесных пар протяженностью 5 м, оснащенный тензодатчиками для регистрации вертикальных и продольных деформаций с использованием тензометрической системы «Динамика-3», программное обеспечение которой доработано для синхронизации со штатной аппаратурой контроля гребня колеса «Комплекс-2».

2. Разработано программное обеспечение для автоматизированного определения координат колесных пар на измерительном участке пути, основанное на оптимизированном алгоритме, включающем в себя фильтрацию и корреляционный анализ. Относительная погрешность определения координат колесных пар над тензодатчиками не превышает 0,5 %.

3. Неопределенность параметров подрельсового основания оказывает существенное влияние на результаты измерения вертикальных симметричных деформаций над шпалами (среднее квадратическое отклонение более 13 %). Разработан алгоритм выделения составляющих деформаций, связанных с силой реакции колеса, основанный на методах регрессионного анализа и экстраполяции сигнала и позволивший уменьшить влияние неопределенности подрельсового основания на результаты измерения силы от колеса на рельс до 5 %. Алгоритм реализован в программном обеспечении системы «Динамика-3».

4. С использованием модели формирования диагностических сигналов с двумя упругими элементами, воспроизводящими подсистемы «колесо – рельс» и «рельс – подрельсовое основание», установлено, что неопределенность амплитуды импульсной составляющей деформаций, связанных с воздействием дефектного колеса на рельс вне зоны чувствительности тензодатчика на расстоянии более 90 мм, не превышает 3 % при вариации жесткости подрельсового основания в три раза и более.

5. Для количественной характеристики дефектов по сигналам тензометрической системы предложены информативные параметры: длительность переднего фронта и амплитуда деформаций, связанные корреляционными зависимостями с протяженностью дефекта и динамической силой от колеса на рельс с коэффициентом корреляции 0,83.

6. Разработаны алгоритмы и программное обеспечение для обнаружения и оценки силового воздействия дефектов поверхности катания, основанные на фильтрации сигналов деформаций методом линейной свертки и анализе параметров соседних пар тензодатчиков.

7. Экспериментально установлено, что разница коэффициентов преобразования силы в деформации для тензодатчиков, расположенных между шпалами, в статике и в динамике на частотах до 800 Гц не превышает 2 %. Разработана методика калибровки системы контроля колес статической силой с пределом допускаемой погрешности $\pm 2\%$ ($P = 0,95$).

8. Проведены испытания программного обеспечения в составе системы контроля колес вагонов в движении на базе тензометрической системы «Динамика-3». Динамическое воздействие с силой свыше 280 кН зарегистрировано у 9 % колесных пар, наличие дефектов поверхности катания у которых подтверждено при визуально-измерительном контроле на ПТО.

Разработанные программные алгоритмы и методики определения комплекса информативных параметров сигналов тензометрического контроля могут быть использованы при создании систем контроля технического состояния ответственных конструкций, работающих в условиях динамического нагружения. Предложенные и реализованные алгоритмы фильтрации тензометрических сигналов, основанные на методах математического анализа, достаточно универсальны, и позволяют повысить достоверность измерения динамических сил за счет уменьшения влияния мешающих факторов, например жесткости подрельсового основания.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Статьи в научных изданиях, включенных в перечень, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации**

1. Исследования динамических сил в системе колесо – рельс в процессе движения грузового вагона / С. А. Бехер, **А. О. Коломеец**, Л. Н. Степанова, А. С. Кочетков // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 7. – С. 68–72.

2. Бехер, С. А. Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации / С. А. Бехер, **А. О. Коломеец** // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 3. – С. 110–118.

3. Бехер, С. А. Повышение достоверности контроля колес грузовых вагонов в движении / С. А. Бехер, **А. О. Коломеец** // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 61–68.

4. Тензометрическая система для обнаружения дефектов поверхности катания колес грузовых вагонов / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, С. А. Бехер, **А. О. Коломеец** // Датчики и системы. – 2013. – № 10. – С. 38–44.

Публикации в изданиях, индексируемых в реферативной базе Scopus

5. Bekher, S. A. Calibration methods of force control diagnostic system of a rolling stock on the run / S. A. Bekher, **A. O. Kolomeets** // Journal of Physics: Conference Series, 2016. – Т. 671. – № 1. – P. 012–029.

Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619321. Программа определения силовых показателей динамики взаимодействия колес и рельсов и поиска дефектов поверхности катания колес грузовых вагонов в движении с использованием тензометрии / **Коломеец А. О.**, Попков А. А., Бехер С. А. – № 2013617321 ; заявл. 13.08.2013 ; рег. 01.10.2013. – 1 с.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613124. Определение параметров дефектов поверхности катания колес и динамических характеристик подвижного состава по сигналам тензометрической системы / Бехер С. А., Кабанов С. И., **Коломеец А. О.**, Кучинский К. И., Степанова Л. Н., Тукубаев Н. Т., Харламов Б. М. – № 2014661307 ; заявл. 07.11.2014 ; рег. 05.03.2015. – 2 с.

Публикации в других научных изданиях

8. Бехер, С. А. Параметры диагностических сигналов при контроле колес вагонов с дефектами поверхности катания / С. А. Бехер, **А. О. Коломеец** // Политранспортные системы : материалы VIII Международной научно-технической конференции в рамках года науки Россия – ЕС. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2015. – С. 622–628.

9. **Коломеец, А. О.** Методика обработки первичных сигналов с тензодатчиков при контроле колес грузовых вагонов в движении / А. О. Коломеец // Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций : сборник тезисов VIII Российской научно-технической конференции, Екатеринбург, 26–30 мая 2014 г. – Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2014. – С. 131–132.

10. Оценка достоверности обнаружения дефектов колесных пар железнодорожных транспортных средств в движении тензометрическим методом / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, **А. О. Коломеец**, А. С. Кочетков // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе : сборник докладов Международной научно-практической конференции. Ч. 2. – Новосибирск, 2013. – С. 129–135.

11. Разработка алгоритмов определения информативных параметров сигналов с тензодатчиков для контроля поверхности катания колес грузовых вагонов в движении / С. А. Бехер, **А. О. Коломеец**, Л. Н. Степанова, А. С. Кочетков // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2014. – Вып. 30. – С. 129–136.

12. Разработка комплекса информативных параметров тензометрических сигналов при контроле колес в движении / С. А. Бехер, **А. О. Коломеец**, Л. Н. Степанова, А. С. Кочетков // Планово-предупредительный вид ремонта тягового подвижного состава с учетом его технического состояния : коллективная монография по материалам международной научно-практической конференции «Эксплуатационная надежность подвижного состава», Омск, 18 октября 2013 г. / Под ред. А.Н. Головаша. – Омск, 2013. – С. 215–221.

13. Степанова, Л. Н. Использование быстродействующей тензометрии для контроля поверхности катания колес грузовых вагонов / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, **А. О. Коломеец** // Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты : материалы VIII Международной научно-технической конференции, Санкт-Петербург, июль 2013. – СПб., 2013. – С. 25–26.

КОЛОМЕЕЦ АНДРЕЙ ОЛЕГОВИЧ

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ
КОЛЕС ВАГОНОВ В ДВИЖЕНИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.11.13 – «Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий»

Подписано в печать «19» января 2017 г.
Печ. л. 1,0 Тираж 100 экз. Заказ № 3109
Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО
«Сибирский государственный университет путей сообщения»
Адрес: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191
