

На правах рукописи

Кочетков Антон Сергеевич

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КОНТРОЛЯ ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТИ
КАТАНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ КОЛЕС В ДВИЖЕНИИ ПО
ПОКАЗАТЕЛЯМ ДИНАМИКИ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С РЕЛЬСАМИ

Специальность 05.11.13 - Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2011

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Сибирский государственный университет
путей сообщения» (СГУПС)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Степанова Людмила Николаевна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Елисеев Сергей Викторович

доктор технических наук, в.н.с.
Фурса Татьяна Викторовна

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Омский государственный университет
путей сообщения"

Защита состоится 27 декабря 2011г. в 15.00 часов на заседании совета по
защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.09 при ФГБОУ ВПО
Национальный исследовательский Томский политехнический университет по
адресу: 634028 г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд.215 (актовый зал)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
Национальный исследовательский Томский политехнический университет по
адресу: 634034 г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан ____ноября 2011г.

Ученый секретарь
совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
к.т.н., доцент

Б.Б. Винокуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Одной из причин аварий и крушений грузовых вагонов является разрушение колес, вызванное возникновением концентраторов напряжений при взаимодействии колеса с рельсом. Такие дефекты, как ползуны и выкрашивание поверхности катания вызывают увеличение динамических сил, образующихся при взаимодействии подвижного состава и пути. С одной стороны, это приводит к ускорению износа колес и появлению усталостных трещин, а с другой – оказывает соответствующее негативное влияние на верхнее строение пути. Поэтому подвергающиеся значительным статическим и динамическим нагрузкам колесные пары требуют контроля и особенно – контроля в движении. Своевременное выявление неисправностей колес предотвращает тяжелые последствия и обеспечивает повышение безопасности движения.

На сегодняшний день визуальный осмотр на пункте технического обслуживания (ПТО) является основным методом, при котором выявляются дефекты поверхности катания колес. Однако на достоверность и качество контроля негативно влияет множество факторов. Из-за конструктивных особенностей тележки визуальному осмотру подвергается лишь 75 % окружности колеса, а результат контроля во многом зависит от квалификации осмотрщика, условий проведения контроля, метрологических характеристик используемого оборудования. Появление дефектов на поверхности катания колеса носит случайный характер, что повышает требования к качеству проводимого контроля.

Для контроля поверхности катания колесных пар в движении на зарубежных и российских дорогах получил распространение метод диагностики, основанный на измерении показателей динамики взаимодействия колес и рельсов и сравнении их с критическими значениями (напольные детекторы WCM, Dafur, Scalex Wild, Wild (США), ДДК). В качестве первичных преобразователей в таких системах контроля используются тензодатчики, вибрационные датчики, силоизмерительные датчики и их комбинации. К недостаткам использования силоизмерительных датчиков относят необходимость изменения конструкции пути, так как их выходные сигналы существенно зависят от внешних условий и состояния пути. Силоизмерительные датчики не позволяют достоверно регистрировать быстропротекающие процессы для обнаружения коротких неровностей (ползуны, навары, выщербины). Вибрационные датчики обладают высокой чувствительностью к колебаниям, вызванным ударным воздействием колес с дефектами поверхности катания, но не позволяют регистрировать вертикальные и боковые силы и обладают низкой помехозащищенностью к шумам, возникающему при проскальзывании колесной пары (КП) по рельсу.

В современных условиях развития диагностической и измерительной микропроцессорной аппаратуры первоочередную важность при контроле колес в движении приобретают методические вопросы. Трудности, связанные с выделением в сигнале первичных преобразователей информативных составляющих и оценкой по ним параметров дефекта, до сих пор практически не изучены. Ме-

жду тем реализация методики контроля колес в движении требует полной автоматизации и достаточно высокой точности измерений. Для создания методики необходимо провести анализ ударных воздействий колеса о рельс, применять высокоточную и одновременно высокочастотную тензометрическую аппаратуру, разработать алгоритмы обработки экспериментальных данных, специализированное программное обеспечение, определить связи информативных параметров сигнала с геометрическими размерами и типом дефектов.

Объектом исследования является технология неразрушающего контроля (НК) ходовых частей вагонов в движении.

Предметом исследования является методика обнаружения дефектов поверхности катания колесных пар грузовых вагонов в движении.

Целью работы является разработка методики контроля дефектов поверхности катания железнодорожных колес в движении по показателям динамики их взаимодействия с рельсами.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1) выполнить расчет механических напряжений в модели рельса под поездажной нагрузкой, используя метод конечных элементов для определения оптимальной схемы тензометрических измерений;

2) произвести расчет методических составляющих погрешности косвенных измерений сил в системе «колесо-рельс»;

3) провести исследования свободных колебаний рельса при различных ударных воздействиях, выделить информативные параметры сигналов с тензодатчиков;

4) создать на действующем пути экспериментальный измерительный участок с установленными на рельс тензодатчиками;

5) разработать алгоритмы автоматического обнаружения дефектного колеса по результатам обработки сигналов с тензодатчиков;

6) установить связь геометрических параметров дефекта с информативными параметрами сигналов с тензодатчиков;

7) разработать методику выполнения измерений с использованием быстродействующей тензометрической системы «Динамика-1».

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались математическое моделирование методами конечных элементов, тензометрические измерения, методы математической статистики, корреляционный анализ, анализ погрешностей измерений. Результаты работ обоснованы значительным объемом экспериментальных исследований в лабораторных условиях, на полигоне СГУПС и участке действующего железнодорожного пути. Сделанные выводы не противоречат известным положениям авторов более ранних работ, а результаты настоящего исследования имеют сходимость с данными, полученными при штатном методе контроля дефектов поверхности катания колес.

Научная новизна.

1. Исследовано влияние ударных нагрузок на распространение упругих колебаний в рельсе и определены симметричные и асимметричные моды колебаний рельса.

2. Проведен анализ факторов, оказывающих влияние на точность измерения вертикальных сил при тензометрических измерениях материала рельса, таких как изменение жесткости подрельсового основания, характер движения колеса по рельсу, нарушение геометрии установки тензодатчиков и т.д. Выполнена количественная оценка вносимых ими погрешностей.

3. Предложены и апробированы различные методики автоматической обработки в режиме реального времени результатов измерений с последующим определением дефектной колесной пары грузового вагона и ее порядкового номера в составе.

4. Рассчитан и экспериментально подтвержден критерий браковки колесных пар по предельно допустимому размеру. Разработана методика браковки дефектных колесных пар в движении.

Практическая значимость работы.

По результатам работы подготовлена и реализована комплексная методика, позволяющая с использованием быстродействующей тензометрии в процессе движения грузового состава осуществлять обработку и представление измерительной информации, поступающей с тензодатчиков, наклеенных на рельс. Регистрируемые быстродействующей микропроцессорной тензометрической системой сигналы позволяют в реальном времени в процессе движения железнодорожного состава определять наличие дефектов поверхности катания колесных пар и оценивать степень их опасности. Разработана методика определения номера дефектной колесной пары в движении

На защиту выносятся:

1) результаты исследований упругих колебаний в материале рельса, вызванных ударным воздействием на его поверхности катания, позволяющие установить частоту, коэффициент затухания и классифицировать колебания на симметричные и асимметричные моды;

2) количественная оценка факторов, оказывающих влияние на точность измерения вертикальных сил при тензометрических измерениях материала рельса, таких как изменение жесткости подрельсового основания, характер движения колеса по рельсу, нарушение геометрии установки тензодатчиков и т.д. Расчет с учетом этих факторов суммарной методической погрешности измерения вертикальных сил, передаваемых от колеса к рельсу;

3) разработка методики контроля дефектных колесных пар грузового вагона в движении и определение их порядкового номера в составе поезда по анализу информативных составляющих сигналов с тензодатчиков;

4) расчет критериев браковки по предельно допустимым геометрическим параметрам дефектов КП и их экспериментальное подтверждение при движении КП на ПТО ВЧД-6 станции Инская Западно-Сибирской железной дороги.

Апробация работы. Основные результаты работы доложены на VII-ой Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона», Новосибирск, 2006 г., Международной научно-практической конференции посвященной 75-летию Сибирского государственного университета

путей сообщения «Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе. Кадровое и научно-техническое обеспечение процессов интеграции в мировую транспортную систему», Новосибирск, 2007 г., конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды», Новосибирск, 2009 г., VI Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы», Новосибирск, 2009 г., Всероссийской научно-технической конференции «Качество и инновации – основа современных технологий», Новосибирск, 2010 г., V-ой Российской научно-технической конференции «Ресурс и диагностика материалов и конструкций», Екатеринбург, 2011 г.

Публикации. По результатам работы опубликовано 5 статей в центральных научно-технических журналах включенных ВАК РФ в перечень периодических изданий для кандидатских диссертаций, получен патент РФ, при участии автора написано 3 отчета по НИР, в издательстве «Наука» в соавторстве опубликована книга.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 123 страницах, включает в себя 4 таблицы, 66 рисунков, состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 98 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен анализ работ по контролю дефектов колесных пар (КП) в движении, подтверждающий актуальность темы диссертации, сформулированы основные задачи и положения, выносимые на защиту.

В первой главе освещены основные причины появления дефектов поверхности катания колес, дается обоснование их значительного влияния на эксплуатационную надежность подвижного состава. Острая необходимость своевременного изъятия колес с поверхностными дефектами объясняется рядом факторов: появление и развитие поверхностных дефектов до критических параметров носит случайный характер и является причиной негативного воздействия на путь, а в ряде случаев и его разрушения.

Рассматриваются основные работы, как в нашей стране, так и за рубежом, направленные на создание автоматизированных комплексов для обнаружения и регистрации неисправностей подвижного состава и дефектов поверхности катания. Использование данных комплексов (напольные детекторы WCM, Dafur, Scalex Wild, Wild, ДДК) подтверждается рядом преимуществ (уменьшение износа подвижного состава и пути за счет выявления поверхностных дефектов колес и их ликвидации на ранней стадии развития, снижение вероятности схода подвижного состава, уменьшение временных затрат на диагностику при контроле подвижного состава в движении, исключение нарушений эксплуатационной работы при отсутствии неисправностей и т.д.).

Во второй главе приводится исследование механических напряжений в рельсе под поездной нагрузкой. Разработанная конечно-элементная модель участка рельсового пути (рис.1) длиной 2 м (средний размер тетрагональных

элементов 6 мм, минимальный 1,9 мм) позволила провести исследования деформаций в рельсе под действием вертикальных и боковых сил с различными условиями жесткости пути (от 140 до 300) МПа. Воздействия шпал на рельсы имитировались упругими граничными условиями, приложенными к подошве рельса. На торцах рельса устанавливали зеркально симметричные граничные условия. Вертикальную силу Q прикладывали на поверхность катания, а боковую силу Y_b – к рабочей грани головки рельса.

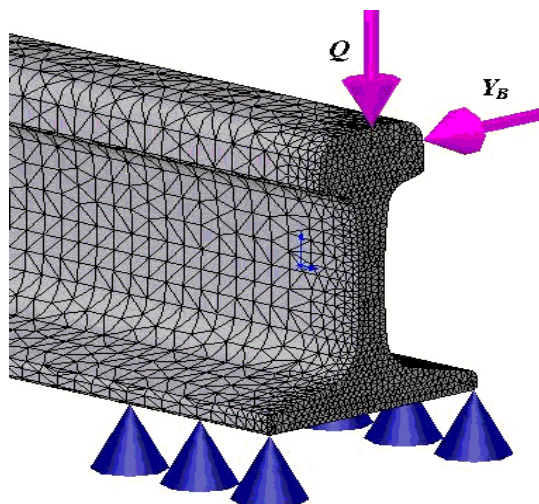
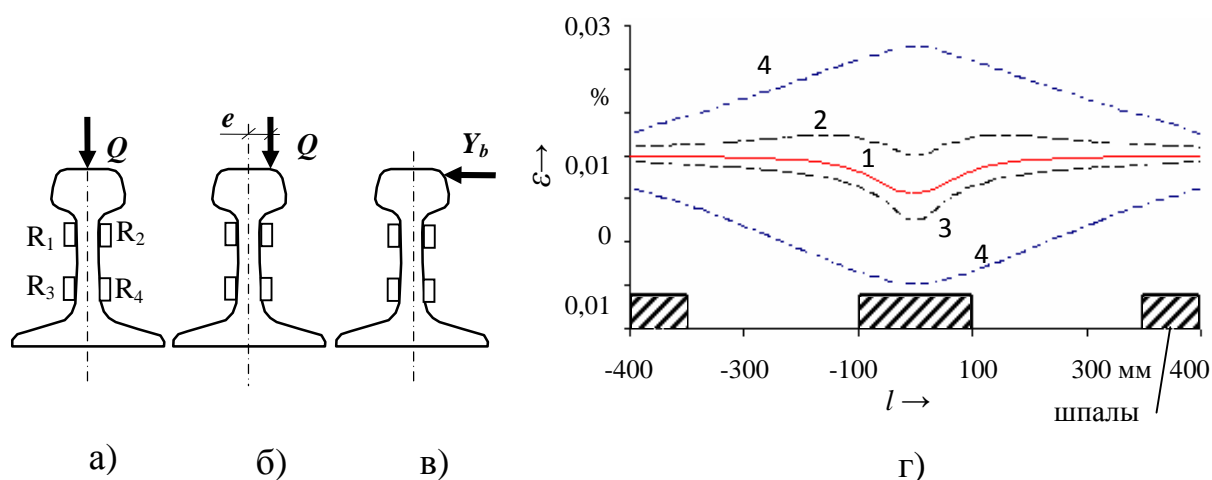


Рис. 1 – Вид конечно-элементной модели рельса

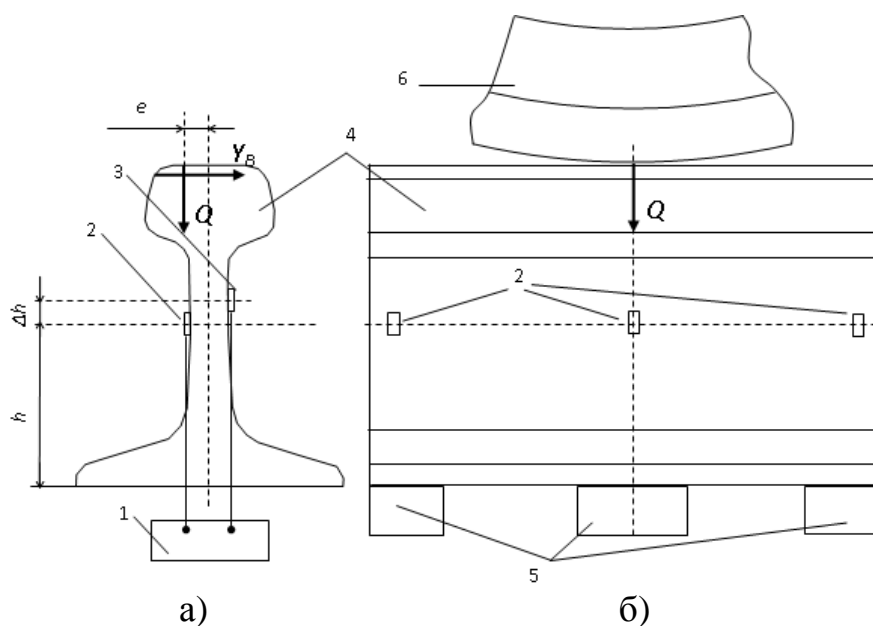
В процессе исследований был выполнен расчет механических напряжений для трех характерных случаев приложения нагрузки. Результаты исследований, помещенные на рис. 2, а, соответствуют симметричному приложению вертикальной нагрузки Q , а рис. 2, б – приложению вертикальной нагрузки Q с эксцентриситетом e . На рис. 2, в показано воздействие боковой силы Y_b .

В процессе исследований был выполнен расчет механических напряжений для трех характерных случаев приложения нагрузки. Результаты исследований, помещенные на рис. 2, а, соответствуют симметричному приложению вертикальной нагрузки Q , а рис. 2, б – приложению вертикальной нагрузки Q с эксцентриситетом e . На рис. 2, в показано воздействие боковой силы Y_b .



1 – деформации при приложении силы по схеме а; 2 и 3 – деформации при приложении силы по схеме б; 4 – деформации при приложении силы по схеме в

Рис. 2 - Расчет механических напряжений для трех характерных случаев приложения нагрузки: а, б – приложение вертикальной силы Q на поверхность катания рельса; в – приложение боковой силы Y_b ; г – зависимость вертикальных деформаций середины шейки рельса от продольной координаты приложения силы.



1 – тензосистема; 2, 3 – тензодатчик; 4 – рельс; 5 – шпалы; 6 - колесо

Рис. 3 - Схема расположения тензодатчиков на рельсе: а – вид с торца; б – вид сбоку

Для расчета методической составляющей проведены исследования вертикальных сил, измеренных по методу Шлупфа. На рис.3 приведена вертикальная сила Q и схема расположения тензодатчиков 2, 3 на рельсе 4 над центром каждой шпалы 5. На участке бесстыкового прямолинейного пути длиной 3,4 м измерялись силы в десяти точках. Тензодатчики устанавливались на расстоянии не более 0,4 м. Измерение вертикальных деформаций проводилось на участке шейки рельса с наименьшей толщиной на высоте $h = 82$ мм от подошвы.

При движении колеса по измерительному участку пути регистрировались сигналы с тензодатчиков, расположенных на внутренней ($U_{вн}(t)$) и наружной ($U_{нар}(t)$) сторонах колеи, и определялись деформации материала. В каждый момент времени t вычислялись деформации шейки рельса, пропорциональные вертикальной силе $e_Q(t)$ и изгибающему моменту $e_B(t)$:

$$e_Q(t) = \frac{e_{нар}(t) + e_{вн}(t)}{2},$$

$$e_B(t) = \frac{e_{нар}(t) - e_{вн}(t)}{2},$$

где $e_{вн}(t)$, $e_{нар}(t)$ – деформации, измеряемые тензодатчиками, расположенными симметрично на внутренней и наружной сторонах шейки рельса, млн^{-1} .

Для момента времени t_0 , соответствующего прохождению колеса над тензодатчиками, определялась деформация шейки рельса $e_{Q0} = e_Q(t_0)$ и рассчитывалась вертикальная сила, действующая на рельс:

$$Q = k_0 \cdot e_{Q0},$$

где k_0 - коэффициент пропорциональности, определяемый экспериментально при воздействии на рельс подвижного состава с известной осевой нагрузкой, Н/млн⁻¹.

Методическая составляющая погрешности измерения вертикальной силы Q связана с вариацией коэффициента пропорциональности k_0 , который зависит от средней жесткости подрельсового основания U_{z0} , эксцентриситета e приложения вертикальной силы, боковой силы Y_B , высоты h от подошвы рельса, на которой выполняется наклейка тензодатчиков, несимметричности Δh установки тензодатчиков друг относительно друга:

$$k_0 = j(e, Y_B, U_{z0}, h, \Delta h).$$

Погрешность измерения вертикальной силы, связанная с влиянием боковой силы, равной 40 кН, составила 0,4 %. Погрешность, вызванная влиянием эксцентриситета, равного 24,4 мм, составила 0,7 %. Изменение жесткости подрельсового основания на 40 % вызывает погрешность, равную 0,4 %. Несимметричная установка тензодатчиков по высоте на 1,9 мм, приводит к погрешности от 1 % до 2 % (в зависимости от первоначальной установки тензодатчиков).

Исследования свободных колебаний рельса на участке пути общей длиной 10 м с наклеенными с двух сторон рельса тензодатчиками, позволили определить модовый состав колебаний. Коэффициент корреляции рассчитывался для сигналов с тензодатчиков, расположенных вертикально на одной и на противоположных сторонах шейки рельса (рис.4, а, б). Гистограмма, представленная на рис.4, а, показывает, что тензодатчики, расположенные на одной стороне шейки рельса, имеют всегда положительный коэффициент корреляции, близкий к единице. Это означает, что сигналы, поступающие с тензодатчиков в быстродействующую тензосистему «Динамика-1», находятся в одной фазе. График, показанный на рис.4, б, подтверждает, что тензодатчики, расположенные на разных сторонах шейки рельса, имеют как положительный, так и отрицательный коэффициенты корреляции. Это свидетельствует о том, что сигналы, поступающие с тензодатчиков, могут находиться как в фазе, так и в противофазе. При этом отношение вероятности обнаружения симметричной моды колебаний почти в два раза меньше асимметричной.

В результате исследований установлено, что ударные воздействия на поверхность катания рельса могут возбуждать упругие затухающие колебания с частотой 1,34 кГц. При этом амплитуда колебаний экспоненциально убывает во времени с постоянной времени 1,1 мс. Исследуемые колебания могут содержать как симметричные, так и асимметричные моды, классификация которых выполняется по коэффициенту корреляции сигналов с противоположных сторон шейки рельса. Симметричные колебания ($K_r = 1$) возбуждаются при ударе вблизи плоскости симметрии рельса $|y| \leq 12$ мм, а асимметричные колебания - при ударе с эксцентриситетом $|y| > 12$ мм и связаны с изгибом рельса.

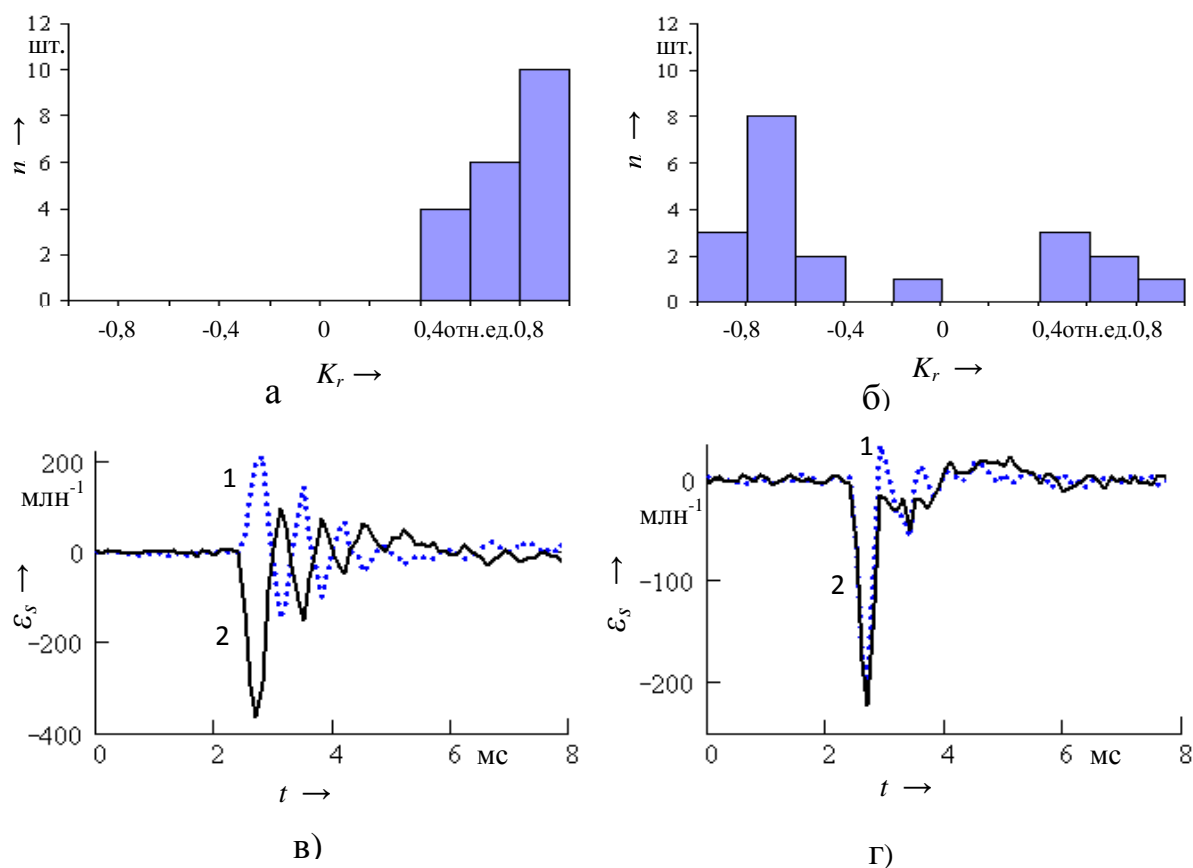
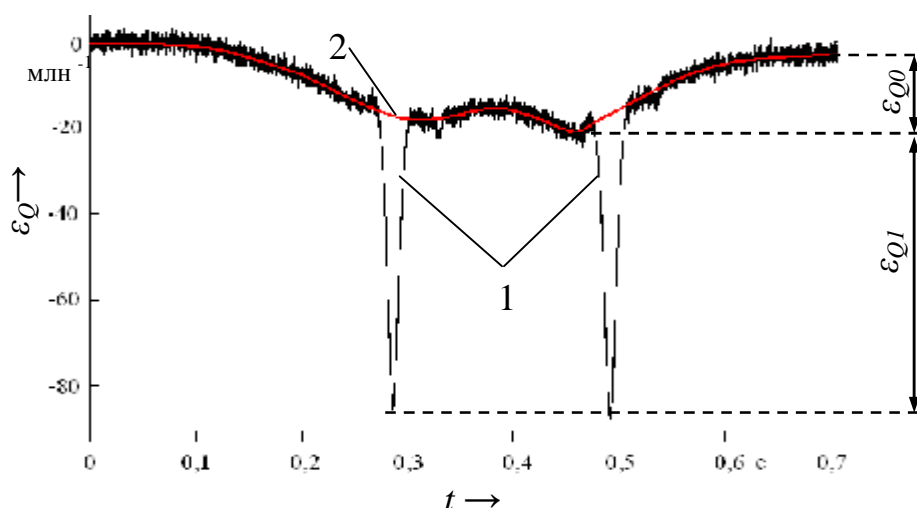


Рис. 4 – Экспериментальные зависимости числа сигналов от коэффициентов корреляции сигналов с тензодатчиков: а - расположенных на одной стороне рельса; б - на противоположных сторонах рельса; в - с двух тензодатчиков в противофазе; г - с двух тензодатчиков в фазе

В третьей главе рассматриваются информативные параметры сигналов с тензодатчиков. Установлено что в сигнале симметричных деформаций наблюдаются две составляющие. Первая составляющая – отрицательные пики (кривая 1 на рис.5) связана с деформированием материала шейки рельса непосредственно под колесом. Материал данной области шейки рельса участвует в передаче деформаций от пятна контакта к рельсошпальной решетке. Вторая составляющая (кривая 2 на рис. 5) связана с общим изгибом рельса от проходящего поезда. Использование аппроксимации методом наименьших квадратов позволило в сигнале симметричных деформаций отделить составляющую сигнала, связанную с деформированием материала шейки рельса непосредственно под колесом, от составляющей, вызванной общим изгибом рельса.



1 – пики деформаций рельса под колесом ε_{Q1} ; 2 – деформации, связанные с общим изгибом рельса от подвижного состава ε_{Q0}

Рис. 5 – Зависимость симметричных деформаций от времени при прохождении двух колес вагона над парой тензодатчиков

Проявление в сигнале дополнительной высокочастотной составляющей объясняется ударным воздействием о рельс колеса с дефектом поверхности катания. Ее расположение в сигнале определяется местом удара относительно зоны установки датчика, что влияет на амплитуду деформаций воспринимаемых датчиком. В первом случае колесо воздействует дефектом в зоне чувствительности датчика (рис. 6, а). Во втором случае это воздействие произойдет до или после, т.е. вне зоны чувствительности отдельного тензодатчика (рис. 6, б).

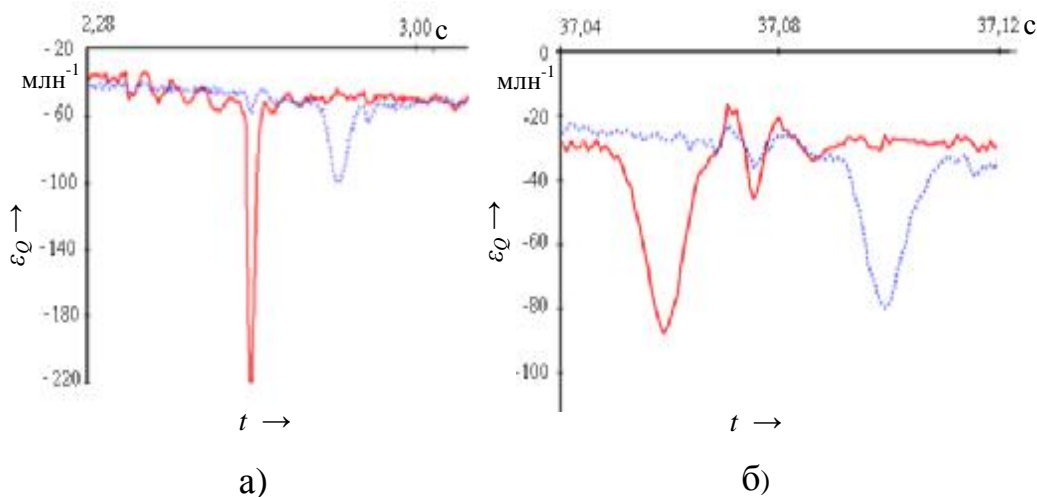


Рис. 6 – Зависимость симметричных деформаций ε_Q от времени t полученных с двух пар тензодатчиков при прохождении колеса с дефектом в зоне первой пары тензодатчиков (а) и между зонами первой и второй пары тензодатчиков (б)

Задача определения дефектного колеса состоит в выделении ударной составляющей на фоне всего сигнала. Для ее решения был создан эталонный сигнал от дефекта (рис. 7), в качестве которого выбрана следующая функция:

$$f_{cor} = -\cos\left(\frac{(1 - T \cdot 0.25) \cdot D \cdot p}{T}\right), \quad (1)$$

где T – период эталонной функции дефекта, единицы отсчета аналого-цифрового преобразователя (АЦП); D – коэффициент длительности эталонной функции дефекта, единицы отсчета АЦП.

Далее вычисляют коэффициенты корреляции эталонного сигнала от дефекта с симметричными деформациями от двух соседних пар тензодатчиков $F1_{cor}$ и $F2_{cor}$, с шагом в одну единицу отчета (рис. 8). Коэффициент корреляции функции эталонного сигнала от дефекта (f_{cor}) с симметричными деформациями от одной пары тензодатчиков (Uk), где k – порядковый номер пары тензодатчиков, находится по формуле:

$$Fk_{corj} = \frac{\sum_{i=0}^{m-1} [(Uk_{i+j} - \hat{U}k_{i+j}) \cdot (f_{cori} - \hat{f}_{cor})]}{m \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{m-1} [Uk_{i+j} - \hat{U}k_{i+j}]^2}{m}} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{m-1} [f_{cori} - \hat{f}_{cor}]^2}{m}}}, \quad (2)$$

где m – диапазон переменной функции эталонного сигнала дефекта, ед. отсчета; j – переменная симметричных деформаций от пары тензодатчиков, ед. отсчета; i – переменная функции эталонного сигнала дефекта, ед. отсчета.

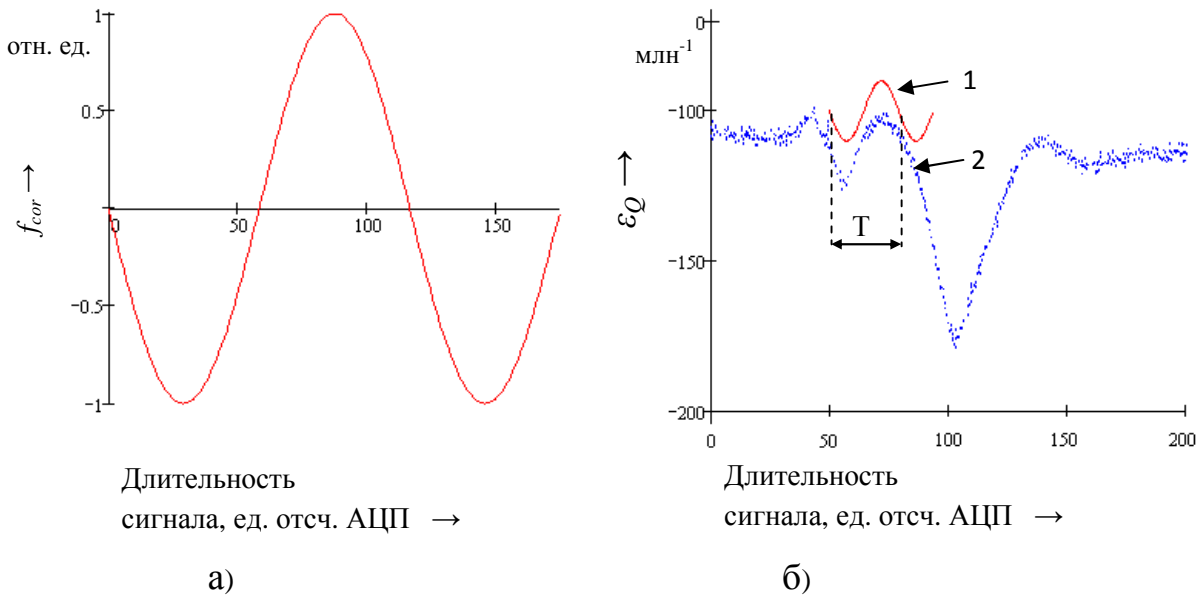


Рис. 7, а – вид эталонного сигнала дефекта; б – совмещение эталонного сигнала дефекта (1) и ударной составляющей сигнала от датчика (2)

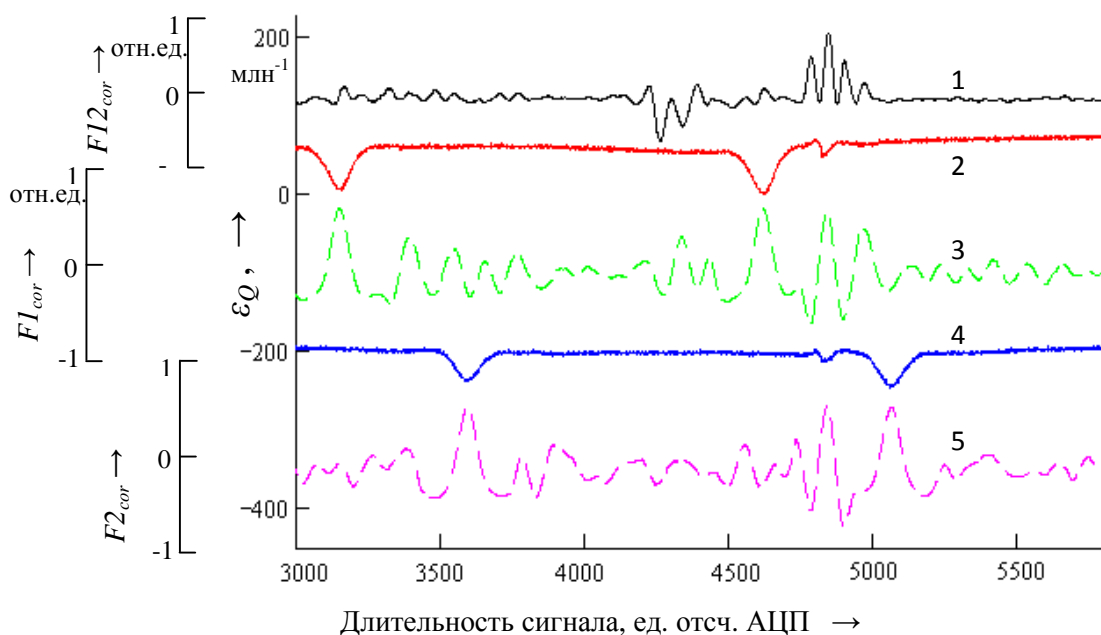


Рис. 8 – Графики симметричных деформаций от 1 и 2 пары тензодатчиков (кривые 2 и 4), их корреляционные зависимости $F1_{cor}$ и $F2_{cor}$, (кривые 3 и 5), с эталонным сигналом дефекта, и произведение корреляционных зависимостей $F12_{cor}$ (кривая 1)

Рассчитывают произведение коэффициентов корреляции эталонной функции с симметричными деформациями от двух смежных пар тензодатчиков $F12_{cor} = F1_{cor} \cdot F2_{cor}$ (рис. 8). Для двух смежных пар тензодатчиков появление деформаций, вызванных прохождением колеса, сдвинуто по времени в зависимости коэффициента корреляции $F12_{cor}$ от времени. При этом исключаются максимумы в моменты прохождения колес, а значение коэффициента в момент регистрации дефектной составляющей возрастает.

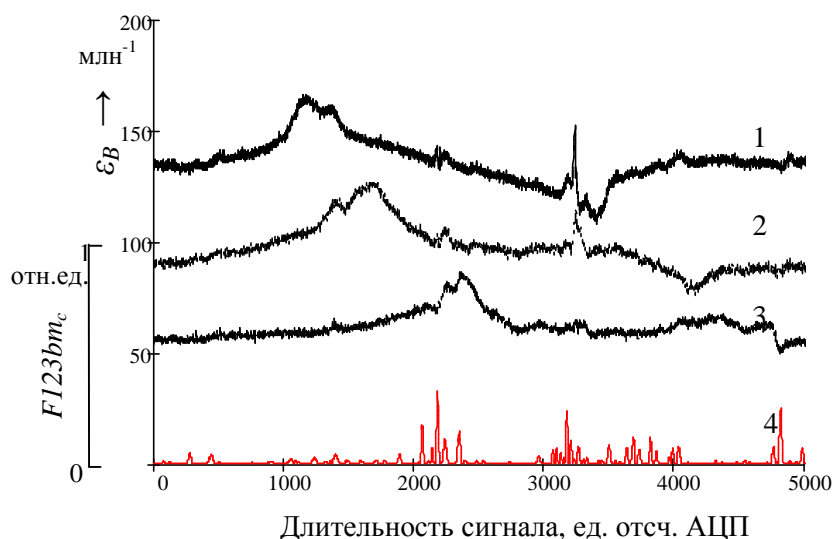


Рис. 9 – Графики асимметричных деформаций от 1, 2 и 3 пары тензодатчиков (кривые 1, 2, 3) и абсолютное значение произведения их корреляционных зависимостей с эталонным сигналом дефекта $F123bm_{cor}$ (кривая 4)

Применение данного способа возможно как при обработке симметричных, так и асимметричных деформаций. При этом эффективность обнаружения дефекта зависит от количества пар тензодатчиков, участвующих в обработке (при условии одновременной регистрации ими ударного воздействия (рис. 9)).

В четвертой главе приведен расчет показателей достоверности методики обнаружения дефектов поверхности катания и результаты испытаний.

Для оценки достоверности методики контроля были выбраны два показателя:

- вероятность недобраковки, т.е. вероятность пропуска дефекта, размер которого превышает максимально допустимый;
- вероятность перебраковки, т.е. вероятность браковки колеса при условии, что размеры дефекта на его поверхности не превышают максимально допустимых.

Выбрав в качестве порогового значения амплитуду $\Delta \varepsilon_{Вкр}$, вероятность недобраковки дефекта размером h_{δ} вычислим, как вероятность регистрации пика деформаций при условии, что его амплитуда меньше порогового значения для данного дефекта:

$$P_1(\Delta \varepsilon_{Вкк}, h_{\delta}) = \int_0^{\Delta \varepsilon_{Вкк}} P_{\delta}(x, h_{\delta}) dx. \quad (3)$$

Для оценки вероятности перебраковки дополнительно провели исследования распределения допустимых размеров дефектов поверхности катания. Вероятность перебраковки дефекта определим, как интеграл условной вероятности превышения пиком асимметричных деформаций порогового значения при условии, что размер дефекта не превышает максимально допустимого $h_{\delta кр}$:

$$P_2(\Delta \varepsilon_{Вкк}) = n_{\delta} \cdot \int_0^{h_{\delta кр}} \int_{\Delta \varepsilon_{Вкк}}^{+\infty} P_{\delta}(x, h_{\delta}) \cdot P_h(h_{\delta}) dx dh_{\delta}, \quad (4)$$

где n_{δ} – доля колес с допустимыми дефектами поверхности катаниями, отн. ед.

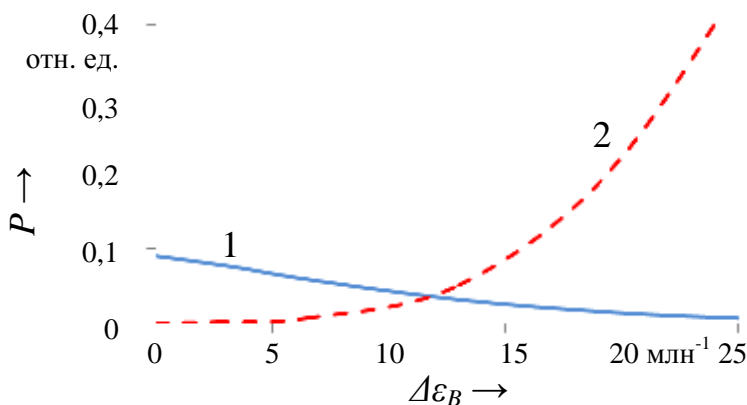


Рис. 10 – Зависимость вероятности перебраковки (1) и недобраковки (2) от порогового уровня

Используя формулы (3), (4), рассчитали вероятности перебраковки и недобраковки колес грузовых вагонов. Результаты расчетов в виде графических зависимостей от порога асимметричных деформаций представлены на рис. 10. Вероятность недобраковки приведена для дефекта с минимально допустимой глубиной $h_0 = 1$ мм. Для значения порога $\Delta \varepsilon_{Bkp} = 6,5$ млн⁻¹ вероятность недобраковки составит $P_1 = 0,007$ отн.ед., а перебраковки $P_2 = 0,07$ отн.ед.

Данные значения вероятностей получены при условии, что длина измерительного участка равна длине окружности колеса, а дефект воздействует на рельс один раз. При увеличении длины участка до m длин окружностей колеса $L = m \cdot \pi \cdot D$ вероятности рассчитываются по формулам:

$$P_{1,m} = (P_1)^m, \quad (5)$$

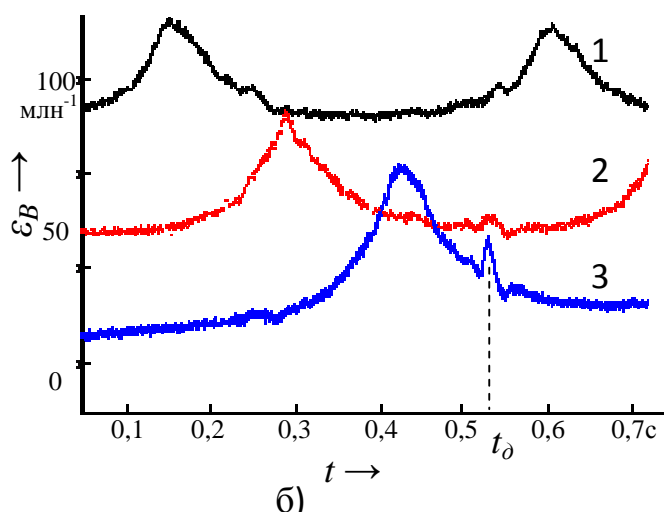
$$P_{2,m} = m \cdot P_2. \quad (6)$$

Конкретные значения вероятностей перебраковки и недобраковки определяются заказчиком в техническом задании исходя из соображений экономической целесообразности. Для обеспечения установленных вероятностей выбирают пороговое значение по рис. 10 и длину измерительного участка по формулам 5 и 6.

В реальных условиях эксплуатации провели сравнительные испытания тензометрического метода и визуального осмотра поверхности колесных пар после остановки на ПТО двух грузовых составов. При осмотре на ПТО фотографировали дефект и отмечали в протоколе его тип, размеры вдоль и поперек поверхности катания. Фотография одного из дефектов и дефектограмма сигналов с тензодатчиков приведены на рис. 11.



а)



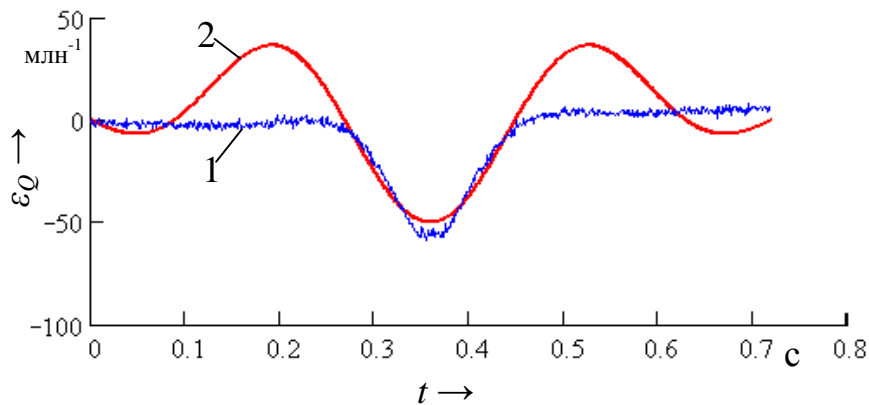
б)

Рис. 11, а - фотография ползуна на 2 колесе 43 вагона грузового поезда №2; б - зависимость асимметричных деформаций от времени, где цифрами 1,2,3 указаны номера каналов тензосистемы; t_0 - момент удара дефекта колеса о рельс

Методика определения порядкового номера колесной пары в составе поезда основана на подсчете колесных пар, пройденных через измерительный участок. Поэтому для ее достоверной работы необходимы алгоритмы, позволяющие обнаруживать в сигнале составляющую от прохождения колеса над тензодатчиком с вероятностью ошибок первого и второго рода не более 10^{-6} . Это значение вероятности соответствует одной ошибке в расчете номера колесной пары из 2000 поездов.

Для повышения отношения сигнал/помеха предлагается провести фильтрацию сигнала в узкой полосе частот.

Фильтрация выполняется расчетом коэффициента корреляции сигнала с эталонной функцией. Эталонная функция выбирается на поле периодических затухающих колебаний таким образом, чтобы обеспечить максимальное значение коэффициента корреляции с пиками сигнала симметричных деформаций от бездефектного колеса и минимальное значение с остальными составляющими сигнала. На рис.12 показаны эталонная функция 2 и сигнал от симметричных деформаций 1.



1 – симметричные деформации; 2 – эталонная функция

Рис.12 – Зависимость симметричных деформаций и эталонной функции от времени

Момент времени прохождения колеса над тензодатчиком рассчитывается по превышению коэффициентом корреляции порогового уровня. Для участка корреляционной функции, превышающей пороговый уровень, определяется момент времени достижения максимального значения. Каждое превышение порога изменяет номер колесной пары на единицу. На рис.13 показана зависимость симметричных деформаций от времени и номера колесной пары.

Для повышения достоверности определения номера колесной пары необходим комплексный анализ сигналов со всех N_t пар тензодатчиков, установленных в пути. При вероятности ошибки в определении колесной пары по одному каналу P_1 , вероятность события, при котором возникнет ошибка на $N_t/2$ парах тензодатчиков составляет:

$$P\left(\frac{N_t}{2}\right) = \prod_{i=0}^{\frac{N_t}{2}} (N_t - i) \cdot P_1^{\frac{N_t}{2}} \cdot (1 - P_1)^{\frac{N_t}{2}}, \quad (7)$$

где N_t – количество пар тензодатчиков в пути; P_1 – вероятность ошибки с номером колесной пары по показаниям одной пары тензодатчиков, отн. ед.

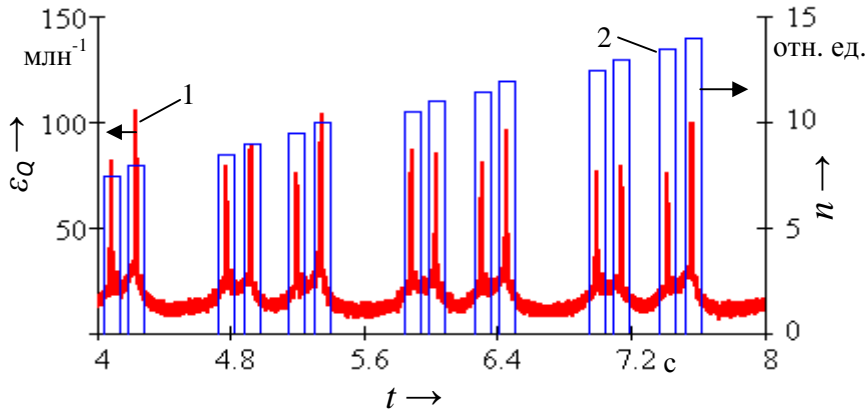


Рис. 13 – Сигнал симметричных деформаций (1) и номер КП (2)

Для $N_t = 10$ пар тензодатчиков и условии $P_1 \ll 1$ формула (7) примет вид:

$$P\left(\frac{N_t}{2}\right) = 1.5 \cdot 10^5 \cdot P_1^{\frac{N_t}{2}}.$$

Следовательно, для достоверного определения номера колесной пары по 10 парам тензодатчиков с вероятностью ошибки не более 10^{-6} вероятность ошибки по одной паре тензодатчиков не должна превышать $P_1 < 0,006$.

При превышении симметричными деформациями (рис.14,а) первого порога селекции ε_{nop1} , что соответствует прохождению колеса над тензодатчиком, изменяют номер m_a (рис. 14,б) колесной пары на единицу:

$$m_a = m + 1,$$

где m – номер предыдущей колесной пары.

Затем определяют скорость движения поезда по разности времен прохождения колеса над соседней парой тензодатчиков:

$$V = L_{n+1,n} / (t_{n+1,m} - t_{n,m}),$$

где $L_{n+1,n}$ – расстояние между $(n+1)$ -ой и n -ой парами тензодатчиков; $t_{n+1,m}$, $t_{n,m}$ – времена прохождения m -ой колесной пары над $(n+1)$ -ой и n -ой парами тензодатчиков.

Проводят частотную фильтрацию асимметричных деформаций в диапазоне частот от 80 % до 120 % собственной частоты асимметричных колебаний. В процессе прохождения колесной пары над каждой m -ой парой тензодатчиков определяют максимумы асимметричных деформаций, превышающие второй порог селекции ε_{nop2} (рис. 14,в). При обнаружении превышения второго порога селекции проверяют наличие максимумов деформаций на $(m+1)$ -ой паре тензо-

датчиков. При наличии совпадения максимумов, свидетельствующего об ударном воздействии, определяют максимальное значение асимметричных деформаций и определяют продольный размер дефекта по поверхности катания:

$$e_{nop1} = 61,5 \frac{e_{fr}}{e_{nop2}},$$

где e_{nop2} – второй порог асимметричных деформаций, млн^{-1} ; e_{fr} – максимальное значение асимметричных деформаций при прохождении колеса с дефектом, млн^{-1} .

Апробация методики контроля колесных пар грузовых вагонов в движении с колесными парами РУ1-950 и РУ1Ш-950 (диаметр нового колеса по кругу катания $D = 0,95$ м) проведена на Западно-Сибирской железной дороге на 32 км 0 пикета нечетного пути направлением из ст. Крахаль на ст. Инская прямолинейном бесстыковом пути с плотностью укладки шпал $n_0 = 2000$ шт/км при ширине шпал по верхнему основанию $H = 0,2$ м и рельсами типа Р65.

Минимальная рассчитанная длина измерительного участка составила:

$$L = m \cdot 3,14 \cdot D = 2,5 \cdot 3,14 \cdot 0,95 = 7,46 \text{ м},$$

$$m = \frac{10^3}{H_0 \cdot n_0} = 2,5 \text{ шт/км}.$$

На участке длиной 7,5 м на высоте $H = 82$ мм от подошвы на шейке рельса над центрами каждой из 15 шпал были наклеены 30 пар тензодатчиков.

По измерительному участку пропускали поезд с известной осевой нагрузкой $P = 220$ кН. Минимальное значение максимумов деформаций составило $e_{Qmin} = 80,2 \text{ млн}^{-1}$, первый порог установили равным:

$$e_{nop1} = 0,5 \cdot e_{Qmin} \cdot \frac{P_0}{P} = 0,5 \cdot 80,2 \cdot \frac{220}{220} = 40,1 \text{ млн}^{-1}$$

В соответствии с правилами технической эксплуатации железных дорог РФ минимальная глубина допускаемого дефекта поверхности катания составляет 1 мм. Максимальная скорость движения поездов $v_{max} = 110 \text{ км/ч} = 30,6 \text{ м/с}$ на данном участке, а длительность свободных колебаний в рельсе составляет $\tau = 0,0011$ с, поэтому минимальная длина искусственной неровности составила:

$$l = v_{max} \cdot \tau = 30,6 \cdot 0,0011 = 0,0336 \text{ м}.$$

Для определения второго порога на рельс устанавливали пластину толщиной 0,5 мм и длиной 0,250 м. По рельсу пропускали поезд с бездефектными колесами с осевой нагрузкой $P = 220$ кН и одновременно регистрировали сигналы с тензодатчиков. Зависимость асимметричных деформаций от времени фильтровали в диапазоне частот от 1,1 до 1,6 Гц. Максимальные значения асимметричных деформаций от прохождения по неровности 40 колесных пар 10 вагонов приведены в таблице 1. Второй порог установили равным среднему значению по всем измерениям $e_{nop2} = 324 \text{ млн}^{-1}$.

Всего в результате контроля в 28 поездах обнаружено 8 дефектов, результаты контроля приведены в таблице 2.

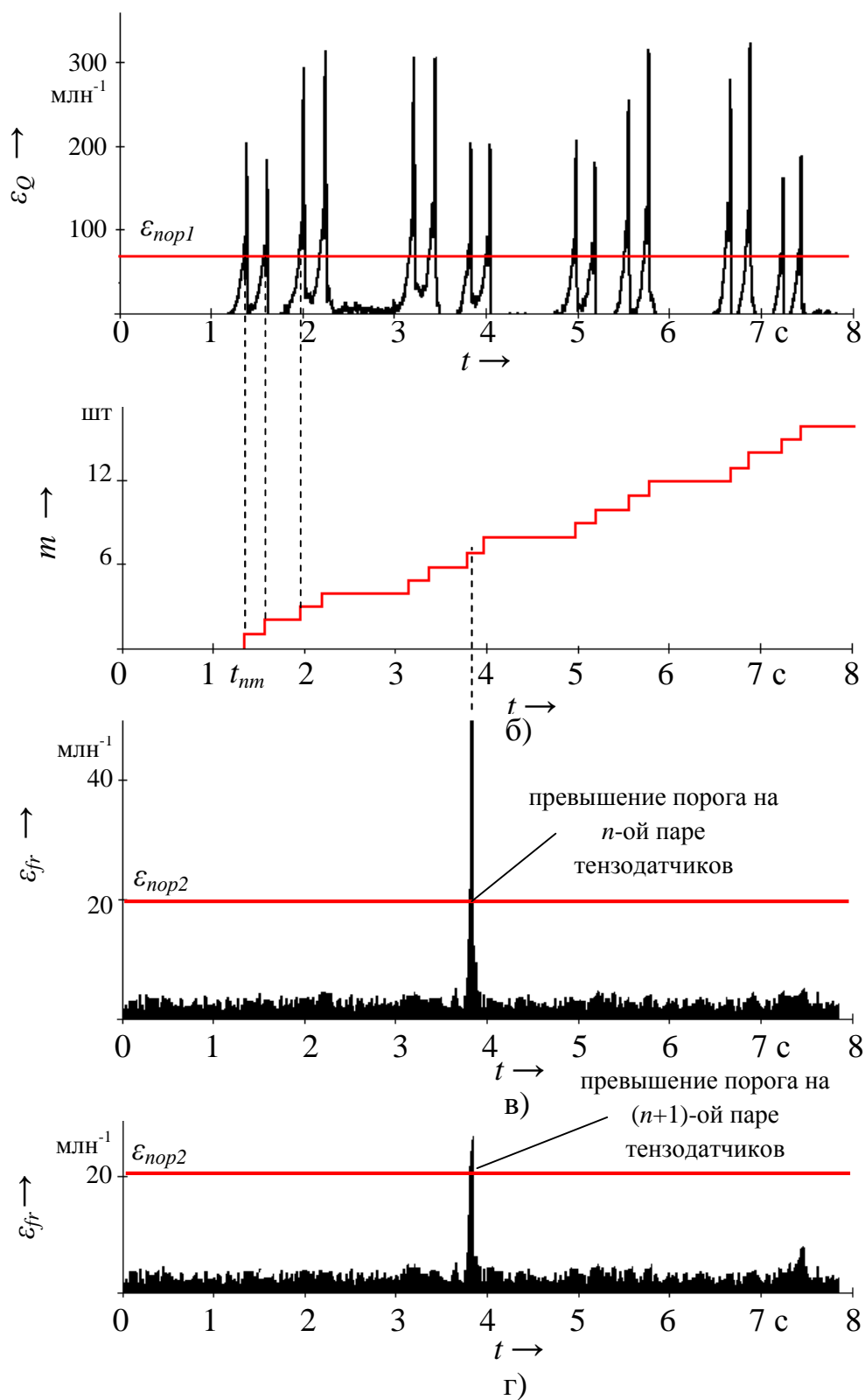


Рис. 14 - Графики зависимости симметричных деформаций (а); номера колесной пары (б); асимметричных деформаций на n -ой (в) и $(n+1)$ -ой (г) парах тензодатчиков от времени в процессе контроля

Таблица 1 – Результаты измерения максимальных значений асимметричных деформаций от прохождения колесных пар по искусственной неровности

№п.п.	ε_B , млн ⁻¹	№п.п.	ε_B , млн ⁻¹	№п.п.	ε_B , млн ⁻¹	№п.п.	ε_B , млн ⁻¹
1	331	11	313	21	328	31	348
2	342	12	356	22	308	32	294
3	356	13	328	23	328	33	320
4	347	14	348	24	309	34	300
5	321	15	314	25	346	35	356
6	320	16	293	26	349	36	346
7	308	17	296	27	306	37	352
8	290	18	300	28	304	38	332
9	297	19	328	29	354	39	311
10	338	20	298	30	320	40	305

Таблица 2 – Результаты контроля колесных пар грузовых вагонов в движении

№ п.п. дефекта	№ колесной пар с головы состава	Максимум асимметричных деформаций, млн ⁻¹	№ пар тензодатчиков	скорость поезда, м/с	Продольный размер дефекта, мм
1	8	496	6, 7	12	93
2	96	586	2, 3	11	110
3	152	862	7, 8	12	162
4	169	535	13,14	14	101
5	231	328	2, 3	12	62
6	143	408	11,12	12	77
7	69	360	6, 7	12	68
8	191	396	9, 10	13	75

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана конечно-элементная модель участка рельсового пути длиной 2 м (средний размер тетрагональных элементов составляет 6 мм, минимальный – 1,9 мм) и проведено исследование деформаций в рельсе под действием вертикальных и боковых сил с различными условиями жесткости пути (от 140 до 300 МПа).

2. Проанализированы факторы, оказывающие влияние на точность измерения вертикальных сил, и проведена количественная оценка вносимых ими погрешностей. Погрешность измерения вертикальной силы связанная с влиянием боковой силы, равной 40 кН, составила 0,4 %. Погрешность, вызванная влиянием эксцентриситета, равного 24,4 мм, равна 0,7 %. Изменение жесткости подрельсового основания на 40 % вызывает погрешность, равную 0,4 %. Несимметричная установка тензодатчиков по высоте, равная 1,9 мм, приводит к погрешности от 1 % до 2 % в зависимости от первоначальной установки тензодатчиков.

3. В результате исследований установлено, что ударные воздействия на поверхность катания рельса могут возбуждать упругие затухающие колебания с частотой 1,34 кГц. При этом амплитуда колебаний экспоненциально убывает во времени с постоянной времени 1,1 мс. Исследуемые колебания могут содержать как симметричные, так и асимметричные моды, классификация которых выполняется по коэффициенту корреляции сигналов с противоположных сторон шейки рельса.

4. Разработанная методика контроля колесных пар вагонов в движении основана на тензометрических измерениях симметричных и асимметричных деформаций шейки рельса в 15 точках, равномерно распределенных по длине рельса, в частотном диапазоне до 20 кГц. Методика позволяет обнаруживать дефекты с минимальной глубиной 0,5 мм и определять протяженность его вдоль поверхности катания.

5. В реальных условиях эксплуатации проведен тензометрический и визуально-измерительный контроль 560 колес. Всего при визуальном осмотре обнаружено 24 значительных по размерам дефекта поверхности катания. Установлены зависимости вероятностей перебраковки и недобраковки колес вагонов в зависимости от порога браковки $\Delta\varepsilon_{Вкр}$, которые в частном случае для $\Delta\varepsilon_{Вкр} = 6,5 \text{ млн}^{-1}$ составляют: вероятность недобраковки $P_1 = 0,007$ отн.ед., перебраковки $P_2 = 0,07$ отн.ед. Вероятность недобраковки уменьшается при увеличении длины измерительного участка по показательному закону.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в центральных изданиях, включенных ВАК РФ в Перечень периодических изданий для кандидатских диссертаций:

1. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. и др. Использование тензометрии для контроля колес грузового вагона в движении// Контроль. Диагностика, 2008, №8, С.19-23.

2. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Исследование влияния ударных нагрузок на распространение упругих колебаний в рельсе// Дефектоскопия. 2010. №3. С.27-34

3. Бехер С.А., Степанова Л.Н., Кочетков А.С. Разработка методики браковки дефектов поверхности катания колесных пар в движении// Контроль. Диагностика, 2011, №7, С. 24-29.

4. Патент РФ № 2424533, МПК G 01 R 27/02. Измерительный преобразователь быстродействующей тензометрической системы/ Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кабанов С.И., Кочетков А.С., Лебедев Е.Ю. Оpubл. 27.11.2010, Бюл. №33.

5. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Анализ погрешностей измерения вертикальных сил, действующих на рельс от колес движущегося транспортного средства// Контроль. Диагностика, 2010, №12, С. 54-61.

6. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Особенности использования быстродействующей тензометрии для контроля колес грузовых вагонов в движении// Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения, 2010, №2, С. 53-57.

7. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций /Серьезнов А.Н., Степанова Л.Н., Ивлиев В.В., Кабанов С.И., Бехер С.А., Власов К.В., Бобров А.Л., Кареев А.Е., Лебедев Е.Ю., Канифадин К.В., Рамазанов И.С., Тенитилов Е.С., Кочетков А.С. / Под ред. Л.Н.Степановой, А.Н.Серьезнова – Новосибирск: Наука, 2011 - 267 с.

Основные публикации в других изданиях:

1. Бехер С.А., Кочетков А.С. Использование тензометрического метода для определения технического состояния ходовых частей вагона в движении// Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск: СГУПС, 2007, С.143-148.

2. Бехер С.А., Кочетков А.С., Козятник И.И. Исследование распределения деформаций в рельсе под проходящим поездом для повышения достоверности выявления дефектов поверхности катания колес вагонов// Безопасность движения поездов: тр. VI науч.-практ. конф. - М., 2005. - Т. 2. - С. X-16 - X-17.

3. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Использование тензометрии для диагностики деталей и узлов, находящихся под действием эксплуатационных нагрузок// Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды: тр. конф. с участием иностр. ученых "Фундам. пробл. формирования техног. геосреды" 7-11 июля 2008 г. - Новосибирск, 2009. - Т.2: Машиноведение. - С. 236-241.

4. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Анализ погрешностей измерения вертикальных сил, действующих на рельс, от колес проходящего поезда// Политранспортные системы: материалы VI Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, 21-23 апр. 2009 г.: в 2 ч. - Новосибирск, 2009. - Ч. 2. - С. 234-240

5. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Быстродействующая тензометрическая система для диагностики ходовых частей грузовых вагонов// Вагоны и вагонное хозяйство, 2010, №2, С. 38-39.

6. Кочетков А.С., Бехер А.С. Исследование деформаций рельса для поиска поверхностных дефектов, пройденных по нему вагонных колес //Наука. Промышленность. Оборона: Труды VII – ой Всероссийской научно-технической конференции – Новосибирск: НГТУ, 2006. – С. 231-232.

Подписано в печать 16.11.2011 г.

1,5 печ.л. Тираж 120 экз. Заказ № 2507

Издательство ФГБОУ ВПО

«Сибирский государственный университет путей сообщения»

630049, г. Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191