

Разработка алгоритмов определения информативных параметров сигналов с тензодатчиков для контроля поверхности катания колес грузовых вагонов в движении

Представлены анализ и алгоритмы обработки сигналов с тензодатчиков при контроле поверхности катания колес грузовых вагонов в движении на экспериментальном участке железнодорожного пути. Приведены результаты отработки методик определения информативных параметров сигналов с тензодатчиков, счета прошедших колес, обнаружения дефектов поверхности их катания.

Ключевые слова: *тензометрия, тензодатчик, рельсы, контроль в движении, фильтрация, дефекты колес.*

Повышение достоверности и автоматизация диагностики подвижного состава на ходу поезда относятся к приоритетным направлениям исследований в области железнодорожного транспорта. Для развития автоматизированных систем диагностики подвижного состава в движении необходимо решить задачи оптимизации алгоритмов и программных средств, предназначенных для реализации их на ЭВМ с ограниченными вычислительными ресурсами.

Алгоритмы цифровой обработки и цифровой фильтрации сигналов – это важнейшие элементы любого измерительного комплекса. Программно-алгоритмические системы диагностики позволяют решать задачи фильтрации сигнала (предварительная обработка), выделения информативных параметров (промежуточная обработка) и интерпретации сигналов (завершающая обработка) по их пространственным (временным), спектральным и энергетическим характеристикам [1].

Тензометрический контроль железнодорожных транспортных средств в движении [2] основан на регистрации и анализе деформаций рельса под проходящим поездом. Для измерения деформаций используются тензодатчики, в сигналах которых содержатся и неинформативные составляющие, связанные с шумами, помехами, влиянием посторонних факторов. Поэтому разработка быстродействующих автоматизированных систем тензометрического контроля состояния подвижного состава в движении требует создания эффективных программно-алгоритмических средств, основанных на методах фильтрации и распознавания сигналов.

Отработка алгоритмов определения информативных параметров сигналов проводилась с использованием реальных данных, полученных на экспериментальном участке железнодорожного пути. Участок располагался на прямолинейном бесстыковом пути перед пунктом технического осмотра (ПТО) станции Инская Западно-Сибирской железной дороги. Такое расположение измерительного участка позволяет при обнаружении дефектов поверхности катания колес оперативно проводить визуальный осмотр после остановки поезда на ПТО.

Тензодатчики (рис. 1) ориентировали для измерения вертикальных деформаций и наклеивали их парами над каждой шпалой участка пути симметрично с противоположных сторон шейки рельса. Схема измерительного участка представлена на рис. 2. Тензодатчики с четными номерами измеряли деформации с внешней стороны рельса относительно колеи, а тензодатчики с нечетными номерами – с внутренней стороны. Для реализации такой схемы контроля не требуются изменения конструк-

ции бесстыкового пути, что выгодно отличает предложенный способ контроля от известных.

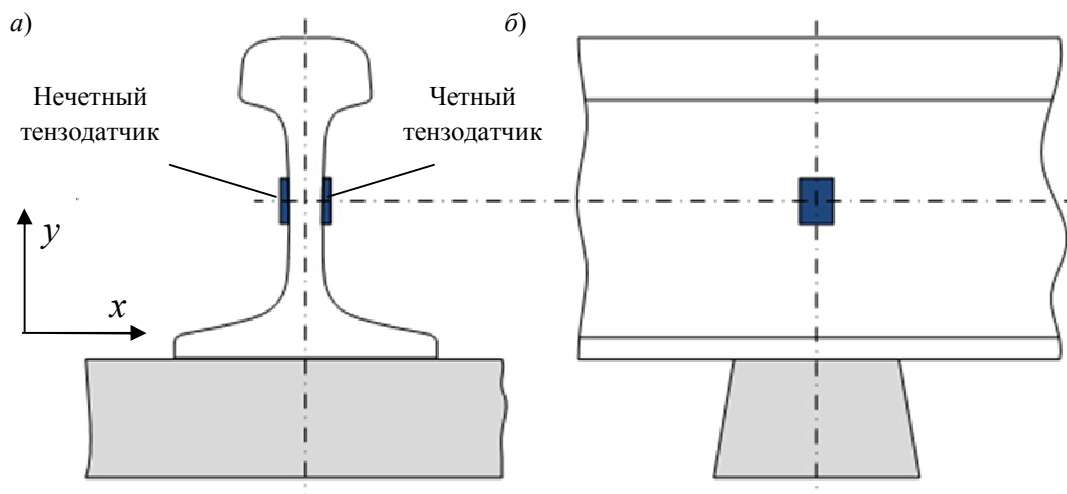


Рис. 1. Схема расположения тензодатчиков на рельсе:
а – вид в разрезе; б – вид сбоку

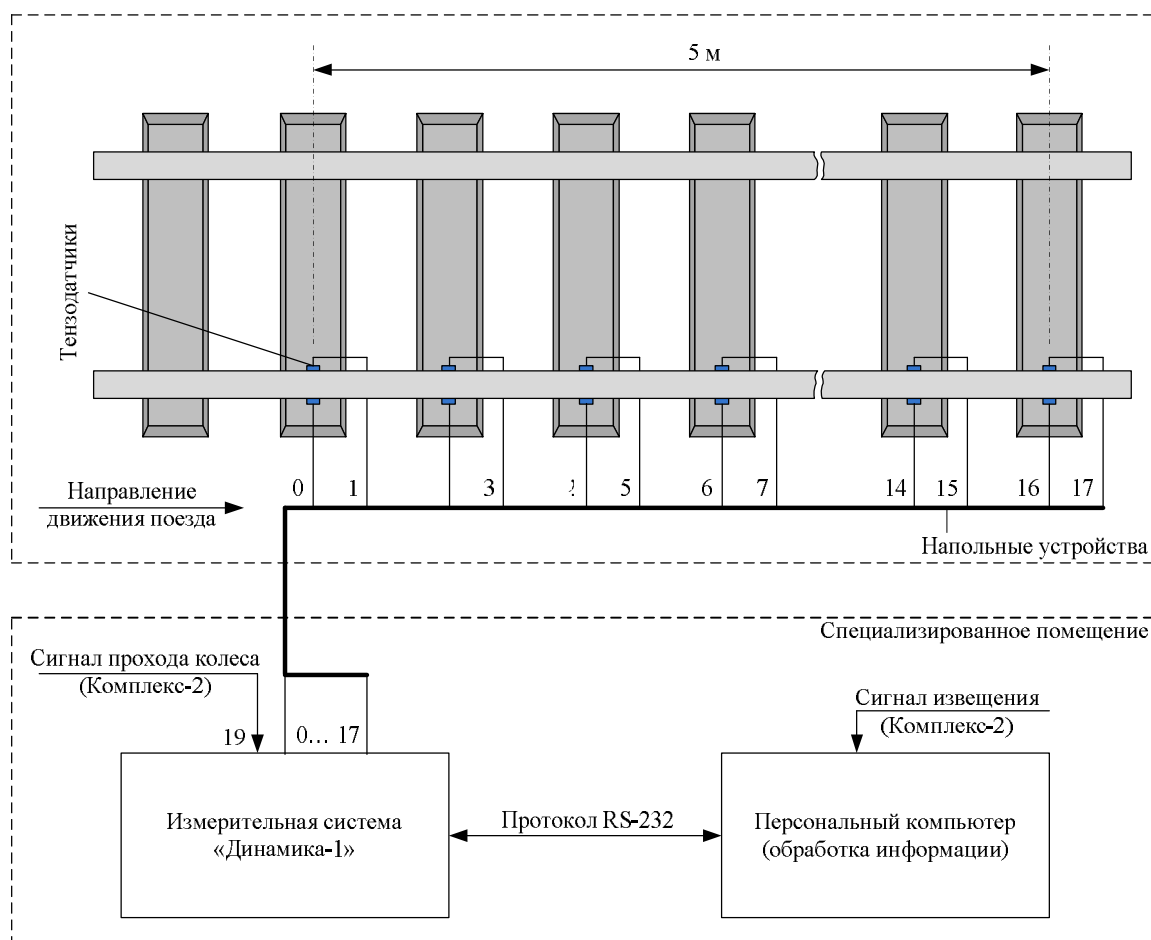


Рис. 2. Схема измерительного участка

Сигналы с 18 тензодатчиков регистрировались быстродействующей тензометрической системой «Динамика-1» [4, 5]. По 19-му каналу в измерительную систему поступал сигнал о прохождении колеса от «Комплекса-2» для измерений геометрических параметров колесных пар подвижного состава (зарегистрирован в Государст-

венном реестре № 51182-12). Сигнал извещения о приближении поезда поступал в компьютер по последовательному порту и обрабатывался программно.

Для определения времени прохождения колес над тензодатчиками микропроцессорной системой «Динамика-1» регистрировались симметричные деформации [6], вычисляемые как полусумма сигналов с тензодатчиков, наклеенных на противоположных сторонах шейки рельса в одном сечении:

$$\varepsilon_i = k_t \frac{U_i^B + U_i^H}{2},$$

где i – номер измерения; k_t – коэффициент преобразования, $k_t = 2,45$ млн⁻¹/ед. АЦП; U_i^B , U_i^H – сигналы с тензодатчиков, наклеенных в одном сечении с внутренней и наружной стороны рельса соответственно, ед. АЦП.

Для фильтрации сигнала использовался алгоритм линейной (апериодической) свертки:

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

где Q_i – фильтрованный сигнал; E_j – эталонная функция; m – количество точек, по которым идет свертка.

В качестве эталонной функции для фильтрации применялась тригонометрическая функция вида:

$$E_j = \cos\left(\frac{2\pi j}{Tf}\right), \quad (2)$$

где j – индекс, изменяющийся в диапазоне от 1 до $m = Tf$; T – период эталонной функции, с; f – частота квантования АЦП, Гц.

Оптимальное значение периода T эталонной функции определяется из условия максимального значения полезного сигнала Q_i , связанного с прохождением колеса, и минимального отношения «шум/сигнал». Период эталонной функции существенно зависит от скорости движения поезда на измерительном участке.

Для определения оптимального периода рассчитана и изображена графически (рис. 3) зависимость отношения «шум/сигнал» K_{NS} и максимальной амплитуды фильтрованного сигнала Q от периода эталонной функции T . Для каждого значения периода выполнено 56 измерений, шаг изменения периода при этом составил 0,005 с. Для каждого колеса находили максимальную амплитуду шума и минимальную амплитуду полезного сигнала, а затем рассчитывали их отношение K_{NS} .

При увеличении периода амплитуда шумов и помех в фильтрованном сигнале монотонно убывает, что объясняется их усреднением. При этом амплитуда полезного сигнала имеет максимум при значениях периода от 0,035 до 0,045 с. Исходя из условия сохранения сигнала от прохождения колеса над тензодатчиком, оптимальный период приняли равным $T = 0,04$ с для скорости подвижного состава $v = 12$ м/с.

При изменении скорости подвижного состава значение периода изменяется. При этом значение произведения $Tv = 0,48$ м остается постоянным. Из этого соотношения оптимальный период может быть найден для произвольной скорости подвижного состава.

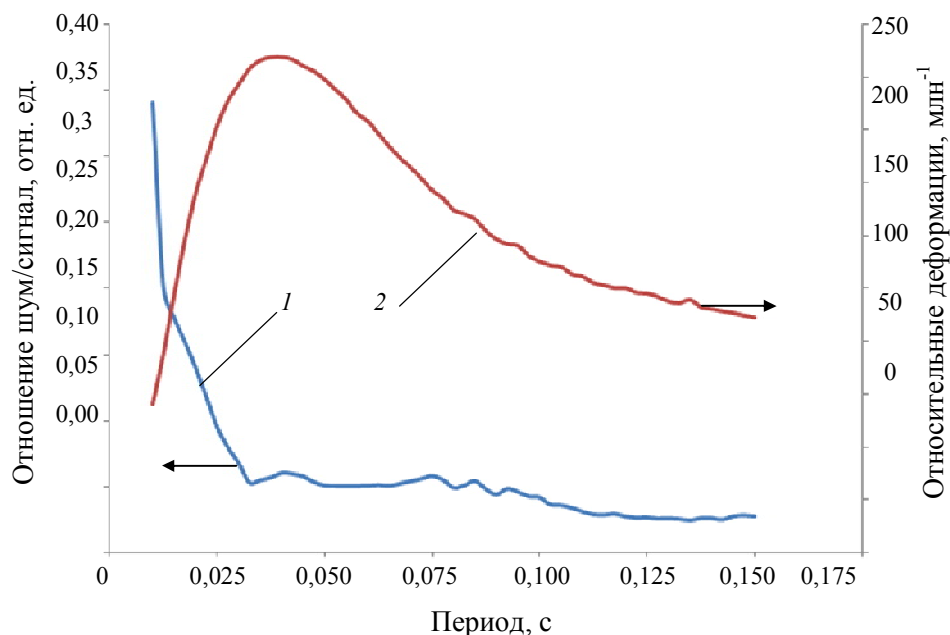


Рис. 3. Зависимость отношения шум/сигнал $K_{NS}(1)$ и амплитуды (2) от периода эталонной функции T

Для решения задачи поиска времени прохождения колес над тензодатчиками положительная составляющая сигналов Q_i является неинформативной. Поэтому сигнал преобразуем к виду:

$$\tilde{\varepsilon}_i = \begin{cases} Q_i, & Q_i < 0, \\ 0, & Q_i \geq 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\tilde{\varepsilon}_i$ – фильтрованный сигнал симметричных деформаций, млн^{-1} .

На рис. 4 представлены графики зависимости симметричных деформаций от времени, зарегистрированных при прохождении одного вагона, до (1) и после (2) фильтрации на первой паре тензодатчиков.

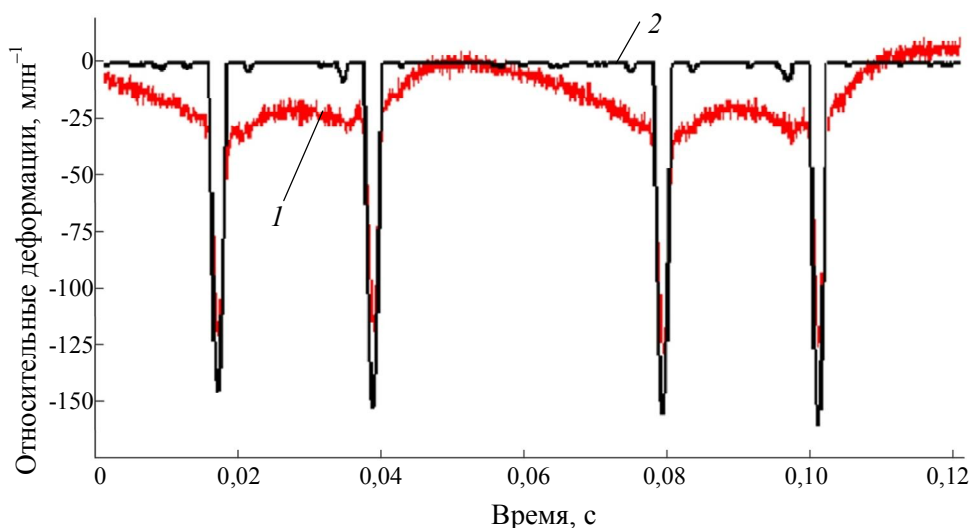


Рис. 4. График зависимости симметричных деформаций от времени до (1) и после (2) фильтрации

Для поиска времени прохождения колес над тензодатчиками использовались два пороговых уровня ε_1 и ε_2 , причем экспериментально установлено соотношение $\varepsilon_1 = 0,3\varepsilon_2$. С помощью фильтрованного сигнала симметричных деформаций $\tilde{\varepsilon}_i$ опре-

делялся момент времени t_1 , в который деформации становились ниже первого порогового уровня ε_1 . Далее определялось время t_2 , при котором сигнал становился выше второго порогового уровня ε_2 .

Временные границы t_1 и t_2 ограничивают интервал, в котором колесо проходит над тензодатчиками. Время прохождения колеса над тензодатчиками определялось по локальному минимуму исходного сигнала ε_i . Аналогично производился поиск времени прохождения колес над тензодатчиками по всем каналам.

Время прохождения колес над тензодатчиками линейно зависит от номера датчика, так как расстояние между датчиками и скорость движения поезда являются постоянными величинами. На рис. 5 показаны сигналы от прохождения колес над тензодатчиками.

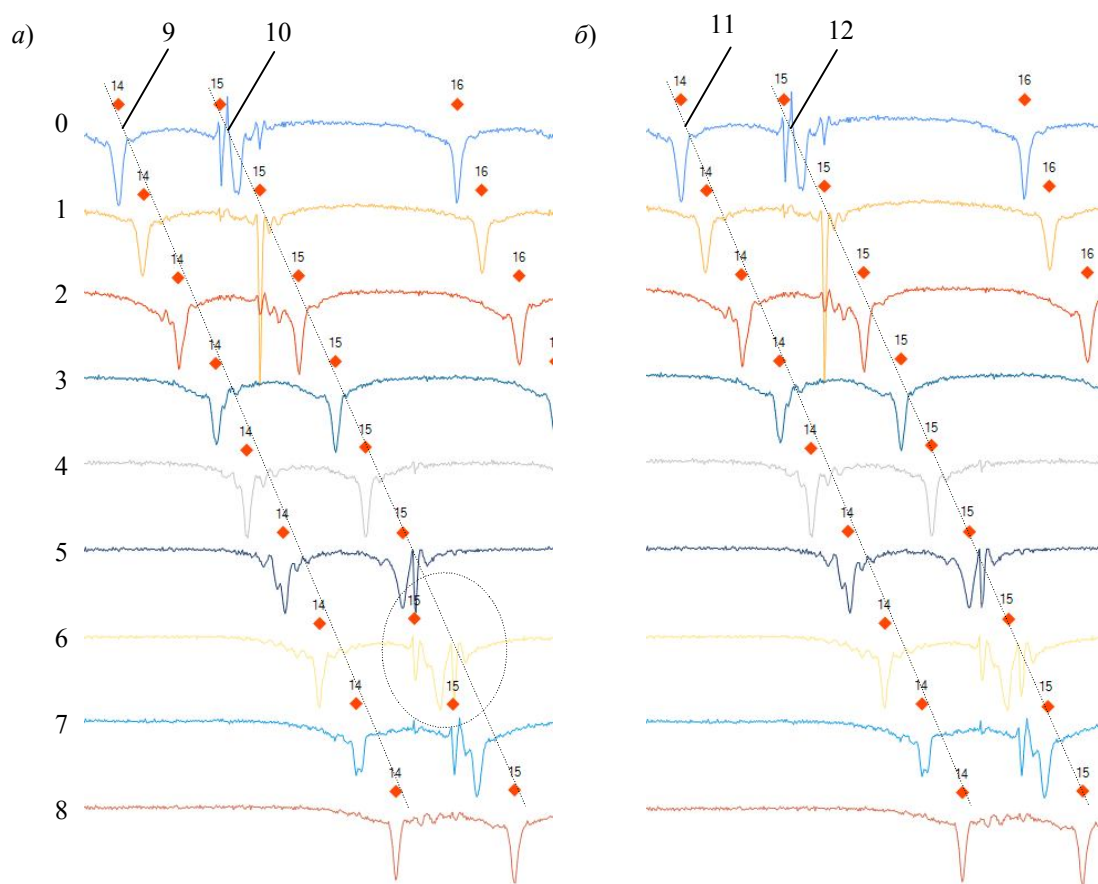


Рис. 5. Сигналы симметричных деформаций 0...8 в разных сечениях (через 0,5 м) от прохождения двух колесных пар с порядковыми номерами 14 и 15 до аппроксимации (а) и после аппроксимации (б): 9, 10, 11, 12 – линейная аппроксимация времени прохождения колес над тензодатчиками

На рисунке точками отмечено рассчитанное время прохождения колес над тензодатчиками, линиями – результаты аппроксимации. Для 14-го колеса коэффициент корреляции времени прохождения с номером датчика составляет 0,9998, для 15-го колеса – 0,95. Снижение коэффициента корреляции связано с ошибками при обработке сигналов 6 и 7 из-за присутствия в них посторонних сигналов – помех.

Для повышения точности определения времени прохождения колес над тензодатчиками применяется разработанный алгоритм, основанный на последовательном исключении сигналов и расчете коэффициента корреляции времени с номером сигнала. При значении коэффициента корреляции больше 0,998 исключение сигналов

останавливают, определяют по оставшимся каналам коэффициенты линейной аппроксимации, используя которые определяют время прохождения колес для исключенных сигналов.

В отдельных случаях возможны ошибки (рис. 6) при определении времени прохождения колес, связанные с большим количеством дефектов поверхности катания. Для нахождения и устранения подобных ошибок разработан алгоритм нормализации времени прохождения колес.

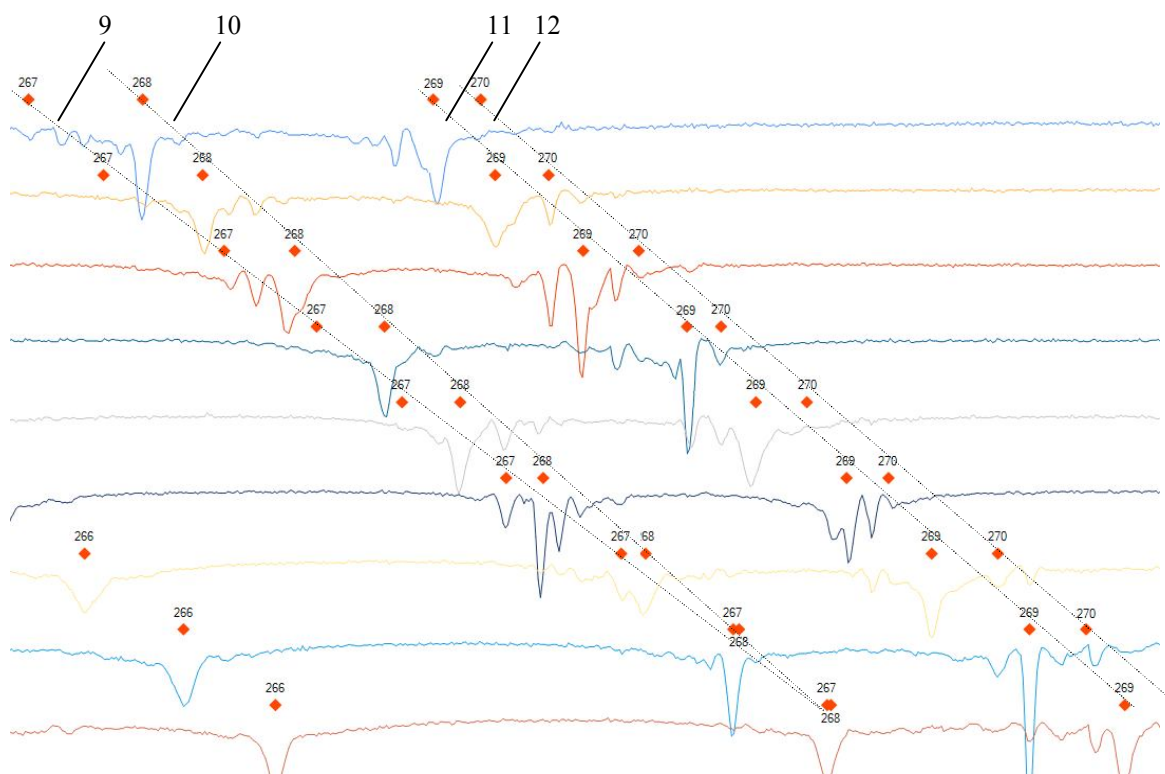


Рис. 6. Сигналы симметричных деформаций 0...8 в разных сечениях (через 0,5 м) от прохождения двух колесных пар с порядковыми номерами 267, 269:

9, 10, 11, 12 – линейная аппроксимация времени прохождения колес над тензодатчиками

Алгоритм учитывает максимально возможное ускорение поезда и минимальное расстояние между колесами. В первом случае проверяется скорость у N и $(N + 1)$ колес. Затем определяется ускорение и сравнивается с максимально возможным, регламентированным нормативными документами. Во втором случае рассчитывается расстояние между каждыми N и $(N + 1)$ колесами и сравнивается с минимально возможным для заданной скорости. Если встречается колесо, которое не удовлетворяет этим условиям, то считается, что оно найдено неверно и затем удаляется из общего счета.

На рис. 6 представлены ошибки определения времени прохождения колес. Линии 9 и 10 показывают ошибку по максимальному ускорению, а линии 11 и 12 – ошибку по скорости. После проведения нормализации времени колеса под номерами 268 и 270 удалены из общего счета.

Следующая задача анализа первичной информации тензометрии – поиск дефектов поверхности катания колес. Для определения дефектов также использовался алгоритм линейной свертки, но с меньшим периодом эталонной функции.

Затем определялась функция свертки, которая перемножалась по всем каналам. При прохождении дефектного колеса по измерительному участку удар от дефекта регистрировался несколькими тензодатчиками. Поэтому после перемножения сигнала свертки по каждому каналу присутствовало значительное увеличение амплитуды сигнала (рис. 7).

Время между регистрациями максимумов сигналов 13 и 14 составляет 0,197 с. При скорости контролируемого поезда 15,2 м/с расстояние, которое проехало колесо, составит $S = 2,99$ м. Нормативная длина поверхности катания (без износа) колеса грузового вагона согласно ГОСТ 10971–2011 «Колеса цельнокатанные. Технические условия» составляет 3,006 м. Следовательно, сигналы 13 и 14 на рис. 7 соответствуют одному дефекту 260-го колеса.

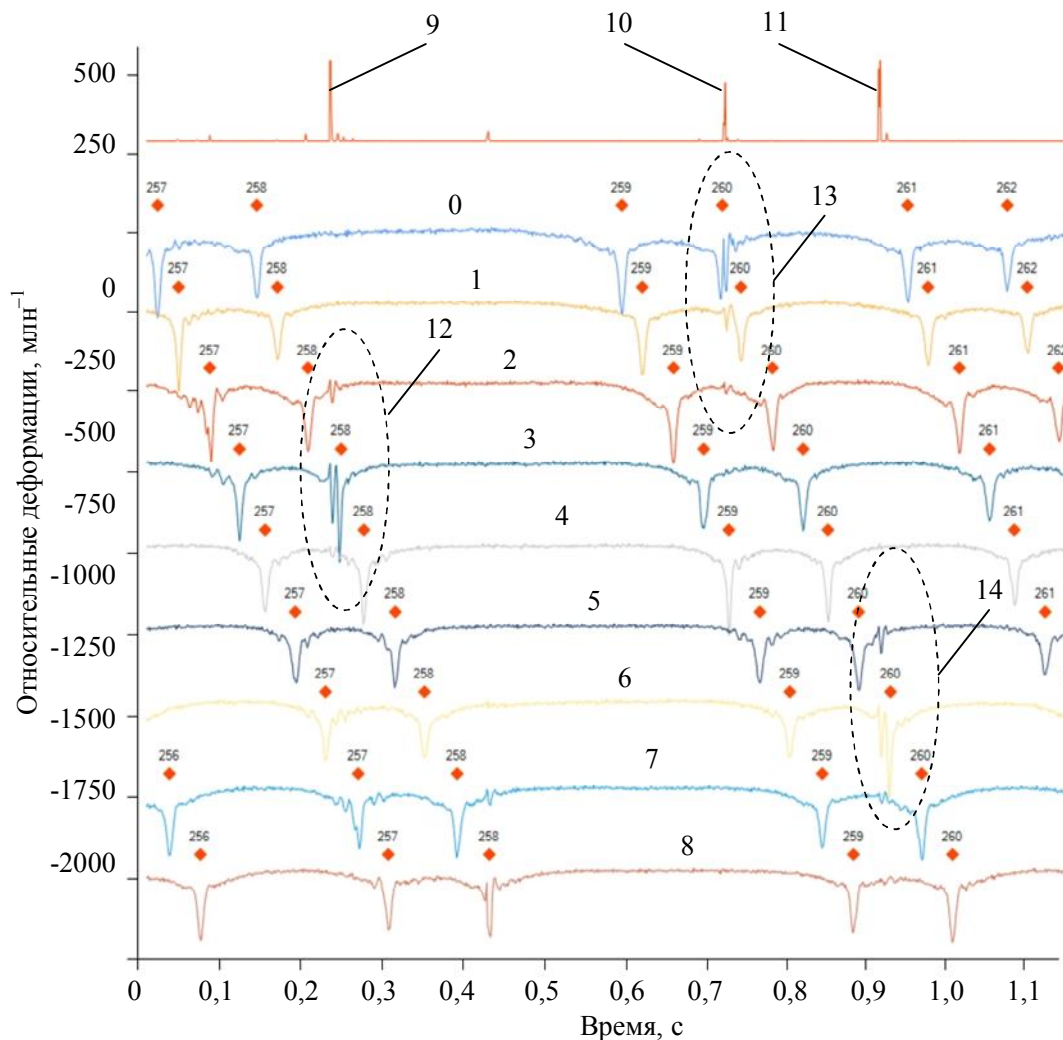


Рис. 7. Сигналы симметричных деформаций 0...8 в разных сечениях (через 0,5 м) от прохождения двух колесных пар с дефектами поверхности катания:
9, 10, 11 – сигналы от дефектов поверхности катания

Для реализации контроля колес вагонов в движении с использованием тензометрической системы отработана методика обработки сигналов с тензодатчиков, основанная на фильтрации сигналов. Проведена оптимизация эталонной функции, при

этом наименьшее отношение шум/сигнал составило 0,05, что позволило разработать программу для поиска времени прохождения колес над тензодатчиками. Разработаны алгоритмы поиска и исправления ошибок, основанные на корреляции сигналов с нескольких пар датчиков, предельных значениях расстояний между колесами, скорости и ускорения поезда.

Библиографический список

1. Власенко В.А., Лаппа Ю.М., Ярославский Л.П. Методы синтеза быстрых алгоритмов свертки и спектрального анализа сигналов. М.: Наука, 1990. 180 с.
2. Степанова Л.Н., Бехер С.А., Кочетков А.С. Особенности использования быстродействующей тензометрии для контроля колес грузовых вагонов в движении // Вестник РГУПС. 2010. № 2. С. 53–57.
3. Рейнеке Дж.М., Джеллински М. Обнаружение некруглостей колес // Железные дороги мира. 2003. № 8. С. 64–68.
4. Степанова Л.Н., Кабанов С.И., Лебедев Е.Ю. и др. Измерительный преобразователь быстродействующей системы для динамических испытаний конструкций // Датчики и системы. 2007. № 5. С. 29–32.
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. 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.

S.A. Bekher, A.O. Kolomeets, L.N. Stepanova, A.S. Kochetkov. Development of an Algorithm for Determining Characteristics of Strain-sensor Signals for Monitoring the Wheel Roll Surface Quality of Freight Cars in Motion. An analysis of strain-sensor signals and their processing algorithms applied while monitoring the wheels roll surface of freight cars in motion on the test section of track are reported. Data gained in the development of procedures suiting the purpose of registration of characteristics of strain-sensor signals, determination of the number of wheels passed, and detection of surface defects on the roll surface of wheels are reported.

Keywords: *tensometry, strain sensor, rails, in-motion control, filtration, wheel defects.*

Бехер Сергей Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС, заведующий НИЛ «Физические методы контроля качества» (ФМК). Область научных интересов: неразрушающий контроль, метод акустической эмиссии, тензометрия колес в движении, эффективные технологии обучения. E-mail: beher@stu.ru

Колосеев Андрей Олегович – аспирант кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС, инженер-программист НИЛ ФМК. Область научных интересов: обработка результатов неразрушающего контроля, тензометрия колес в движении, эффективные технологии обучения.

Степанова Людмила Николаевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС. Область научных интересов: разработка микропроцессорных диагностических систем для прочностных испытаний конструкций.

Кочетков Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС, ведущий инженер НИЛ ФМК. Область научных интересов: неразрушающий контроль, метод акустической эмиссии, тензометрия колес в движении.