

УДК 625.033.4:620.179.18

С. А. Бехер, Т. В. Сыч, А. О. Коломеец, А. С. Кочетков

Разработка средств мониторинга динамических процессов взаимодействия колес и рельсов в эксплуатации

Поступила	28.03.2018
Рецензирование	20.05.2018
Принята к печати	07.06.2018

Современные системы контроля динамики взаимодействия железнодорожных транспортных средств и рельсов основаны на косвенных измерениях деформаций, сил и виброускорений. Системы позволяют эффективно обнаруживать неисправный подвижной состав, оказывающий сверхнормативное воздействие на путь. Однако для их массового применения на железных дорогах РФ необходимо решить вопросы метрологического обеспечения. Целью работы является создание методики калибровки тензометрического участка пути и оценка погрешности измерения динамических сил в системе колесо – рельс под поездной нагрузкой.

Исследования проводились расчетным методом конечных элементов и экспериментально в реальных условиях эксплуатации. Создан оснащенный тензодатчиками измерительный участок, и разработано специализированное нагружающее устройство, воспроизводящее вертикальную силу до 218 кН и боковую силу до 110 кН. Для натурных испытаний применялась быстродействующая микропроцессорная тензометрическая система «Динамика-3».

Разработана конечно-элементная модель с переменным средним размером элементов, равным 1 мм в средней части и 5 мм на торцах модели. Выполнена оценка влияния среднего размера элементов, граничных условий на торцах модели и способа приложения вертикальной силы на результаты расчета. Неопределенности результатов не превышают 0,5 %.

Исследованы источники погрешности измерения сил для способа «РЖД-2016» и способа измерения вертикальной силы одной парой тензодатчиков. Обнаружено влияние несимметричности установки пары тензодатчиков и жесткости подрельсового основания на точность измерений силы. Вертикальный эксцентриситет пары тензодатчиков, равный 5 мм, определяет погрешность на уровне 5 %, которая не может быть устранена на этапе калибровки. Возникающие после калибровки вариации жесткости подрельсового основания приводят к погрешностям измерений методом «РЖД-2016» на уровне 20–30 %. Для обеспечения погрешности не более 1 % необходимая точность установки преобразователей деформаций составляет 1 мм.

Проведена калибровка измерительного участка пути. Экспериментально обоснована линейная зависимость симметричных деформаций в паре тензодатчиков от силы с коэффициентом корреляции более 0,99. Показано, что влияние бокового воздействия на погрешность измерения вертикальной силы сопоставима с дрейфом нуля тензосистемы и не превышает 1 %.

Ключевые слова: мониторинг, ходовые части вагонов, измерение, калибровка, динамическая сила, тензометрия, рельс, деформации.

В период с 2010 по 2016 г. на сети железных дорог в эксплуатации зафиксировано 29 изломов элементов колесных пар и более 130 изломов боковых рам тележек грузовых вагонов. На всех изломах обнаруживаются следы развития усталостных трещин [1]. Из-за разрушения ходовых частей вагонов допущено 17 крушений подвижного состава в грузовых поездах. Для российских железных дорог проблема особенно актуальна, так как грузовое и пассажирское движение осуществляется по общим железнодорожным путям и любой инцидент в грузовом поезде негативно сказывается на безопасности пассажирских перевозок.

Дефекты ходовых частей вагонов ухудшают динамику взаимодействия колес и рельсов. Такие дефекты, как ползуны, выщербины,

навары на поверхности катания колес, увеличивают динамические силы. Повышается скорость развития усталостных трещин в ходовых частях вагонов, и, как следствие, увеличивается вероятность их хрупкого разрушения. Неисправности тележек и колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов создают сверхнормативные боковые силы, способные вызвать сход подвижного состава за счет отжатия головки рельса или вкатывания гребня колеса на поверхность катания рельса.

Нормативными документами [2] установлены максимально допустимые размеры дефектов колесных пар в эксплуатации. Основным методом контроля при этом является визуально-измерительный, проводимый осмотрщиками вагонов после остановки поезда на пунктах тех-

нического обслуживания. Достоверность контроля напрямую зависит от человеческого фактора: квалификации, психофизиологического состояния оператора, его мотивации.

Для повышения надежности ходовых частей в эксплуатации перспективными являются технические решения, основанные на использовании автоматизированных напольных диагностических комплексов. В настоящее время в ОАО «РЖД» имеется положительный опыт массового применения автоматизированных средств диагностики подвижного состава. Комплексы «Комплекс-2» [3], ПОНАБ, ДИСК, КТСМ [4], УКСПС [5] обеспечивают измерение толщины гребня и своевременное обнаружение перегретых букс, неровностей поверхности катания колес, волочащихся деталей и подвижного состава с отрицательной динамикой.

С 2013 г. в РФ действует национальный стандарт ГОСТ Р 55050–2012, который устанавливает нормы допустимого воздействия подвижного состава на железнодорожный путь и методы испытаний. Стандарт заполняет пробел в причинно-следственной связи между неисправностями подвижного состава, показателями (силами, напряжениями) динамического взаимодействия с верхним строением пути и усталостным разрушением деталей вагонов. Его принятие позволяет создавать системы диагностики подвижного состава по ходу поезда, основанные на контроле параметров динамического взаимодействия колеса и рельса. Для создания таких систем необходимы достоверные методики и аппаратура, позволяющие в реальном режиме времени и в полностью автоматизированном режиме измерять и контролировать динамические силы в системе колесо – рельс.

В настоящее время за рубежом для контроля динамики воздействия колес на рельсы применяются системы [6–10]: Multirail WheelScan, Sensorline, Dafur (Германия), WCM (Австралия), Gotcha, Quo Vadis (Нидерланды), Lasca (ЕС), Tamtron Systems Oy, WILD (США) (рис. 1). Один из лучших обзоров принципов их построения и технических характеристик представлен в работе Lahti Otto [11]. Во всех системах используется косвенный метод, основанный на регистрации сигналов с датчиков деформаций (тензодатчиков, оптических датчиков), динамометров, вибродатчиков или их комбина-

ций. Выбор первичных преобразователей определяется конкретными целями, конструкцией и условиями содержания пути и подвижного состава. Наибольшее распространение для контроля динамических сил получили устанавливаемые на рельсах датчики деформаций и датчики силы, размещаемые между шпалами и рельсами.

В системе WILD [10] (см. рис. 1, а) под проходящим поездом тензодатчиками регистрируются вертикальные деформации шейки рельса. Датчики располагаются симметрично парами на противоположных сторонах шейки рельса таким образом, чтобы сигнал с тензодатчиков был пропорционален вертикальной силе в системе колесо – рельс.

Принцип действия системы Lasca [8] (см. рис. 1, б) основан на измерении оптическими датчиками прогиба рельса в вертикальной плоскости. Для уменьшения влияния подрельсового основания на результаты измерений силы используются специальные шпалы и предъявляются жесткие требования к содержанию пути.

В системе WheelScan (см. рис. 1, в) используются силоизмерительные датчики, встраиваемые в специализированные шпалы. Регистрируются силы реакции шпал на участке пути, по которым судят о силе в системе колесо – рельс. В системе Dafur [9] (Германия) дополнительно на границах участка пути устанавливаются датчики продольных деформаций, показания которых используются для компенсации продольного растяжения рельса.

Несмотря на то что в некоторых системах, например в Multirail WheelScan, используются вибродатчики, они не находят массового применения. Их сигналы обычно используются как индикаторы ударного воздействия. Получение количественной информации затруднено из-за сложностей интерпретации полученной информации.

В каждой из рассмотренных систем существуют свои ограничения применения, связанные с конструкцией пути, условиями эксплуатации и содержания, межосевым расстоянием в подвижном составе. В отличие от зарубежных железных дорог развитие железнодорожного транспорта РФ неразрывно связано с метрологическим обеспечением средств изме-

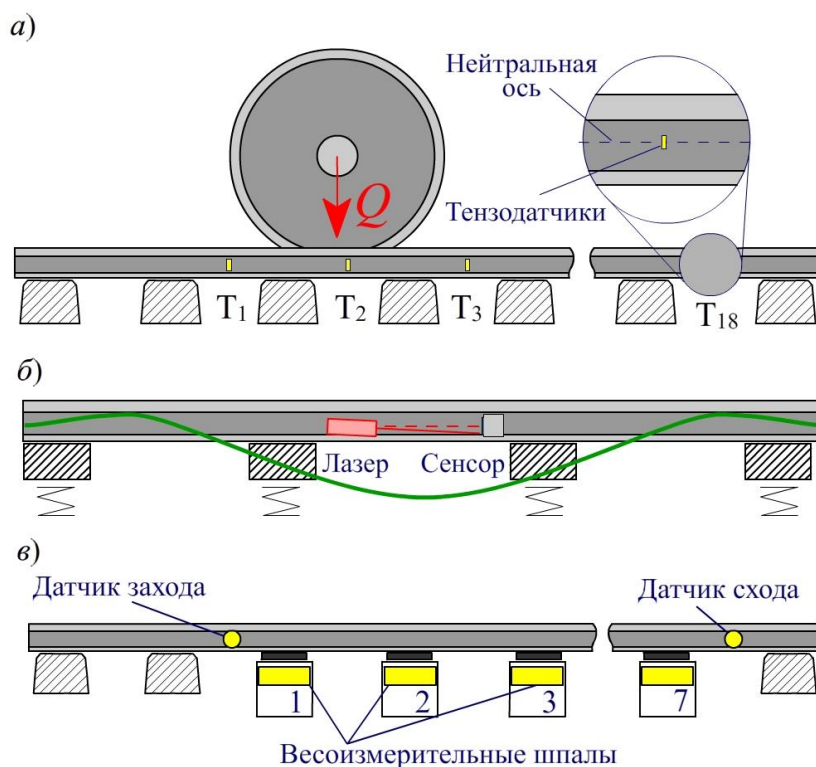


Рис. 1. Схемы, поясняющие принципы работы диагностических систем:
а – WILD (Salient Systems); б – Lasca; в – WheelScan; 1–7 – весоизмерительные шпалы;
Т1–Т18 – тензодатчики

рений и контроля. Поэтому в нашей стране особое внимание уделяется достоверности регистрируемых информативных параметров, используемых для принятия решения об отцепке вагона от поезда.

Целью работы является создание методики калибровки тензометрического участка пути и оценка погрешности измерения динамических сил в системе колесо – рельс под поездной нагрузкой.

В настоящее время наиболее известным и стандартизированным в ГОСТ Р 55050 способом измерения сил, действующих от колес на рельсы, является метод Шлюмпфа. Способ основан на регистрации мостовым методом деформаций в четырех точках ($L1, \dots, L4$ на рис. 2) над нейтральной осью рельса и под ней.

Мостовая схема выбирается в зависимости от решаемой задачи таким образом, чтобы сигналы на выходе моста были пропорциональны вертикальным или горизонтальным силам. Недостаток способа, очевидно, связан с влиянием несимметричности преобразователей деформаций. Все нарушения могут быть обнаружены только после завершения работ

на этапе калибровки и требуют устранения в процессе ремонта.

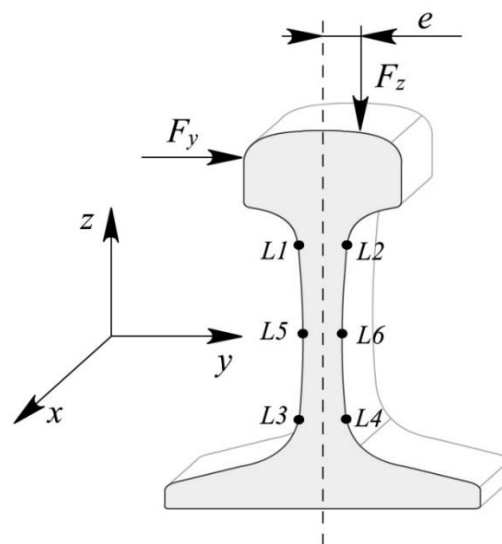


Рис. 2. Схема приложения сил и измерения деформаций рельса

В развитие способа Шлюмпфа и для устранения его ограничений создан способ «РЖД-2016» [12]. Деформации каждого из четырех тензодатчиков регистрируются независимо, а силы находятся решением системы уравнений

$$\varepsilon_i = g_{ij} f_j, \quad (1)$$

где i – номер точки измерения деформаций от 1 до 4; j – индекс силы от 1 до 3; g_{ij} – матрица 4×3 , коэффициенты которой определяются экспериментально в процессе калибровки измерительной системы; f_j – вектор сил, который определяется как:

$$f_j = \begin{bmatrix} F_z \\ F_y \\ F_z e \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где F_z , F_y – вертикальная и горизонтальная силы, кН; e – эксцентриситет приложения вертикальной силы, м.

Калибровка измерительной системы выполняется с использованием специализированного устройства в процессе четырех нагружений рельса различными комбинациями сил (2):

$$\begin{aligned} f_1 &= \begin{bmatrix} F_{z0} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad f_2 = \begin{bmatrix} F_{z0} \\ F_{y0} \\ 0 \end{bmatrix}, \\ f_3 &= \begin{bmatrix} F_{z0} \\ 0 \\ eF_{z0} \end{bmatrix}, \quad f_4 = \begin{bmatrix} F_{z0} \\ 0 \\ -eF_{z0} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

где F_{z0} , F_{y0} – опорные значения вертикальной и горизонтальной силы, кН.

На основе результатов измерений деформаций ε_i для каждого из четырех способов нагружения (3) определяются элементы матрицы g_{ij} (1). После проведения калибровки в процессе движения поезда по измерительному участку пути регистрируются сигналы с тензодатчиков в точках $L1$, ..., $L4$ (см. рис. 2), определяются мгновенные значения деформаций в момент прохождения колеса над измерительным сечением и решением системы уравнений (1) определяется вектор сил (2).

Для решения задачи обнаружения дефектов поверхности катания и оценки их параметров необходимы измерения только вертикальной составляющей силы F_z [13]. В этом случае достаточно только двух точек измерения деформаций ($L5$, $L6$ на рис. 2), и уравнение (1) принимает вид

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_{1,1} & q_{1,2} \\ q_{2,1} & q_{2,2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_z \\ M \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где q_{ij} – матрица 2×2 ; M – изгибающий момент, связанный с действием боковой силы F_y

и эксцентриситетом e приложения вертикальной силы F_z , Н·м.

Момент силы определяется выражением

$$M = eF_z + hF_y, \quad (5)$$

где h – расстояние от точки приложения боковой силы F_y до сечения измерения деформаций рельса.

Во всех трех рассмотренных способах измерения сил в системе колесо – рельс различные комбинации преобразователей используются для уменьшения или исключения влияния мешающих факторов на точность измерений. При этом основными источниками погрешности являются:

- несимметричность установки парных тензодатчиков по высоте;
- различная чувствительность парных тензодатчиков;
- изменение жесткости подрельсового основания.

Исследование влияния мешающих факторов на погрешность измерения сил в системе колесо – рельс выполнено двумя методами: экспериментально на натурных объектах и расчетным способом с использованием методов конечных элементов.

Экспериментальные исследования проводились на полигоне СГУПС и на действующем участке пути с использованием быстродействующей микропроцессорной тензометрической системы «Динамика-3» [14] с частотой дискретизации до 64 кГц. На измерительном участке на нейтральной оси шейки рельса наклеены проволочные тензорезисторы ПКС-12-200, ориентированные на регистрацию вертикальных деформаций ε_z (рис. 3, а).

Для калибровки измерительного участка сотрудниками СГУПС совместно с Дорожным конструкторским технологическим бюро ЗСЖД разработано специализированное устройство (см. рис. 3, б). Вертикальное нагружение осуществлялось гидроцилиндром ДУ20П100 (поз. 2), горизонтальное – гидроцилиндром ДУ10П100 с максимальной грузоподъемностью 218 кН (22,2 тс) и 110 кН (11,3 тс) соответственно (поз. 4). Для создания давления в гидроцилиндрах использовались два ручных гидравлических насоса НРГ-7010, соединяемые рукавами высокого давления (поз. 3). Для контроля давления использова-

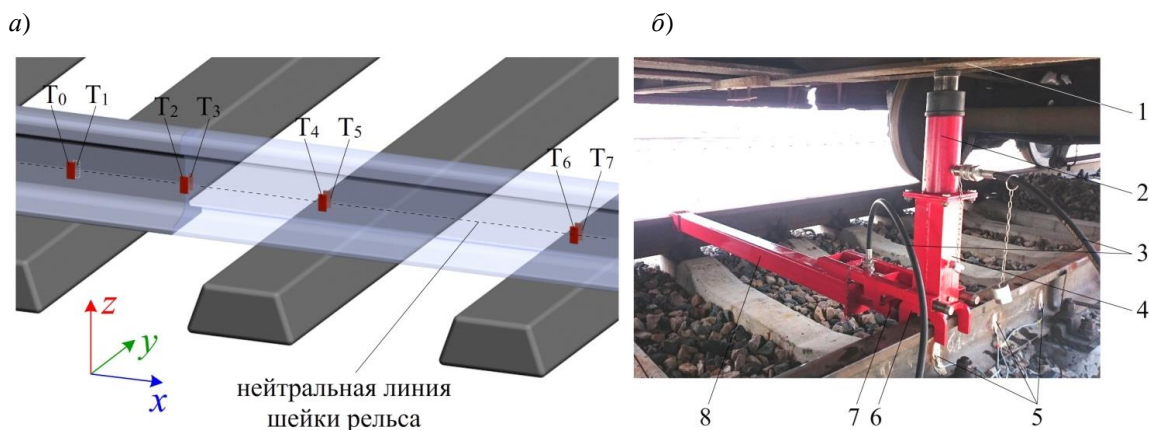


Рис. 3. Схема измерительного участка (а) и фотография нагружающего устройства (б):
Т₀–Т₁, Т₂–Т₃, Т₄–Т₅, Т₆–Т₇ – пары тензодатчиков, установленные в разных сечениях рельса;
1 – поперечная балка железнодорожной платформы с грузом; 2 – цилиндр вертикальный; 3 – рукава высокого давления; 4 – компенсационная опора вертикального гидроцилиндра; 5 – тензодатчики; 6 – опора вертикального гидроцилиндра; 7 – цилиндр горизонтальный; 8 – балка горизонтального цилиндра

лись манометры типа МА100ВУ63. Сила, воздействующая на рельс, оценивалась по показаниям манометра.

Математическое моделирование проводилось в программной среде SolidWorks на модели рельса Р65 длиной 6 м (рис. 4). Шпалы имитировались распределенной упругой поддержкой. Распределенная жесткость на единицу площади варьировалась в диапазоне от 10^5 до 10^{12} (Н/м)/м², что соответствует требованиям ГОСТ Р 55050. Торцы рельса закреплялись тремя различными способами: жесткая заделка грани, жесткая заделка нижней кромки, зеркальные граничные условия. Вертикальная сила F_z прикладывалась на поверхности катания рельса с эксцентриситетом e , боковая сила F_y – на внутренней грани головки рельса. Деформации

рельса исследовались в средней части модели $x \in (-0,5; 0,5)$ протяженностью 1 м вдоль линий: $L1$ и $L2$ в переходе от шейки к головке на высоте $z = 129$ мм от подошвы, $L3$ и $L4$ в переходе от шейки к подошве на высоте $z = 45$ мм, $L5$ и $L6$ в сечении с наименьшей толщиной шейки на высоте $z = 83$ мм.

На рис. 4 представлен пример расчета относительных деформаций ε_z вдоль линии $L6$ рельса при нагружении вертикальной силой $F_z = 100$ кН без эксцентриситета ($e = 0$) и без боковой силы $F_y = 0$ с распределенной жесткостью упругой поддержки, равной 10^9 (Н/м)/м². В области приложения вертикальной силы реализуется абсолютный минимум деформаций с амплитудой $\varepsilon_z = 110$ млн⁻¹. На участках с упругой поддержкой формируются локальные

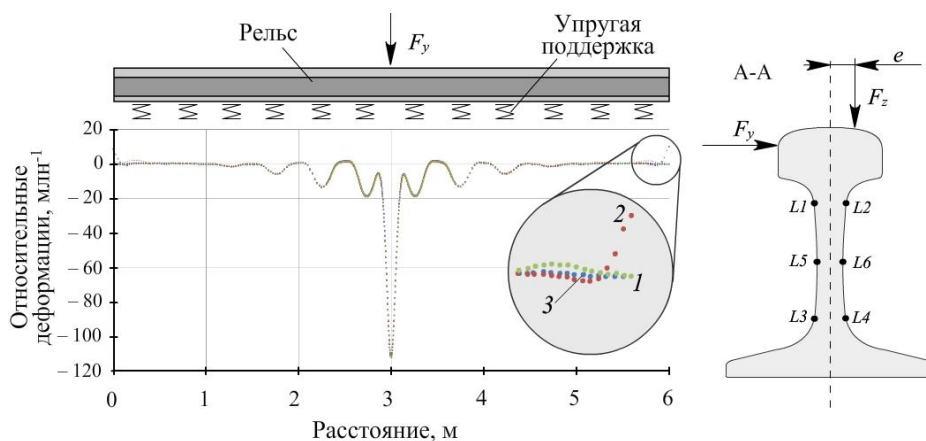


Рис. 4. Результаты расчета деформаций ε_z на линии $L6$ методом конечных элементов:
1 – жесткая заделка грани; 2 – жесткая заделка нижней кромки; 3 – зеркальные граничные условия

минимумы деформаций, связанные с воздействием сил реакций опор. На расстояниях свыше 1,5 м от точки приложения силы деформации по абсолютной величине не превышают 1 % их экстремального значения.

Для верификации разработанной модели выполнены исследования влияния граничных условий, среднего размера элемента и способов приложения силы (точечный или распределенный) на результаты расчета. Неопределенность результатов расчета δ_l для каждого параметра модели оценивалась в точке $x_0 = 3$ м по формуле относительной погрешности:

$$\delta_l = \frac{\varepsilon_2(x_0) - \varepsilon_1(x_0)}{\varepsilon_1(x_0)} \cdot 100 \%, \quad (6)$$

где $\varepsilon_2(x_0)$, $\varepsilon_1(x_0)$ – результаты расчета модели с двумя различными значениями параметра, млн^{-1} .

Вариации граничных условий на торцах модели в виде жесткой заделки грани, нижнего ребра и зеркального закрепления вызывают существенные (более 1 %) изменения распределения деформаций только вблизи торцов в пределах 1 м. В средней части максимальная неопределенность результатов расчета не превышает 0,26 %.

При уменьшении среднего размера конечных элементов с 2,5 до 1,0 мм в области $x \in (2,5; 3,5)$ м неопределенность расчета не превышает 0,36 %, а при изменении способа приложения силы с точечного на распределенный по площади 40 мм^2 – 0,44 %. Разработанная математическая модель позволяет расчетным способом получить распределение деформации рельса в средней части модели в зоне протяженностью 1 м, с пределом допускаемой относительной неопределенности, равным 0,5 %.

Анализ результатов

На основе построенной конечно-элементной модели выполнена оценка погрешности измерений вертикальных и боковых сил способом «РЖД-2016» (1) и способом измерения вертикальной силы одной парой тензодатчиков (4). Для фиксированных граничных условий к модели прикладывались различные комбинации сил. В точках L1–L6 (см. рис. 4) рассчитывались деформации, по которым определялись элементы матриц g_{ij} и q_{ij} . Модель

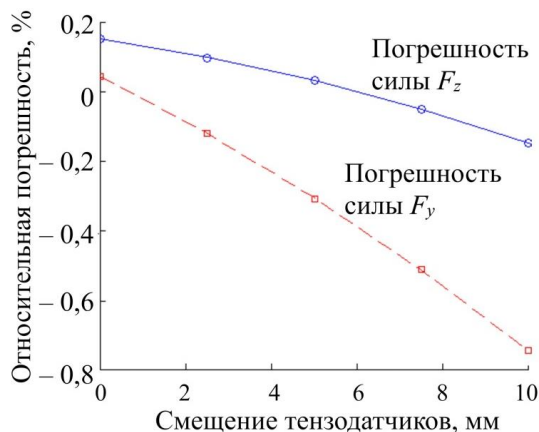
нагружалась комбинацией вертикальной силы $F_{z0} = 100$ кН с эксцентриситетом $e = 10$ мм и боковой силы $F_{y0} = 25$ кН. Методом конечных элементов рассчитывались деформации рельса в точках L1–L6 и решением систем уравнений (1) и (4) определялись значения сил F_z и F_y . Относительная погрешность измерения силы определялась выражением

$$\delta_F = \frac{F - F_0}{F_0} \cdot 100 \%. \quad (7)$$

Влияние на погрешность несимметричности пар тензодатчиков, расположенных на внутренней и наружной сторонах рельса, оценивалось при смещении одного тензодатчика относительно другого в вертикальной плоскости вдоль оси z (рис. 5). В способе «РЖД-2016» такое смещение на расстояние до 10 мм не оказывает существенного влияния на результаты измерений вертикальной и боковой силы. Возникающие при этом погрешности не превышают 0,8 %, что сопоставимо с неопределенностью результатов расчета. В способе измерения вертикальной силы одной парой тензодатчиков погрешность измерений силы линейно зависит от смещения с коэффициентом пропорциональности, равным $0,7 \% \cdot \text{кН}^{-1}$. Таким образом, чувствительность данного способа к несимметричности установки тензодатчиков почти в 10 раз выше по сравнению со способом «РЖД-2016».

Жесткость подрельсового основания влияет на распределение деформаций рельса и, следовательно, на погрешность измерения сил. Для оценки этого влияния модель с распределенной жесткостью 10^9 (Н/м)/ м^2 калибровалась опорными значениями сил (3) и определялись элементы матриц g_{ij} и q_{ij} . Жесткость модели изменялась в диапазоне от 10^6 до 10^{12} (Н/м)/ м^2 , рассчитывались деформации, по формуле (7) оценивались относительные погрешности измерения сил (рис. 6). При уменьшении жесткости подрельсового основания в способе «РЖД-2016» (см. рис. 6, а) погрешность измерения вертикальной силы F_z по абсолютной величине резко возрастает и достигает 10...30 %. Погрешность измерения боковой силы F_y , наоборот, при повышении жесткости увеличивается до 5...10 %. Чувствительность метода к изменению жесткости подрельсового основания связана с изгибом

а)



б)

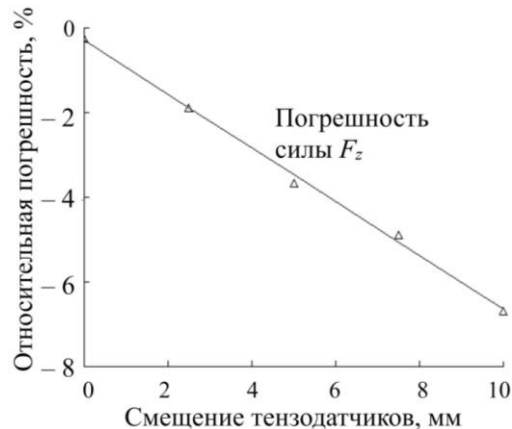
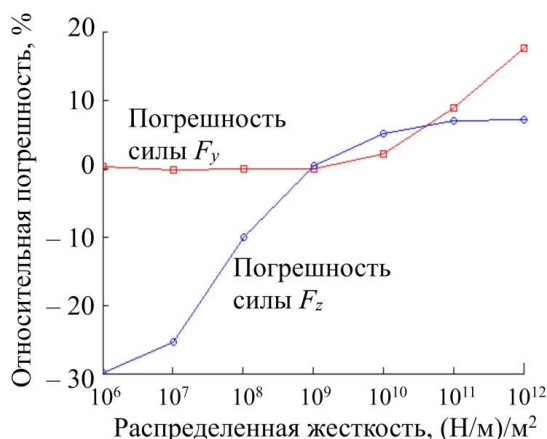


Рис. 5. Зависимость погрешности измерения силы от смещения парных тензодатчиков по вертикали вдоль оси z :

а – способ «РЖД-2016»; б – способ с одной парой тензодатчиков

а)



б)

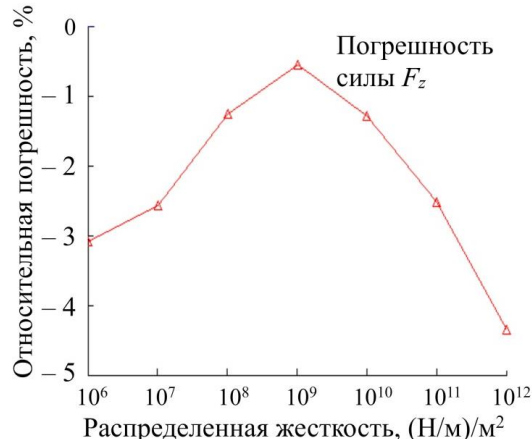


Рис. 6. Влияние жесткости подрельсового основания на определение вертикальной F_z и боковой F_y сил матричным методом (а) и методом с одной парой тензодатчиков (б) в полулогарифмическом масштабе

рельса в вертикальной плоскости, который вызывает перераспределение деформаций шейки рельса между точками $L1$, $L2$ и $L3$, $L4$ и изменяет действительные значения элементов матрицы g_{ij} .

В способе измерения вертикальной силы одной парой тензодатчиков погрешность (см. рис. 6, б) не превышает 5 % при вариациях жесткости подрельсового основания в широком интервале от 10^6 до 10^{12} (Н/м)/м². Это связано с расположением точек измерения деформаций вблизи нейтральной оси рельса, на которой минимально влияние изгиба рельса в вертикальной плоскости.

Экспериментальная калибровка участка пути для способа измерения вертикальной

силы одной парой тензодатчиков проводилась с помощью специализированного нагружающего устройства (см. рис. 3). Выполнены эксперименты по проверке линейности зависимости симметричных деформаций от вертикальной силы и оценке влияния боковой силы на результат измерения вертикальной силы.

Рельс, предварительно нагруженный вертикальной силой $F_z = 200$ кН, ступенчато нагружался до максимальной боковой силы $F_y = 100$ кН (рис. 7). Изменение симметричных деформаций под действием боковой силы свидетельствует о ее влиянии на погрешность. На графике зависимости деформаций от времени (см. рис. 7) видны флуктуации, связанные как с дрейфом нуля тензометрической системы,

так и с влиянием боковой силы. Возникающая при этом погрешность не выходит за границы $\pm 5\%$, а погрешность, непосредственно связанная с боковым воздействием, не превышает 4% .

Зависимость симметричных деформаций от вертикальной силы удовлетворительно описывается линейной зависимостью (рис. 8) с коэффициентом пропорциональности $1,7 \text{ млн}^{-1} \cdot \text{кН}^{-1}$ и коэффициентом корреляции

$0,99$. Воздействие боковой силы несущественно влияет на линейность зависимости, коэффициент корреляции составляет более $0,98$.

Выводы

Для исследования способов измерения сил в системе колесо – рельс разработана конечно-элементная модель измерительного рельса.

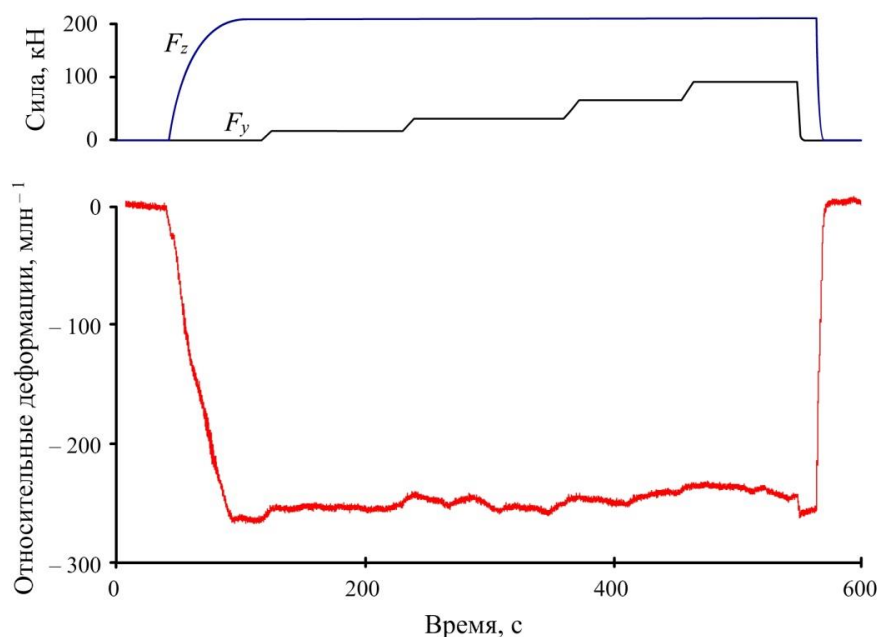


Рис. 7. Графики зависимости сил F_z и F_y и симметричных деформаций от времени при калибровке измерительного участка пути

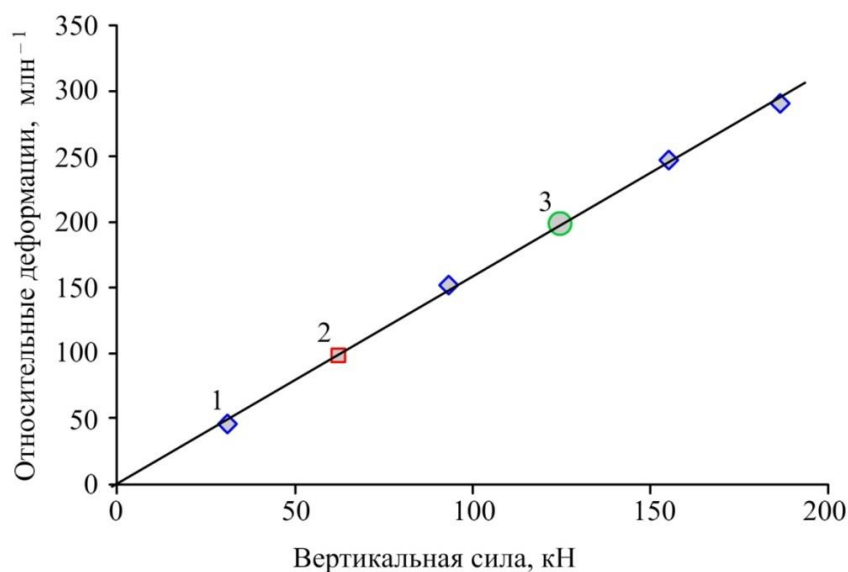


Рис. 8. Зависимость симметричных деформаций от вертикальной силы:
1 – без боковой силы; 2 – боковая сила 62 кН; 3 – боковая сила 124 кН; линия – аппроксимация методом наименьших квадратов

Выявлены источники неопределенностей результатов расчетов, связанные с влиянием граничных условий на торцах рельса, размером элементов и способом приложения силы (точечный и распределенный) на поверхность катания рельса. В средней части модели в зоне протяженностью 1 м суммарная неопределенность результатов расчета деформаций не превышает $\pm 0,5\%$.

В методе с двумя точками регистрации деформаций для измерения вертикальной силы несимметричность пары тензодатчиков, равная 10 мм, приводит к погрешности измерений более 5 %, которая не может быть устранена на этапе калибровки, поэтому допустимая погрешность установки тензодатчиков по высоте не должна превышать 1 мм. Метод «РЖД-2016» не чувствителен к несимметричности точек измерения деформаций по высоте до 5 мм.

Вариации жесткости подрельсового основания, возникающие после калибровки изме-

рительного участка пути, в способе «РЖД-2016» оказывают существенное влияние на погрешность измерения вертикальной силы (около 30 %) при уменьшении жесткости и на погрешность измерения боковой силы (до 20 %) при увеличении жесткости подрельсового основания. В способе измерения вертикальной силы с использованием одной пары тензодатчиков, расположенной в нейтральной плоскости рельса, погрешность, связанная с изменением жесткости, не превышает 5 %.

Разработанное специализированное устройство для калибровки измерительного участка пути обеспечивает возможность нагружения рельса вертикальной до 218 кН и боковой до 110 кН силами. Экспериментально доказана линейность зависимости симметричных деформаций шейки рельса от вертикальной силы. Боковая сила до 110 кН не оказывает существенного влияния на результат измерения вертикальной силы, а погрешность не превышает 5 %.

Библиографический список

1. Огневой В. Я. Фрактографические особенности разрушения литых боковых рам тележек грузовых вагонов // Ползуновский альманах. 2011. № 4. С. 39–41.
2. Руководящий документ по ремонту и техническому обслуживанию колесных пар с буксовыми узлами грузовых вагонов магистральных железных дорог колеи 1520 (1524) мм. РД ВНИИЖТ 27.05.01–2017. URL: https://www.ldz.lv/sites/default/files/09_KV_Padome_57_1%20v_p.%2025.7_Piel.%2016_2.pdf (дата обращения: 15.05.2018).
3. Дистанционный размерный контроль колес в движущемся железнодорожном составе / А. Н. Байбаков, К. И. Кучинский, С. В. Плотников, В. В. Сотников, Ю. В. Чугуй // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 102–109.
4. Двоеглазов А. В., Хоперский В. И. Наглядно о структуре КТСМ-02 // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 4. С. 39–41.
5. Зингер М. Б. УКСПСК гарантирует повышение надежности // Автоматика, связь, информатика. 2011. № 2. С. 24–27.
6. Автоматическая диагностика колесных пар с помощью системы ARGUS // Железные дороги мира. 2004. № 5. С. 61–63.
7. Измерительная система Quo Vadis // Железные дороги мира. 2005. № 11. С. 64–68.
8. LeDosquet G., Pawellek F., Muller-Bouttau F. Lasca: Automatic monitoring of the running quality of railway vehicles // RTR. 2007. № 2. Р. 1–6.
9. Обнаружение некруглости колес // Железные дороги мира. 2003. № 8. С. 64–68.
10. Clegg E., Blevins W. G. Wheel Impact Load Detector Experience on CN American Railway // Engineering Association Bulletin. 1996. Р. 499–523.
11. Lahti Otto. Junan pyörävikojen havainnointi raiteeseen asennetulla mittalaitteella. Ratahallintokeskuksen julkaisu A 12/2008. Helsinki, 2008.
12. Гапанович В. А. Вопросы взаимодействия подвижного состава и инфраструктуры при тяжеловесном движении // Железнодорожный транспорт. 2016. № 10. С. 10–15.
13. 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 (38). С. 53–57.

14. Микропроцессорные многоканальные тензометрические системы для динамических испытаний конструкций / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, С. А. Бехер, М. С. Никитенко // Датчики и системы. 2011. № 8. С. 29–34.

15. Бехер С. А., Коломеец А. О. Повышение достоверности контроля колес грузовых вагонов в движении с использованием цифровых методов обработки информации // Дефектоскопия. 2015. № 3. С. 61–68.

S. A. Bekher, T. V. Sych, A. O. Kolomeets, A. S. Kochetkov

Development of Means for Monitoring the Dynamic Processes of Wheels and Rails Interaction in Service

Abstract. Purpose. The modern control systems of dynamic interaction between railway vehicles and efficiently rails are based on indirect measurements of deformations, forces and vibration accelerations. Systems allow to find efficiently the faulty rolling stock making excess impact on a path. However, for their mass application on Russian Federation railroads it is necessary to resolve metrological issues. The work purpose is calibration technique creation of the strain-measuring way site and error estimation of dynamic forces measurement in system wheels – rails under train loading.

Methods. Researches were conducted by a calculation finite elements method and experimentally in operation. The measuring site equipped with strain gages is created and the specialized loading device reproducing vertical force to 218 kN and side force up to 110 kN is developed. The rapid microprocessor strain-measuring «Dinamika-3» system was applied to field tests.

The terminating and element model with a variable average size of elements, equal 1 mm in the mid-range and 5 mm at model end faces is developed. The average size of elements, boundary conditions at end faces of model and a way of vertical force application on results of calculation evaluation is executed. Indeterminacies of results do not exceed 0.5%.

Results and conclusions. Error sources of force measurement for a way of Russian Railway-2016 and a way of vertical force measurement by one pair of strain gages are investigated. Asymmetry installation influence of strain gages and a rigidity of the sub rail basis on accuracy of force measurements are established. The vertical eccentricity in pair of strain gages of 5 mm defines 5% an error that cannot be eliminated at a calibration stage. The calibration variations of the sub rail basis rigidity arising later lead to measurements errors by «RGD-2016» method at the level of 20–30%. For providing an error no more than 1% the necessary installation accuracy of deformation converters is 1 mm.

Calibration of the measuring site of a way is carried out. The linear relation of the symmetric deformations in pair of strain gages at most with a coefficient of correlation more than 0,99 is experimentally proved. It is shown, that influence of side impact on a bias of vertical force it is comparable to a drift of zero strain measurement system and does not exceed 1%.

Key words: *monitoring; car running gears; measurement; calibration; dynamic force; strain measurement; rail; strain.*

Бехер Сергей Алексеевич – доктор технических наук, доцент кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация», заведующий НИЛ «Физические методы контроля качества». E-mail: behers@mail.ru

Сыч Татьяна Викторовна – кандидат технических наук, научный сотрудник НИЛ «Физические методы контроля качества». E-mail: tatyna979@mail.ru

Коломеец Андрей Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные технологии транспорта» СГУПС, научный сотрудник НИЛ «Физические методы контроля качества». E-mail: andreykolomeec@yandex.ru

Кочетков Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электротехника, диагностика и сертификация» СГУПС, ведущий инженер НИЛ «Физические методы контроля качества». E-mail: kochetkovas@stu.ru