

Измерение боковых нагрузок от колес на рельсы



Ю. П. Бороненко,
д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Вагоны и вагонное хозяйство» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I (ПГУПС)



Р. В. Рахимов,
к. т. н., докторант ПГУПС

Для повышения точности измерений сил в контакте «колесо–рельс» предлагается кусочно-непрерывная регистрация боковых нагрузок от взаимодействия колеса с рельсом по измерению нормальных напряжений в двух сечениях рельса при прохождении колесом межшпального промежутка. Проведены расчеты напряженно-деформированного состояния рельса типа Р65 с использованием метода конечных элементов и определены места установки тензорезисторов. Применение предлагаемого метода позволит увеличить количество статистически достоверных результатов измерений, что обеспечит повышенную точность измерения боковых сил при испытаниях и диагностировании подвижного состава железных дорог колеи 1520 мм.

В связи с развитием тяжеловесного движения при разработке инновационных грузовых вагонов с увеличенными осевыми нагрузками актуальны вопросы, связанные с контролем воздействия подвижного состава на железнодорожный путь. В России для измерения бокового воздействия подвижного состава на железнодорожный путь применяют методы Шлюмпфа согласно ГОСТ Р 55050-2012 [1] и «РЖД-2016» [2]. Известны и другие методы, например, метод О. П. Ершкова [3-4]. Все эти методы основаны на применении тензорезисторов, устанавливаемых на шейке рельса, отличаются расположением тензорезисторов и спецификой обработки получаемых сигналов.

На железных дорогах Европы и Северной Америки для измерения боковых сил используется «американский метод» [5], основанный на измерении напряжений в рельсе тензорезисторами, расположенными на подошве рельса под углом 45° к продольной оси рельса. Выполненные теоретические и экспериментальные исследования [6] по определению корректности «американского метода» показали наличие линейной зависимости измеренных величин боковых сил от величин поперечного смещения точки приложения результирующей пространственной силы, воспринимаемой головкой рельса.

Метод Шлюмпфа предусматривает измерения боковых сил четырьмя тензорезисторами [7], установленными симметрично на обе стороны шейки рельса. Он основан на линейной зависимости величины боковых сил P от разности противоположных по знаку изгибающих моментов ΔM , действующих на

взаимно симметричные относительно нейтральной оси шейки рельса точки O_1 и O_2 поперечного сечения рельса (рис. 1).

Изгибающие моменты относительно точек O_1 и O_2 от действия вертикальной силы Q и боковой силы P можно записать в следующем виде:

$$\begin{cases} M_{O_1} = QL_x - PL_{y1}; \\ M_{O_2} = QL_x - PL_{y2}. \end{cases}$$

Разница изгибающих моментов:

$$M_{O_1} - M_{O_2} = QL_x - PL_{y1} - QL_x + PL_{y2} = P(L_{y2} - L_{y1}).$$

Тогда боковая сила P определяется выражением:

$$P = \frac{M_{O_1} - M_{O_2}}{L_{y2} - L_{y1}} = \frac{\Delta M}{\Delta L_y}. \quad (1)$$

Точки O_1 и O_2 выбирают так, чтобы значения момента сопротивления горизонтальных сечений, проходящих через эти точки, были равны, а наклеенные вертикально на шейку рельса тензорезисторы в указанных точках испытывали деформации, пропорциональные действующим моментам M_{O_1} и M_{O_2} . Это условие обеспечивается подбором одинаковой толщины шеек рельсов по оси тензорезисторов в точках O_1 и O_2 .

Однако при смещении вертикальной силы относительно середины головки рельса не наблюдается равенство напряжений σ_y в точках O_1 и O_2 . Поэтому получаемые величины боковых сил в контакте «колесо–рельс» зависят от положения центра пятна контакта на головке рельса и при определении их значений неизбежны погрешности.

Данные о влиянии смещения вертикальной силы на получаемые величины боковых сил существенно различаются.

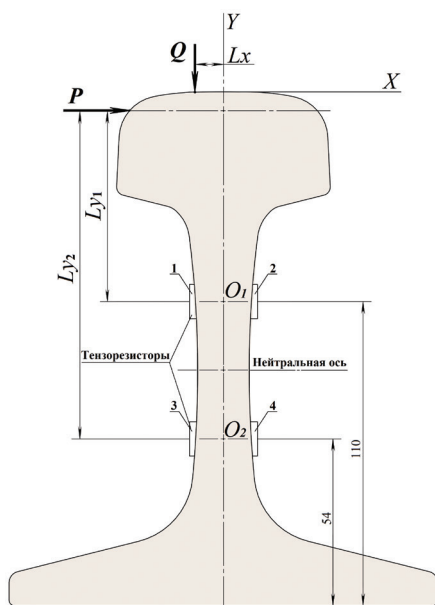


Рис. 1. Схема наклейки тензорезисторов на шейку рельса для измерения боковых сил по методу Шлюмпфа: L_{y1} и L_{y2} – расстояния от плоскости приложения боковой силы P до точек O_1 и O_2 поперечного сечения рельса; L_x – расстояние от плоскости приложения вертикальной силы Q до вертикальной оси Y симметрии рельса; X , Y – направления осей системы координат; 1–4 – тензорезисторы

По исследованиям ВНИИЖТ [4] максимальная погрешность измерения боковых сил составляет 7–9 % и обусловлена главным образом точностью выбора сечений для монтажа тензорезисторов на шейке рельса. Согласно результатам ВНИКТИ [8] метод Шлюмпфа может давать погрешность в определении боковых сил до 40 %, а по исследованиям ВНИЦТТ [9] ошибка может достигать до 100% при смещении точки контакта колеса с рельсом в поперечном направлении.

С целью корректного измерения боковых сил разработан экспериментально-расчетный метод «РЖД-2016» [2] с расположением тензорезисторов, аналогичным используемому в методе Шлюмпфа. Принципиальное отличие метода «РЖД-2016» от метода Шлюмпфа состоит в измерении боковой и вертикальной сил, а также суммарного момента в поперечном сечении рельса при движении по нему подвижного состава при любом положении точки контакта в системе «колесо–рельс». Три указанных компонента полностью определяют нагруженность поперечного сечения рельса [9].

При использовании указанных методов боковую силу, возникающую при взаимодействии колеса и рельса, определяют только в момент расположения колеса над сечениями тензорезисторов, непрерывная регистрация сил в контакте «колесо–рельс» невозможна. Результаты измерений зависят от скорости движения и частоты квантования измерительной аппаратуры. Для получения статистически достоверных результатов требуются многократные проходы испытуемого подвижного состава по измерительному участку [10].

В исследовательских центрах железных дорог ЕС используется «французский метод» [11], основанный на измерении напряжений в шейке рельса от воздействия изгибающего момента в горизонтальной плоскости, создаваемого боковой силой от проходящего колеса. Измерения по «французскому методу» выполняются тензорезисторами аналогично методу Шлюмпфа установленными на шейке рельса в двух сечениях рельса в каждом межшпальном промежутке. В работе [6] показано, что оптимальное расстояние между двумя измерительными сечениями рельса 60E1, расположенными в междушпальном пространстве, составляет 350 мм при расстоянии между осями шпал 60 см.

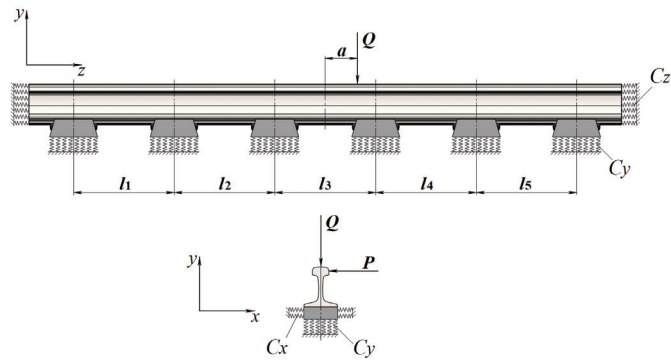


Рис. 2. Расчетная схема рельса: Q – вертикальная сила; P – боковая сила; $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = l_5$ – длина межшпальных промежутков (расстояние между опорами); a – координата приложения вертикальной и боковой сил относительно оси симметрии межшпального промежутка; C_x и C_y – поперечная (горизонтальная) и вертикальная жесткость связи рельса со шпалами; C_z – продольная жесткость рельса

Данный метод позволяет существенно увеличить фиксируемую тензорезисторами информацию. В этой же работе указано, что результаты измерений сильно зависят от параметров железнодорожного пути (расстояние между центрами шпал, жесткость рельса, жесткость опоры и т. д.). Железнодорожный путь в «Пространстве 1520» имеет существенные отличия от путей колеи 1435 мм. Поэтому для повышения точности измерений необходима разработка метода, позволяющего увеличить длину измерительной зоны аналогичного «французскому» методу и учитывающему специфику отечественных железнодорожных путей.

Цель дальнейших теоретических исследований по определению мест установки тензорезисторов на рельсе состояла в разработке технологии кусочно-непрерывной регистрации боковых нагрузок от взаимодействия колеса с рельсом на значительной части межшпального промежутка.

Разработка нового метода определения боковой силы при взаимодействии колеса с рельсом

В качестве прототипа был принят метод кусочно-непрерывной регистрации вертикальных сил между колесом и рельсом по напряжениям в двух сечениях рельса [12], обеспечивающий повышенную точность измерений вертикального воздействия подвижного состава на путь на значительной части межшпального промежутка [13-15], и метод регистрации боковых сил изложенный в работе [11].

Расчетная схема, модель и выбор метода расчета

Упрощенная расчетная модель пути длиной 3500 мм представляла собой рельс типа Р65 по [16] с граничными

условиями, характеризующими жесткость верхнего строения железнодорожного пути и креплений (рис. 2). В качестве граничных условий принимались кинематические связи, представляющие собой упругие элементы (Elastic Support/Foundation Stiffness), что позволило учесть вертикальную и поперечную жесткость связи рельса со шпалами, а также продольную жесткость рельса. При расчетах вертикальная и боковая силы были размещены совместно в одном сечении и последовательно смещались по рельсу. Рассматривались разные положения колесной пары относительно продольной оси рельса во время движения.

Для приложения вертикальных нагрузок на поверхности катания рельса были предусмотрены небольшие площадки пятна контакта площадью 144 мм² (рис. 3). Центр площадки пятна контакта:

- расположен в середине головки рельса;
- смещен на 11,7 мм наружу от середины головки рельса;
- смещен на 11,7 мм внутрь от середины головки рельса.

Для приложения боковой силы на боковую грань рельса были предусмотрены площадки пятна гребневого контакта площадью 35 мм² (рис. 3). Центр такой площадки находился на расстоянии 13 мм от уровня головки рельса.

Для расчетов по методу конечных элементов использовали программный комплекс ANSYS Workbench, версия 18. Сетка конечных элементов, нанесенная на модель рельса, включала в себя 116 884 элемента и 430 869 узлов. Для расчета использовались конечные элементы типа Solid186 размером 7,5 мм. Элемент Solid186 имеет квадратичные формы с двадцатью узлами, в каждом узле три степени свободы: перемещение

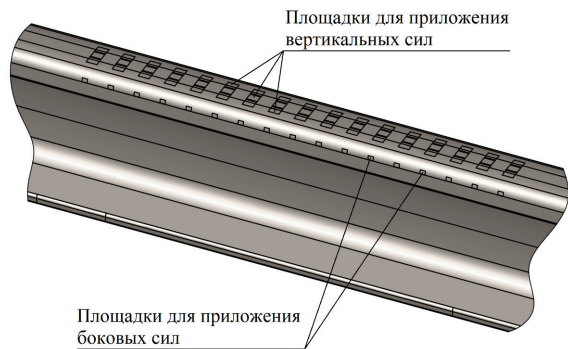


Рис. 3. Площадки на поверхности рельса для приложения вертикальных и боковых сил

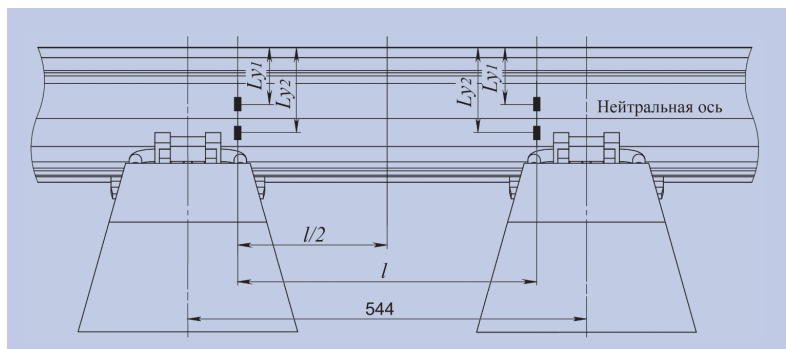


Рис. 4. Схема расположения точек замера напряжений при их симметричном расположении

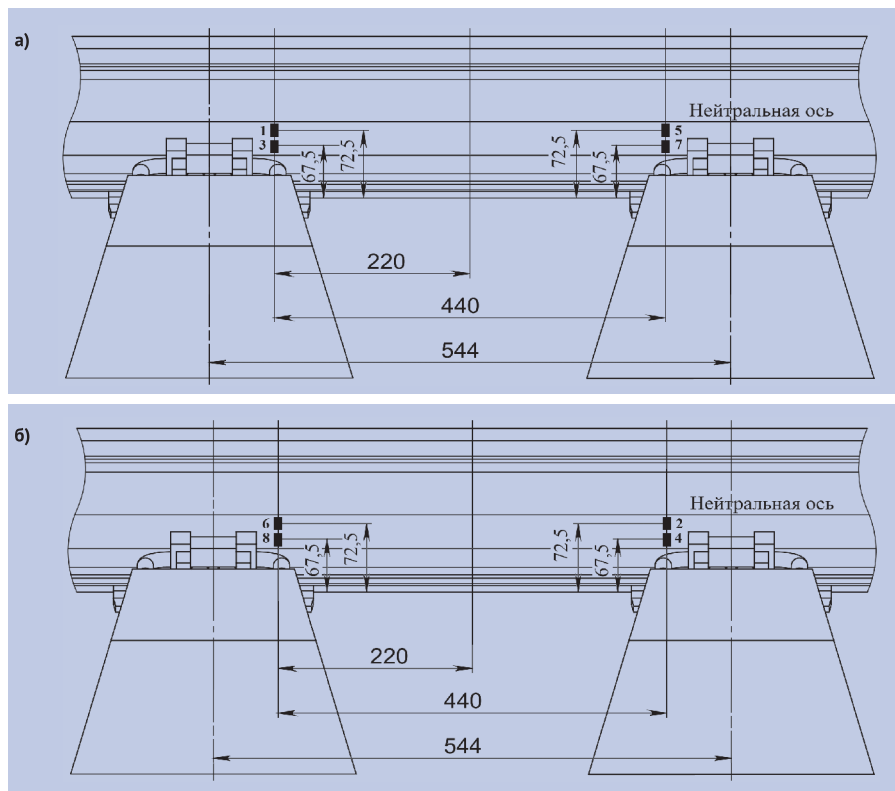


Рис. 5. Схема расположения точек замера напряжений ниже нейтральной оси рельса: а – вид изнутри колеи; б – вид снаружи; 1–8 – номера точек замеров

в направлении осей x , y и z узловой системы координат.

Исследования напряженно-деформированного состояния рельса при действии нагрузок от колеса на рельс

На первом этапе исследовалась точность «французского метода» при измерениях на пути традиционной для колеи 1520 мм конструкции. Для этого восемь виртуальных измерительных точек устанавливали на обе стороны шейки рельса в двух вертикальных поперечных сечениях, расположенных в межшпальном промежутке. Величины L_{y1} , L_{y2} изменяли с сохранением симметричного расположения точек замера относительно нейтральной оси рельса (рис. 4). Расстояние $L_{y1} - L_{y2}$ в вертикальном направлении

между точками замера изменяли от 5 до 90 мм с шагом 5 мм, а расстояние l в горизонтальном направлении принимали от 274 до 544 мм с шагом 10 мм.

В результате многовариантных расчетов с использованием метода конечных элементов были получены зависимости главных, нормальных и касательных напряжений, возникающих в исследуемых сечениях рельса при действии вертикальных и боковых сил.

Проведенные расчеты показали, что при такой расстановке точек замера нельзя с достаточной точностью определить величину боковой силы для пути с рассматриваемыми в работе инерционными и силовыми характеристиками железнодорожного пути с рельсами Р65 и эпюрой укладки бетонных шпал

1800 шт./км. В лучших вариантах максимальная погрешность выражения (1) составляла 13,8 %. Это было вызвано нелинейной зависимостью напряжений σ_y от смещения точки контакта в поперечном направлении. Поэтому в дальнейшем было принято решение отказаться от «французского» подхода к измерениям с симметричной установкой точек замера относительно нейтральной оси рельса.

На втором этапе проведены многовариантные расчеты с измерением нормальных напряжений в точках без сохранения симметричного расположения точек замера относительно нейтральной оси рельса. Лучшие результаты для восстановления боковых сил от взаимодействия колеса с рельсом дали размещения точек замеров ниже нейтральной оси рельса (рис. 5).

В обозначенных точках определены значения нормальных напряжений σ_y . В этом случае разность нормальных напряжений σ_y не зависят от смещения вертикальной силы поперек рельса и для определения боковой силы можно использовать выражение (1), как в методе Шлюмпфа. Величина ΔL_y постоянная, возникающие напряжения линейно зависят от ΔM , следовательно, выражение (1) можно заменить эквивалентным:

$$P = \frac{\Delta M}{\Delta L_y} = K \Delta \sigma_y .$$

Здесь K – масштабный коэффициент, зависящий от инерционных характеристик сечения рельса; $\Delta \sigma_y$ – разность нормальных напряжений, возникающих в точках (рис. 5), которая определяется по формуле:

$$\Delta \sigma_y = (\Delta \sigma_{y34} + \Delta \sigma_{y78}) - (\Delta \sigma_{y12} + \Delta \sigma_{y56}), (2)$$

где $\Delta \sigma_{y12}$, $\Delta \sigma_{y34}$, $\Delta \sigma_{y56}$ и $\Delta \sigma_{y78}$ – значения разности нормальных напряжений в измерительных точках 1–2; 3–4; 5–6 и 7–8 соответственно, определяемые по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta \sigma_{y12} &= \sigma_{y1} - \sigma_{y2}; \\ \Delta \sigma_{y34} &= \sigma_{y3} - \sigma_{y4}; \\ \Delta \sigma_{y56} &= \sigma_{y5} - \sigma_{y6}; \\ \Delta \sigma_{y78} &= \sigma_{y7} - \sigma_{y8}. \end{aligned}$$

Рассчитанные значения $\Delta\sigma_y$ по формуле (2) при действии вертикальной силы 120 кН и боковой силы 45 кН представлены на рис. 6.

Видно, что значения $\Delta\sigma_y$ в центральной части межшпального промежутка практически не зависят от расположения точки приложения вертикальной силы относительно середины головки рельса, однако имеют некоторые отклонения на протяжении измерительной зоны, от сечения -8 до сечения 8. При увеличении длины измерительной зоны отклонение увеличивается.

Таким образом, были получены значения $\Delta\sigma_y$, которые при умножении на масштабный коэффициент позволяют определить величину боковой силы при взаимодействии колеса с рельсом.

Из анализа результатов расчета по методу конечных элементов следует, что такое расположение точек замеров с применением постоянного масштабного коэффициента обеспечивает стандартное отклонение восстановленной боковой силы не более 4 % по длине измерительной зоны ~140 мм. Восстановленные значения боковой силы при действии вертикальной силы 120 кН и боковой силы 45 кН представлены на рис. 7.

По результатам этих расчетов была предложена для восстановления боковых сил при взаимодействии колеса с рельсом установка восьми тензорезисторов в межшпальном промежутке ниже нейтральной оси рельса и перпендикулярно продольной оси рельса (рис. 5). Для исключения влияния смещения вертикальных сил относительно продольной оси рельса и обеспечения точности измерений боковых сил от взаимодействия колеса с рельсом тензорезисторы устанавливаются на обеих сторонах шейки рельса в двух вертикальных поперечных сечениях, расстояние между которыми составляет 440 мм. Сечения расположены симметрично на расстоянии 220 мм от вертикальной центральной поперечной плоскости межшпального промежутка. Тензорезисторы с базой 1–5 мм наклеиваются на высотах 67,5 и 72,5 мм от подошвы рельса.

Тензометрическая схема измерений боковых сил от взаимодействия колеса с рельсом

При движении колеса по рельсошпальному пролету возникают деформации, регистрируемые установленными тензорезисторами.

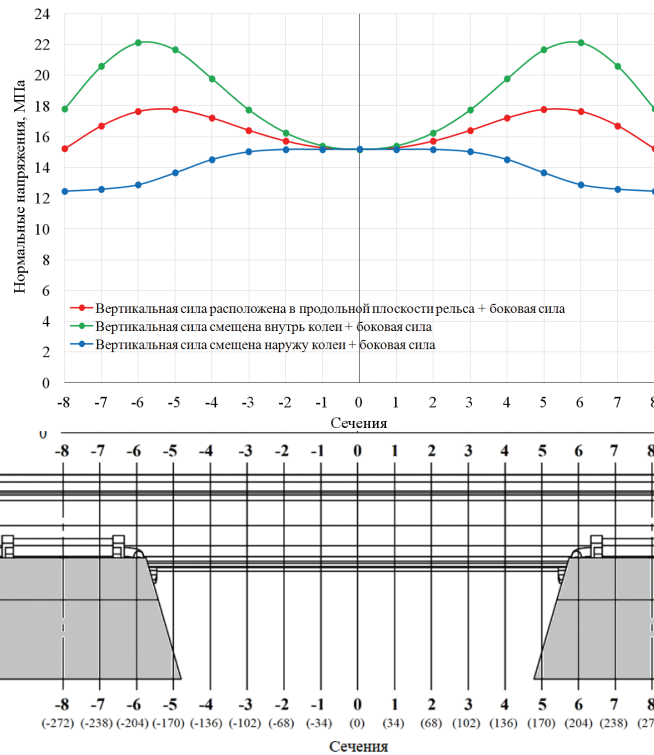


Рис. 6. Разность значений нормальных напряжений $\Delta\sigma_y$, возникающих при перемещении вдоль рельса вертикальной и боковой сил: цифрами от -8 до 8 обозначены номера сечений; в скобках для каждого сечения указано расстояние от средней части межшпального промежутка

Вертикальное нормальное напряжение σ_{yi} , возникающее на шейке рельса, пропорционально деформациям:

$$\sigma_{yi} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{yi} + \mu\epsilon_{xi}),$$

где E — модуль упругости;
 μ — коэффициент Пуассона;
 ϵ_{yi} — линейные деформации, вызванные вертикальными нормальными напряжениями σ_{yi} на шейке рельса;
 ϵ_{xi} — линейные деформации, вызванные поперечными нормальными напряжениями σ_{xi} на шейке рельса.

Разность вертикальных нормальных напряжений, выраженная через деформации, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_{y12} &= \sigma_{y1} - \sigma_{y2} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{y1} - \epsilon_{y2}); \\ \Delta\sigma_{y34} &= \sigma_{y3} - \sigma_{y4} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{y3} - \epsilon_{y4}); \\ \Delta\sigma_{y56} &= \sigma_{y5} - \sigma_{y6} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{y5} - \epsilon_{y6}); \\ \Delta\sigma_{y78} &= \sigma_{y7} - \sigma_{y8} = \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{y7} - \epsilon_{y8}); \\ \Delta\sigma_y &= (\Delta\sigma_{y34} + \Delta\sigma_{y78}) - (\Delta\sigma_{y12} + \Delta\sigma_{y56}) = \\ &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{y3} - \epsilon_{y4} + \epsilon_{y7} - \epsilon_{y8} - \epsilon_{y1} + \epsilon_{y2} - \epsilon_{y5} + \epsilon_{y6}), \end{aligned}$$

где ϵ_{yi} — деформации, которые вызваны вертикальными нормальными напряжениями σ_{yi} , регистрируемые i -м тензорезистором.

Величина боковой силы, выраженная через деформации ϵ_{yi} , имеет вид:

$$P = K \cdot \Delta\sigma_y = K \cdot \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{y3} - \epsilon_{y4} + \epsilon_{y7} - \epsilon_{y8} - \epsilon_{y1} + \epsilon_{y2} - \epsilon_{y5} + \epsilon_{y6}). \quad (3)$$

Суммирование и вычитание сигналов о деформации, входящие в состав формулы (3), выполняются с помощью полного измерительного моста с четырехпроводной схемой соединения (рис. 8).

Изменение выходного напряжения моста определяется выражением

$$\Delta U = \left(\frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R} + \frac{\Delta R_7}{R} - \frac{\Delta R_8}{R} - \frac{\Delta R_1}{R} + \frac{\Delta R_2}{R} - \frac{\Delta R_5}{R} + \frac{\Delta R_6}{R} \right) (1 - \eta) U,$$

где R — сопротивление тензорезисторов;
 $\Delta R_1 - \Delta R_8$ — изменение сопротивления тензорезисторов Т1–Т8 соответственно;

η — параметр, характеризующий нелинейность измерительного моста (при деформациях менее 10^4 мкм/н $\eta < 1\%$);

U — напряжение измерительного моста.

Изменение сопротивления пропорционально деформации

$$\frac{\Delta R_i}{R} = k_T \epsilon_{yi},$$

где k_T — коэффициент тензочувствительности тензорезисторов.

Тогда изменение выходного напряжения будет определяться формулой

$$\Delta U = k_T (\epsilon_{y3} - \epsilon_{y4} + \epsilon_{y7} - \epsilon_{y8} - \epsilon_{y1} + \epsilon_{y2} - \epsilon_{y5} + \epsilon_{y6}) (1 - \eta) U. \quad (4)$$

Из выражений (3) и (4) получаем формулу для вычисления боковых сил, возникающих при взаимодействии колеса и рельса:

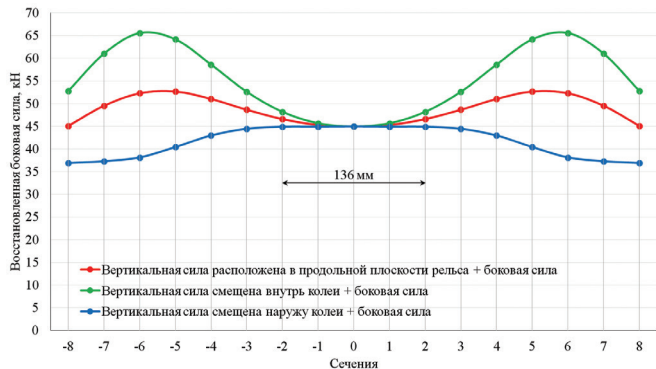


Рис. 7. Восстановленные значения боковой силы по разности значений нормальных напряжений, возникающих в исследуемых сечениях рельса при перемещении вертикальной и боковой сил от сечения -8 до сечения 8

$$P = K \frac{E}{1 - \mu^2} (\epsilon_{y3} - \epsilon_{y4} + \epsilon_{y7} - \epsilon_{y8} - \epsilon_{y1} + \epsilon_{y2} - \epsilon_{y5} + \epsilon_{y6}) = K \cdot \frac{E}{1 - \mu^2} \cdot \frac{\Delta U}{k_T U (1 - \eta)} = K_{гр} \cdot \frac{\Delta U}{U (1 - \eta)}, \quad (5)$$

где $K_{гр} = K \cdot \frac{E}{k_T \cdot (1 - \mu^2)}$ — предлагается определять экспериментально.

Таким образом, для определения боковой силы от взаимодействия колеса с рельсом в межшпальном промежутке по выражению (5) необходимо устанавливать восемь тензорезисторов вертикально на обе стороны шейки рельса, соединенных по схеме (рис. 8) полного моста с четырехпроводной схемой соединения с регистрирующей аппаратурой.

Сравнение нового метода с методом «РЖД-2016»

Число проходов N по измерительным участкам пути устанавливается в зависимости от числа испытательных (измерительных) сечений и необходимого числа измерений для получения достоверных статистических данных по формуле [17]:

$$N \geq \frac{N_{выб}}{N_{сеч} N_{осей}}, \quad (6)$$

где $N_{сеч}$ — число испытательных сечений (для новой схемы с учетом количества сигналов); $N_{осей}$ — число набегающих осей подвижного состава, по которым формируется генеральная совокупность, $N_{осей} = 4$; $N_{выб}$ — объем выборки, обеспечивающий достоверную вероятность 0,994, принимают $N_{выб} \geq 100$.

На рис. 9 представлена зависимость количества измерений (сигналов) от скорости движения диагностируемого подвижного состава при частоте квантования измерительной аппаратуры 2400 Гц по новому методу восстановления боковой силы с погрешностью не более 4 %.

Согласно графику (рис. 9) при скорости движения диагностируемого подвижного состава 72 км/ч и частоте квантования измерительной аппаратуры 2400 Гц (регистрация каждые 0,83 см пути) для измерений по новой схеме с относительной погрешностью не более 4 % составляет 16 сигналов.

С учетом установленного количества сигналов по выражению (6) определена зависимость числа проходов диагностируемого подвижного состава от числа испытательного сечения для получения достоверных статистических данных (рис. 10).

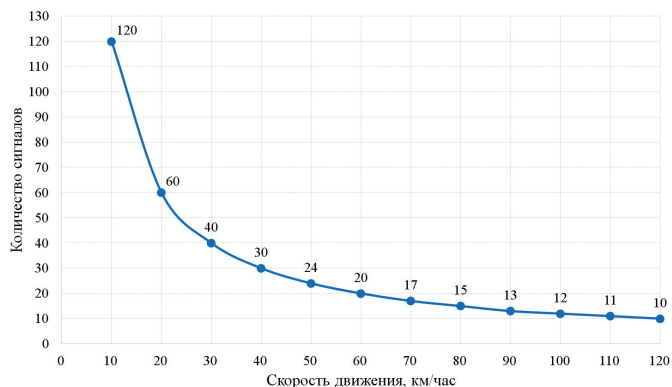


Рис. 9. Зависимость количества измерений (сигналов) от скорости движения диагностируемого подвижного состава при частоте квантования измерительной аппаратуры 2400 Гц по новому методу восстановления боковой силы с погрешностью не более 4 %

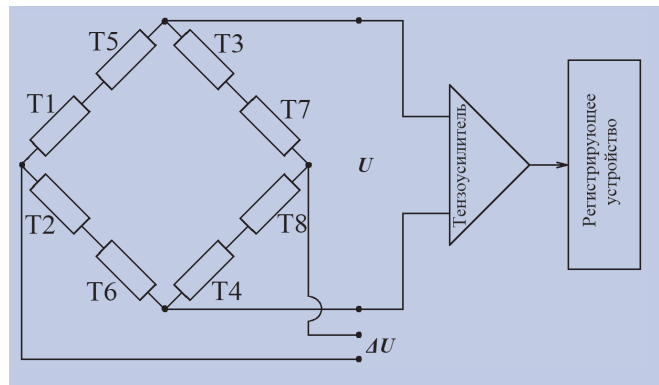


Рис. 8. Схема соединения тензорезисторов в полный мост для регистрации боковых сил

Для определения боковых сил в контакте «колесо–рельс» в одном межшпальном промежутке по методу «РЖД-2016» устанавливаются четыре тензорезистора, а по новому методу – восемь. Определена зависимость числа проходов диагностируемого подвижного состава от количества устанавливаемых тензорезисторов (рис. 11) для получения достоверных статистических данных.

В результате выполненных исследований установлено, что для определения боковых сил новый метод по сравнению с методом «РЖД-2016» имеет преимущества для получения достоверных статистических данных. Так, за один проход диагностируемого подвижного состава по измерительному участку для получения достоверных статистических данных необходимы:

- по новому методу с применением постоянного масштабного коэффициента — две измерительные зоны и 16 тензорезисторов;
- по методу «РЖД-2016» — 25 измерительных сечений и 100 тензорезисторов.

Следовательно, при определении боковых сил от взаимодействия колеса с рельсом новый метод позволяет со-

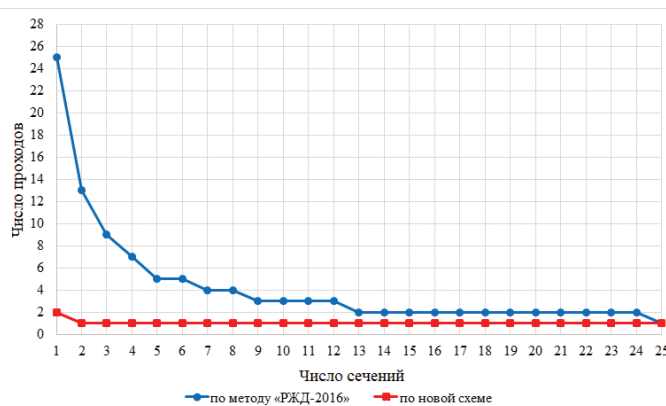


Рис. 10. Зависимость числа проходов диагностируемого подвижного состава от числа испытательных сечений

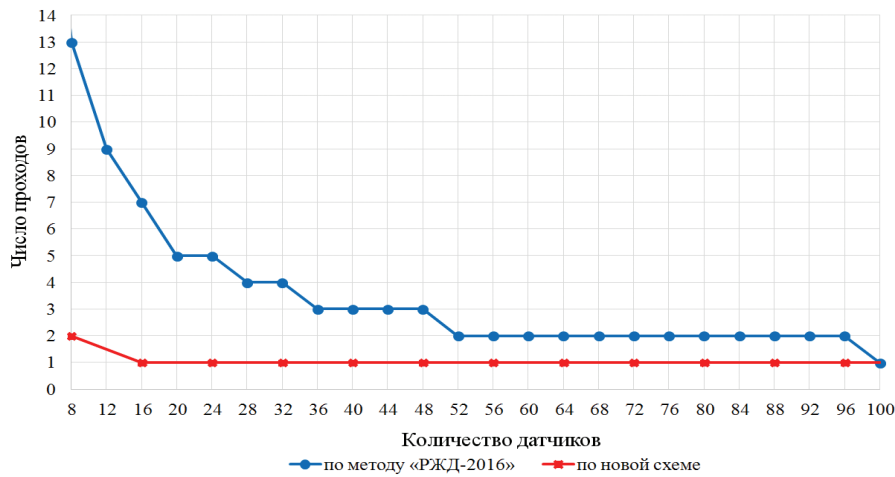


Рис. 11. Зависимость числа проходов диагностируемого подвижного состава от количества устанавливаемых тензорезисторов

кратить необходимое число проходов диагностируемого подвижного состава и количество тензорезисторов для получения достоверных статистических данных. По устройству и способу измерения боковых сил, действующих от колеса на рельс, подана заявка [18] на патент.

Заключение и рекомендации

По результатам теоретических исследований напряженно-деформированного состояния рельса типа Р65 с использованием метода конечных элементов при действии нагрузок от колеса на рельс обоснован метод кусочно-непрерывной регистрации боковых сил от взаимодействия колеса с рельсом по измерению нормальных напряжений в двух сечениях рельса при прохождении колесом межшпального промежутка.

Лучший вариант для восстановления боковых сил от взаимодействия колеса с рельсом Р65 — установка восьми тензорезисторов на высотах 67,5 и 72,5 мм от подошвы рельса в двух вертикальных поперечных сечениях, расстояние между которыми составляет 440 мм, расположенных симметрично относительно вертикальной центральной поперечной плоскости межшпального промежутка. Такое расположение тензорезисторов обеспечивает стандартное отклонение восстановленной боковой силы не более 4 % по длине измерительной зоны ~140 мм.

Применение нового метода при восстановлении боковых сил от взаимодействия колеса с рельсом позволит обеспечить повышенную точность измерений, сократить число проходов диагностируемого подвижного состава и количество тензорезисторов для получения достоверных статистических данных. ■

Литература

- ГОСТ Р 55050-2012. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний (с изм. № 1 от 01.10.2014). — М.: Стандартинформ, 2013. — 15 с.
- Способ измерения трех компонентов нагрузки в сечении рельса при контактом взаимодействии с колесом железнодорожного подвижного состава: пат. 2016119588 РФ: МПК G01L 5/16 (2006.01) / В. С. Коссов, Н. Ф. Красюков, А. А. Лунин и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «РЖД»; заявл. 20.05.2016; опубл. 28.06.2017; бюл. № 19. — 12 с.
- Ромен Ю. С., Сулос О. А., Баляева А. А. Определение сил взаимодействия в системе «колесо-рельс» на основании измерения напряжений в шейке рельса // Вестн. Всерос. науч.-исслед. ин-та железнодорожного транспорта. 2017. № 6 (76). С. 354–361.
- Бржезовский А. М. Методы экспериментальной оценки боковых сил: обзор // Там же. 2017. № 1 (76). С. 10–18.
- Design, Validation and Application of a Monitoring Device for Measuring Dynamic Wheel / Rail Loads. ASME Paper 84-WA/RT-10. 1984.
- Boccolini L. Wayside Measurement of Lateral and Vertical Wheel/Rail Forces for Rolling Stock Homologation / L. Boccolini, A. Bracciali, L. Di Benedetto, R. Mastandrea and F. Piccioli // Proceedings of the Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, J. Pombo, (Editor). Civil-Comp Press, Stirlingshire, Scotland. P. 1–23.
- Вериго М. Ф., Коган А. Я. Взаимодействие пути и подвижного состава. — М.: Транспорт, 1986. — 559 с.

- Коссов В. С., Лунин А. А. Определение показателей воздействия подвижного состава на железнодорожный путь методом «РЖД-2016» // Матер. XII Межд. науч.-техн. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». — СПб.: Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2017. С. 123–126.
- Шевченко Д. В., Савушкин Р. А., Кузьминский Я. О. и др. Разработка новых методов определения силовых факторов воздействия подвижного состава на путь // Техн. жел. дорог. 2018. № 1 (41). С. 38–51.
- Ромен Ю. С. Объем информации для установления условий обращения подвижного состава // Матер. XIII Межд. науч.-техн. конф. «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты». — СПб.: Петерб. гос. ун-т путей сообщения, 2018. С. 122–124.
- Moreau A. La verification de la sécurité contre le déraillement sur la voie spécialisée de Villeneuve-Saint-Georges // Révue Générale des Chemins de Fer. France. 1987. Avril 2. P. 25 – 32.
- Способ измерений вертикальной нагрузки от колеса на рельс и устройство для его осуществления: заявка на патент № 2018140938 РФ: МПК G01L 5/16/ Ю. П. Бороненко, А. С. Даукша, Р. В. Рахимов; заявитель и патентообладатель АО «НВЦ «Вагоны»; заявл. 21.11.2018.
- Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Петров А. А. Кусочно-непрерывное измерение сил между колесом и рельсом по касательным напряжениям в двух сечениях рельса // Транспорт РФ. 2018. № 3 (76). С. 58–64.
- Рахимов Р. В., Петров А. А. Проверка точности восстановления вертикальных нагрузок от колеса на рельс по напряжениям в двух сечениях рельса на стенде // Там же. 2018. № 4 (77). С. 55–58.
- Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Сергеев Д. А. и др. Апробация нового метода измерения вертикальной нагрузки от колеса на рельс // Там же. 2019. № 1 (80). С. 56–59.
- ГОСТ 8161-75. Рельсы железнодорожные типа Р65. Конструкция и размеры. — М.: Изд-во стандартов, 1975. — 9 с.
- Проект ГОСТа. Железнодорожный подвижной состав. Нормы допустимого воздействия на железнодорожный путь и методы испытаний. — ВНИЦТТ, 2019.
- Способ измерения боковых сил, действующих от колеса на рельс и устройство для его осуществления: заявка на патент № 2019114559 РФ: МПК G01L 5/16/ Ю. П. Бороненко, Р. В. Рахимов, А. С. Даукша; заявитель и патентообладатель АО «НВЦ «Вагоны»; заявл. 13.05.2019.