

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 625.1+ 625.03+539.3
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-2>

Возможности мониторинга динамического воздействия подвижного состава на верхнее строение пути с использованием тензометрии и виброметрии



Александр АДАДУРОВ



Виктор ФЕДОРИНИН



Сергей БЕХЕР



Михаил ГУЛЯЕВ

Александр Сергеевич Ададуров¹, Виктор Николаевич Федоринин², Сергей Алексеевич Бехер³, Михаил Александрович Гуляев⁴

¹ ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг» Санкт-Петербург, Россия.

² Филiaal Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (КТИПМ), Новосибирск, Россия.

^{3,4} Сибирский государственный университет путей сообщения (СГУПС), Новосибирск, Россия.

✉ ³ behers@mail.ru.

АННОТАЦИЯ

Одной из приоритетных задач развития железнодорожного транспорта является повышение его эффективности за счет увеличения межремонтных сроков как верхнего строения пути, так и подвижного состава. Решение этой задачи невозможно без своевременной, полной и достоверной информации о динамике взаимодействия подвижного состава с инфраструктурой. Для организации мониторинга динамических процессов используются абсолютно разные типы первичных преобразователей: тензорезисторы, оптоволоконные датчики, динамометры (силоизмерительные подкладки), акселерометры, акустико-эмиссионные датчики. Актуальной при этом становится научно-техническая проблема сравнительных испытаний датчиков разных типов для оценки информативности их сигналов, обоснования критериев выбора первичных преобразователей при решении конкретных задач мониторинга.

Целью исследования являются сравнительные испытания съёмных тензорезистивных датчиков, оптико-поляризационных датчиков деформаций и акселерометров под

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, динамика колеса и рельса, деформации рельса, тензометрия, виброметрия, съёмный тензодатчик, оптико-поляризационный датчик, акселерометр.

проходящим поездом и оценка их информативности для контроля прогиба рельса и обнаружения дефектов поверхности катания колес вагонов.

В исследовании с использованием конечно-элементного моделирования и физической модели рельса, представляющего собой балку на упругом основании, обоснована связь продольных деформаций с вертикальными ускорениями подошвы рельса. На опытном участке пути под проходящим поездом проведены сравнительные испытания съёмных тензорезистивных и оптико-поляризационных датчиков деформаций и акселерометров. Разработан алгоритм обработки сигналов и доказана эквивалентность средств тензометрии и виброметрии для определения прогиба рельса под проходящим поездом. Выполнено сравнение импульсных составляющих сигналов деформаций и виброускорения при движении колеса с дефектом поверхности катания, обоснованы требования к частотным характеристикам датчиков и их креплению на поверхность рельса.

Финансирование: работа частично поддержана средствами государственного бюджета по государственному заданию № 3.2023-ГЗ, регистрационный номер ЕГИСУ НИОТКР 12306300030-0.

Для цитирования: Ададуров А. С., Федоринин В. Н., Бехер С. А., Гуляев М. А. Возможности мониторинга динамического воздействия подвижного состава на верхнее строение пути с использованием тензометрии и виброметрии // Мир транспорта. 2023. Т. 21. № 4 (107). С. 12–20. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-2>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика взаимодействия колес подвижного состава и рельсов [1–4] определяет надёжность и срок службы ходовых частей вагонов [5, 6], элементов верхнего строения пути [7]. Повышенный уровень динамических сил в системе «колесо–рельс» увеличивает вероятность образования усталостных дефектов и скорость развития механических износосов [8–10]. Сверхнормативные силы от подвижного состава, воздействующие на путь, способны привести к разрушению рельса вследствие дефектов, размеры которых не превышают порог фиксации штатных средств ультразвуковой дефектоскопии [11–13]. Например, только в 2022 году на Западно-Сибирской железной дороге допущено 17 изломов по трещинам, у которых все размеры меньше предельных, что не позволяет выявить их ни мобильными средствами дефектоскопии, ни съёмными дефектоскопами. В восьми случаях разрушения произошли по трещинам в перьях подошвы, которые не перешли через вертикальную плоскость симметрии рельса и не были выявлены при ультразвуковом контроле.

Одним из показателей динамического воздействия подвижного состава на путь по ГОСТ 34759-2021 являются продольные напряжения в кромках подошвы рельса, которые при сертификационных испытаниях не должны превышать 240 МПа. Повышенный уровень напряжений в подошве связан с прогибом рельса в вертикальной плоскости под проходящим поездом, от которого напрямую зависит вероятность хрупкого разрушения объекта с поперечной трещиной.

На железных дорогах Российской Федерации и за рубежом для мониторинга технического состояния подвижного состава широко применяются комплексы «Паук», «Нева», «WILD», «WCM», «Lasca», «Atlas-LG» [14]. В этих стационарных средствах диагностики подвижного состава контролируются уровни динамических напряжений, прогиба и вибрации рельсов под проходящим поездом. Преимуществом такого подхода является возможность классификации дефектов подвижного состава не по размерам и типам, а непосредственно по степени их негативно-го воздействия на путь.

Традиционно для контроля механических напряжений и прогиба измеряют относительные деформации рельса под проходящим по-

ездом [15–18]. Сложность организации контроля связана с трудоёмкостью крепления тензорезисторов непосредственно на рельс с помощью клея. При этом результаты измерений деформаций сильно зависят от условий монтажа и человеческого фактора. Использование сварки для крепления тензодатчиков на рельсы возможно только после сертификационных испытаний. Все это существенно ограничивает возможности оперативного изменения места или схемы измерения деформаций.

Актуальными являются работы по созданию съёмных датчиков деформаций, обеспечивающих регистрацию динамических процессов в рельсах на частотах до 10–20 кГц [19–23]. Для повышения достоверности и информативности контроля дополнительно могут быть использованы средства виброметрии – акселерометры. На примере диагностики пролётных строений мостовых конструкций в работе [24] показано, что совместное использование тензометрии и виброметрии позволяет компенсировать ограничения каждого из методов, повысить их область применения и достоверность результатов.

Целью работы являлись оценка возможности и сравнение результатов тензометрии рельсов съёмными тензорезистивными датчиками и оптико-поляризационными датчиками с результатами виброметрии под проходящим поездом для контроля прогиба рельса и обнаружения дефектов поверхности катания железнодорожных колес.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Экспериментальное оборудование и методика испытаний

Для контроля деформаций использовались три различных типа цифровых съёмных датчиков деформаций: два тензорезистивных и один оптико-поляризационный. В тензодатчиках чувствительными элементами являлись плёночные тензорезисторы 2ФКП-5-200-А-12-С с базой 5 мм, сопротивлением 200 Ом и средним значением тензочувствительности 2,04. Тензорезисторы наклеивались на упругий элемент струнного типа из ABS-пластика (рис. 1 а) и консольного типа (балка) из дюрала Д16А (рис. 1 б) с помощью цианоакрилатного клея. Упругие элементы крепились к рельсу двумя дисковыми (кольцевыми) магнитами с силой притяжения 10 Н. Масса пластикового датчика в сборе составляла 26 г, дюралевого чувствительного элемента – 62 г.



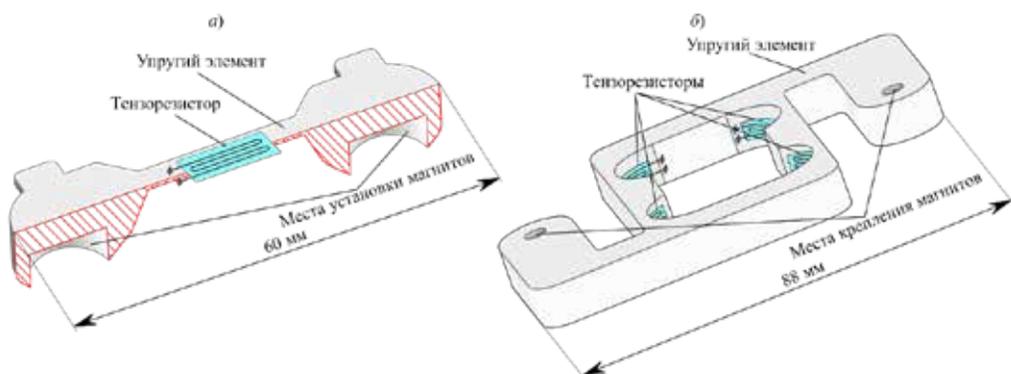


Рис. 1. Конструкции съемных тензодатчиков струнного (а) и балочного (б) типов [выполнено авторами].



Рис. 2. Внешний вид оптико-поляризационного датчика [фото сделано авторами].

Тензодатчик (рис. 1а) струнного типа с одним тензорезистором подключался к тензометрической системе «Динамика-3», зарегистрированной в государственном реестре средств измерений под № 66938–17, по схеме «одиночный тензодатчик» с частотой дискретизации 16 кГц. В тензодатчике консольного типа (рис. 1б) использовались четыре тензорезистора, подключённые по мостовой схеме к оригинальному тензоизмерительному устройству с частотой дискретизации 4 кГц. Цены наименьшего разряда регистрируемых цифровых сигналов составляли $1,85 \cdot 10^{-6}$ и $1,7 \cdot 10^{-6}$ относительных деформаций, соответственно.

В оптико-поляризационном датчике упругий элемент с базой 60 мм из стали 12Х18Н10Т передаёт деформации рельса диску из кварцевого стекла. Принцип действия датчика основан на явлении фотоупругости и подро-

но описан в [25]. Цена наименьшего разряда аналого-цифрового преобразователя в относительных единицах деформации составила $5 \cdot 10^{-8}$. Масса датчика составляет 94 г.

Тензодатчики устанавливались в межшпальных ящиках на нижнюю поверхность подошвы рельса в плоскости симметрии и ориентировались для измерения продольных деформаций ε_z (рис. 3). Виброускорение измерялось трёхосевым акселерометром на базе микросхемы ADXL326 с верхней границей частоты пропускания 1600 Гц. Разработанная и изготовленная измерительная схема обеспечивала преобразование ускорения в цифровой сигнал с частотой дискретизации 12 кГц и ценой наименьшего разряда $3 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}^2$, среднеквадратическое отклонение собственных шумов измерительного тракта не превышало $6 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}^2$. Акселерометр устанавливался на подошву рельса для регистрации только одной вертикальной компоненты виброускорения a_y (рис. 3).

Моделирование методом конечных элементов

Модель рельса длиной 7 м разбивалась на тетрагональные элементы с длиной ребра от 10 до 245 мм (рис. 3). Шпалы с эпюрой 2000 шт/км воспроизводились упругими граничными условиями с вертикальной жёсткостью, распределённой по подошве рельса в месте контакта со шпалами. В модельных экспериментах жёсткость варьировалась в диапазоне от 10 до 200 МН/м³. На торцах рельса рёбра подошвы жёстко закреплялись. Сила от колеса $Q = 10 \text{ кН}$ прикладывалась к головке рельса по нормали в плоскости симметрии. Полученные методом конечных элементов продольные деформации подошвы ε_z и вертикальные перемещения подошвы

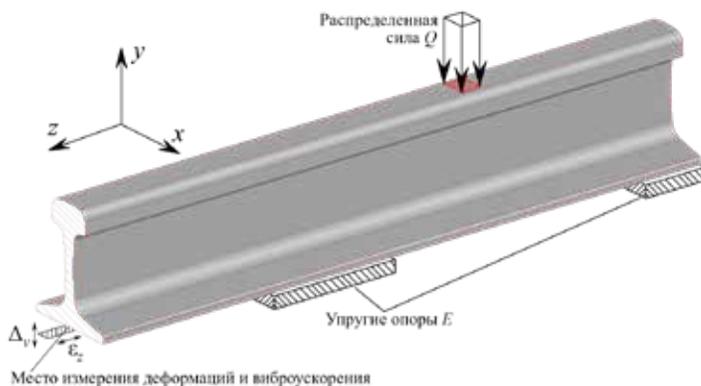


Рис. 3. Модель рельса для расчётов методом конечных элементов [выполнена авторами].

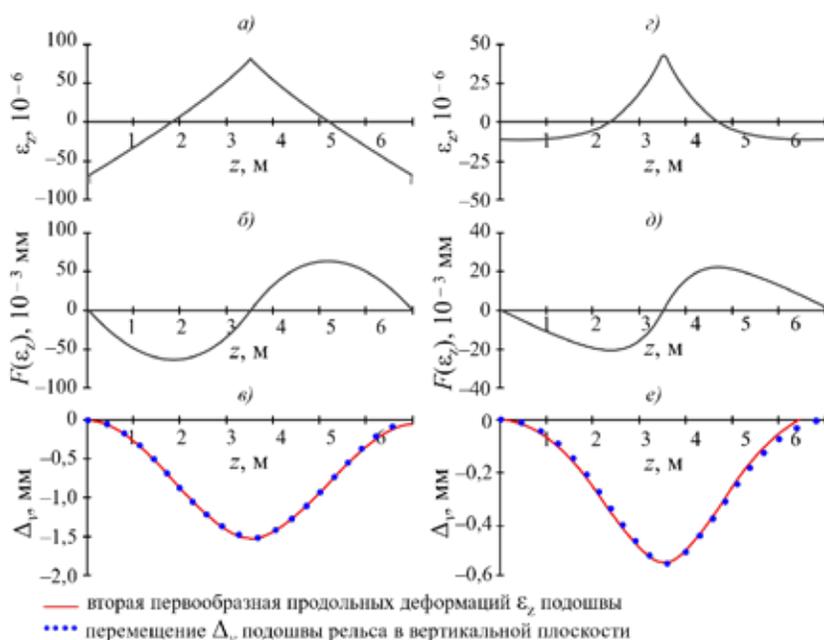


Рис. 4. Результаты моделирования методом конечных элементов рельса с жёсткостью основания 10 МН/м^3 (а, б, е) и 100 МН/м^3 (в, д, е): деформация ε_z (а, в), первообразная деформаций $F(\varepsilon_z)$ (б, д), вторая первообразная деформаций и перемещения подошвы рельса Δ_y (е, ф) [графики построены авторами].

рельса Δ_y для жёсткости 10 МН/м^3 представлены на рис. 4 а, в, для жёсткости 100 МН/м^3 на рис. 4 г, е.

Аналитическая модель

Согласно теории сопротивления материалов рельс представляет собой балку, лежащую на упругом основании [26]. В этой модели существует связь перемещений рельса в вертикальной плоскости по оси y с продольными деформациями ε_z рельса (рис. 3). Для балки справедливо соотношение между прогибом $\Delta_y(z)$ и изгибающим моментом $M_x(z)$:

$$E \cdot J_x \cdot \frac{d^2 \Delta_y(z)}{dz^2} = M_x(z), \quad (1)$$

где E – модуль упругости, МПа; J_x – момент инерции сечения, м^4 ; $\Delta_y(z)$ и $M_x(z)$ – функции прогиба балки и изгибающего момента от координаты z , м и $\text{Н}\cdot\text{м}$, соответственно.

Изгибающий момент создает пропорциональные механические напряжения в продольном направлении:

$$\sigma_z(z) = \frac{M_x(z)}{J_x} \cdot y_{\max}, \quad (2)$$

где y_{\max} – максимальное расстояние до точки измерения деформаций от нейтральной оси рельса, м.

Объединяя (1) и (2), и с учётом связи упругих деформаций с механическими напряжениями $\sigma = \varepsilon \cdot E$:





$$\frac{d^2 \cdot y(z)}{dz^2} = \frac{\varepsilon_z}{y_{\max}}. \quad (3)$$

В выражение (3) входят только геометрические величины, устанавливающие связь прогиба и кривизны рельса. Следовательно, описываемая этим выражением закономерность в первом приближении не зависит ни от механических характеристик, ни от способа приложения сил или их значений, ни от граничных условий крепления рельса.

Функция прогиба балки может быть получена двойным интегрированием выражения (3):

$$\Delta_y(z) = k \cdot \int_0^z \int_0^u \varepsilon_z(v) dv du = k \cdot F(F(\varepsilon_z(z))), \quad (4)$$

где F – первообразная, $k = l/y_{\max}$ – коэффициент пропорциональности, m^{-1} .

Для проверки аналитической зависимости (4) деформации ε_z (рис. 4 а, з) численно проинтегрированы дважды. Первообразные $F(\varepsilon_z(z))$ приведены на рис. 4 б, д. Вторые первообразные деформаций $F(F(\varepsilon_z(z)))$ приведены на рис. 4 в, е и совпадают с вертикальными перемещениями подошвы Δ_y с погрешностью не более 1 % вблизи от точки приложения силы в области с координатами от 1,5 до 5,5 м. Рассчитанный коэффициент пропорциональности $k = (12,5 \pm 0,2) m^{-1}$ практически не зависит от жёсткости в диапазоне от 10 до 200 МН/м³. Полученное значение коэффициента k соответствует расстоянию от подошвы до нейтральной оси рельса $y_{\max} = 0,08$ м (нормативная высота нового рельса 0,18 м).

При движении поезда с постоянной скоростью координата точки измерения деформаций относительно поезда описывается простейшим уравнением:

$$z = V \cdot t, \quad (5)$$

где V – скорость поезда, м/с.

Переход в (4) от интегрирования по координате z к интегрированию по времени t может быть проведен заменой переменной в (5):

$$\Delta_y(t) = \frac{V^2}{y_{\max}} \cdot F(F(\varepsilon_z(t))). \quad (6)$$

Аналогичное выражение может быть получено для сигналов акселерометра, так как перемещение очевидно представляет собой вторую первообразную ускорения:

$$\Delta_y(t) = F(F(a_y(t))), \quad (7)$$

где $a_y(t)$ – виброускорение подошвы рельса в момент времени t , м/с².

Выражения (6) и (7) в интегральной форме устанавливают связь продольных дефор-

маций подошвы рельса ε_z с вертикальным ускорением a_y , что, в определенном смысле, указывает на эквивалентность этих двух видов измерений:

$$\frac{V^2}{y_{\max}} \cdot F(F(\varepsilon_z(t))) = F(F(a_y(t))). \quad (8)$$

Выражение (8) получено в условиях пренебрежения неравномерностью распределения подрельсовой жёсткости и очевидно определено с точностью до некоторого полинома первой степени. На практике выражение (8) устанавливает связь деформаций с ускорениями только в области низких частот, так как двойное интегрирование является фильтром высоких частот. Справедливость уравнения (8) для реальных сигналов позволит в перспективе обосновать возможность уменьшения количества типов датчиков, устанавливаемых на рельсы, и сосредоточиться на методах обработки их сигналов.

Экспериментальные результаты

Экспериментальные исследования проводились на действующем прямолинейном участке бесстыкового пути с рельсами типа Р65 на балластном основании. Деформации подошвы рельса регистрировались при движении грузовых поездов на скоростях от 40 до 60 км/ч перед входом на пункт технического обслуживания вагонов. При движении поезда по измерительному участку регистрировались виброускорения и продольные деформации подошвы рельса (рис. 5).

В сигналах акселерометра преобладают высокочастотные колебания (рис. 5), проход колеса над местом установки датчика вызывает увеличение среднего квадратического отклонения колебаний. Деформации подошвы достигают нулевого уровня в середине вагона, когда все колёса расположены максимально далеко от точки измерения деформаций. Приближение колеса к тензодатчику прогибает рельс вниз, в подошве при этом возникают продольные растягивающие напряжения. Между колёсами и вагонами кривизна рельса изменяет знак, центр вписанной окружности расположен внизу, а в подошве наблюдаются сжимающие напряжения. Максимальное значение напряжений между вагонами в 2–4 раза превышает напряжения между колёсными парами одной тележки, уровень растягивающих напряжений под колесом по абсолютному значению

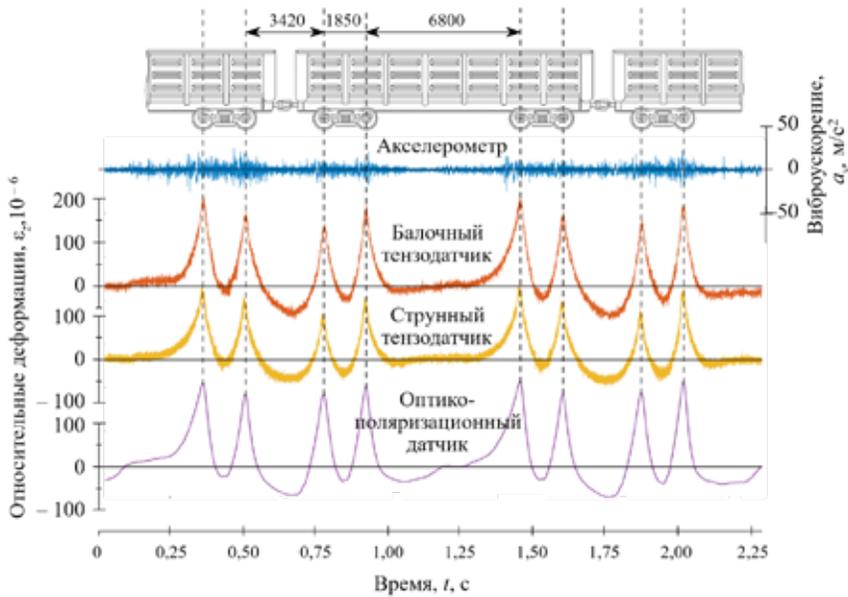


Рис. 5. Схема колёсной формулы трёх вагонов грузового поезда и соответствующие сигналы акселерометра, балочного и струнного тензодатчиков, оптико-поляризационного датчика при проходе восьми колёсных пар [выполнено авторами].

в 3–4 раза выше максимального уровня сжимающих напряжений.

Значительные отличия формы сигналов (рис. 5) оптико-поляризационного датчика от сигналов тензодатчиков связаны с их разным местоположением на пути. В экспериментальных данных на рис. 5 расстояние между точками измерения составляло 2,5 м. Деформации рельса зависят как от динамики подвижного состава, так и от состояния подрельсового основания: жёсткости и неравномерности по длине пути, это же утверждение справедливо и для сигналов акселерометра.

Проверка соотношения (8) выполнена двойным численным интегрированием сигнала акселерометра и сигналов тензодатчиков (рис. 6). Коэффициент корреляции Пирсона, рассчитанный по локальным максимумам и минимумам первообразных деформаций и виброускорения, больше 0,99. Подобие формы вторых первообразных (рис. 6) и сильная корреляционная связь экстремальных значений подтверждают справедливость интегрального уравнения (8), связывающего вертикальное виброускорение с продольными деформациями подошвы. При выполнении численного интегрирования должно быть обеспечено постоянство среднего уровня, что возможно только в условиях симметричности чувствительности тензодатчика к сжимающим и растягивающим деформациям.

Дефекты колёсных пар, такие как ползуны и выщербины, увеличивают динамическую силу, передаваемую от колеса на рельс. Форма сигналов тензодатчиков и акселерометра при этом искажается (рис. 7 а). В сигналах появляются импульсные составляющие 1–9, каждая из которых соответствует воздействию на рельс дефекта поверхности катания – локального отклонения колеса от окружности.

Первые шесть импульсов 1–6 с достаточно высокой вероятностью относятся к одному дефекту поверхности катания, который зарегистрировался несколько раз при последовательных полных поворотах колеса. Среднее время между соседними импульсами 1–6 (табл. 1) составляет 0,18 с, что на скорости 59 км/ч соответствует пути 2,950 м, равной длине окружности колеса диаметром 0,94 м. Для первых шести импульсов отклонение времени между ними от среднего (табл. 1) не превышает 3 мс, что сопоставимо с половиной периода колебаний 6 мс.

Зарегистрированные в испытании импульсы деформаций и виброускорения представляют собой затухающие колебания с частотой 74 Гц (рис. 7 б, в). Импульсы в сигналах акселерометра и струнного тензодатчика эквивалентны по форме и по частотному заполнению, а отношение сигнал/шум виброускорения в 1,5–2 раза выше, чем у струнного тензодатчика.



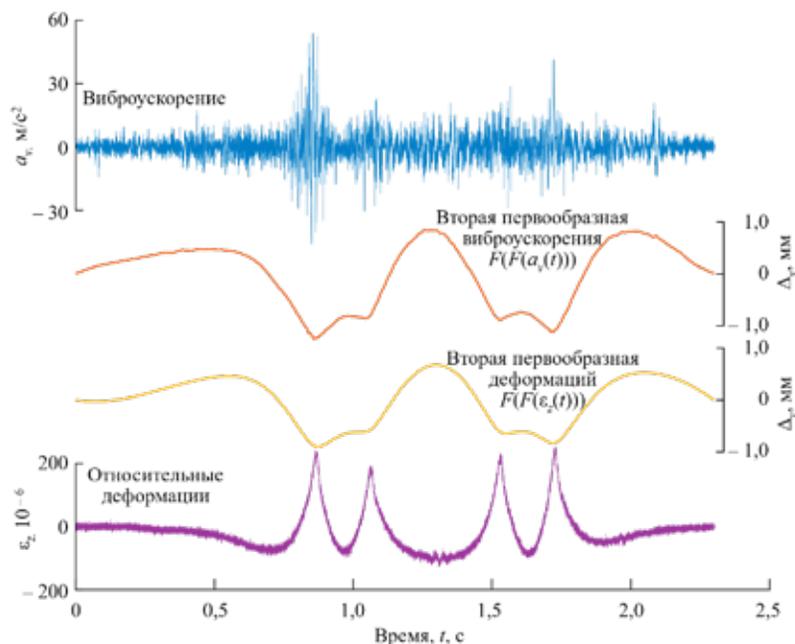


Рис. 6. Сигналы акселерометра $a_y(t)$ и тензодатчика струнного типа $\epsilon_z(t)$ и их вторые первообразные, равные вертикальному смещению подошвы рельса $\Delta_y(t)$ [выполнено авторами].

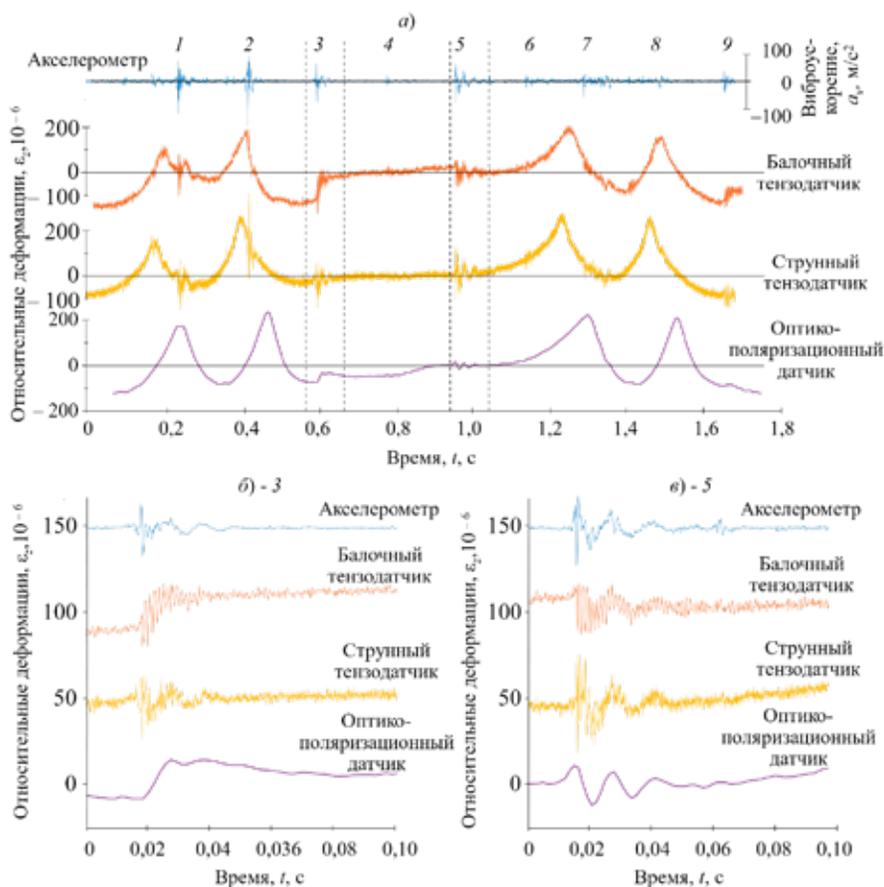


Рис. 7. Сигналы акселерометра $a_y(t)$ и тензодатчиков $\epsilon_z(t)$ в зависимости от времени при проходе четырёх колесных пар с дефектами (а) и увеличенные фрагменты сигналов с импульсами от дефектов 3 (б) и 5 (в): 1–9 – импульсы сигналов от дефектов [выполнено авторами].

Время между импульсами виброускорения на рис. 7

Номера импульсов	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9
Время между импульсами, мс	180	177	180	178	182	151	194	165
Абсолютное отклонение от среднего, мс	0,3	–2,2	0,4	–1,6	3,0	–29	15	–15
Относительное отклонение от среднего, %	0,2	–1,2	0,2	–0,9	1,7	–15,9	8,4	–8,2

В сигналах балочного и оптико-поляризационного датчиков наблюдаются признаки проскальзывания магнитных креплений по поверхности рельса – смещение среднего значения сигнала (рис. 7 б). Спектральный состав этих сигналов искажён: в импульсе балочного датчика наблюдается собственная частота колебаний 800 Гц, а в оптико-поляризационном датчике отсутствуют частоты выше 200 Гц. Всё это обусловлено конструкциями датчиков и их достаточно большими массами, в 2–3 раза больше массы струнного датчика. При движении колеса с дефектом на массивный тензодатчик воздействуют динамические силы, превышающие силы трения и нарушающие неподвижный контакт магнитных держателей с поверхностью рельса.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Для организации мониторинга динамики вертикального прогиба и продольных механических напряжений подошвы рельса при движении бездефектных колёс могут быть использованы как датчики деформаций, так и акселерометры. Вторые первообразные по времени от вертикального ускорения и от продольных деформации подошвы с постоянными коэффициентами равны вертикальному прогибу рельса. Эта закономерность, сформулированная для модели балки на упругом основании, подтверждена конечно-элементным моделированием и численным интегрированием сигналов акселерометров и тензодатчиков, установленных на действующем пути.

Импульсные сигналы, вызванные проходом колёс с дефектами поверхности катания, зарегистрированные акселерометрами, обладают в 1,5–2 раза большим отношением сигнал-шум по сравнению с тензодатчиками. Этот эффект не накладывает ограничения на использование тензодатчиков, так как может быть компенсирован применением фильтрации на этапе постобработки цифровых сигналов. При движении колёсной пары с дефектом на поверхности катания возникает мно-

гократная, до шести раз, регистрация импульсных сигналов. Амплитуда импульсов зависит от локальной жёсткости подрельсового основания, что требует применения нескольких преобразователей для однозначной идентификации дефектной колёсной пары.

Значительное влияние на форму регистрируемых импульсных составляющих при использовании магнитных креплений оказывают масса, добротность и частота собственных колебаний тензодатчиков. Достоверность преобразования импульсных составляющих съёмными тензодатчиками зависит от их массы, которая определяет уровень динамических сил.

Результаты могут быть использованы для совершенствования конструкции и программного обеспечения стационарных средств диагностики подвижного состава по уровню динамического воздействия на путь, повышения достоверности результатов и расширения их функциональных возможностей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Краснов О. Г., Богданов О. К., Акашев М. Г. Динамические силы и процессы в рельсах при ударном взаимодействии колёс с дефектами // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2016. – Т. 75. – № 6. – С. 354–364. EDN: XCCLWT.
2. Певзнер В. О., Петропавловская И. Б., Третьяков В. В. [и др.]. Сравнительный анализ воздействия на путь вагонов с различными осевыми нагрузками // Внедрение современных конструкций и передовых технологий в путевое хозяйство. – 2016. – Т. 9. – № 9 (9). – С. 68–75. EDN: WIMBQP.
3. Абдурашитов А. Ю., Юркова Ю. Н. О взаимодействии пути и подвижного состава на участках скоростного движения в зависимости от очертания профилей рельсов и колёс // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2022. – № 1 (73). – С. 170–177. DOI: 10.26731/1813-9108.2022.1(73).170-177. EDN: CICMUB.
4. Кружлов В. М., Хохлов А. А., Саврухин А. В. Модель динамического взаимодействия ПС и пути // Мир транспорта. – 2011. – Т. 9. – № 5 (38). – С. 8–11. EDN: OKMCQP.
5. Краснов О. Г., Ефименко А. В., Акашев М. Г. Влияние дефектов на поверхности катания колёс на ресурс боковых рам грузовых вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2014. – № 2 (38). – С. 45–48. EDN: SEQIZX.
6. Повышение надежности и срока службы колесных пар и рельсов // Железные дороги мира. – 2011. – № 3. – С. 54–61. EDN: NUGVEZ.
7. Коган А. Я. Воздействие на путь поездов, имеющих в своем составе вагоны с ползунами на колесных парах // Вестник Научно-исследовательского института





железнодорожного транспорта. – 2014. – № 3. – С. 3–8. EDN: TOLHCB.

8. Захаров С. М., Погорелов Д. Ю., Симонов В. А. Анализ влияния параметров экипажей и пути на интенсивность износа в системе колесо-рельс (на основе полного факторного эксперимента) // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2010. – № 2. – С. 31–35. EDN: MEGPGL.

9. Бондарев Э. С. Прогнозирование технического состояния рельсов по статистическим данным // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. – № 4 (59). – С. 55–61. DOI: 10.52170/1815-9265_2021_59_55. EDN: HLDMQB.

10. Махутов Н. А., Коссов В. С., Оганьян Э. С. [и др.]. Прогнозирование контактно-усталостных повреждений рельсов расчетно-экспериментальными методами // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2020. – Т. 86. – № 4. – С. 46–55. DOI: 10.26896/1028-6861-2020-86-4-46-55. EDN: UXMYMI.

11. Громаков М. С., Тармаев А. А., Беспалько С. В. Энергетический критерий для оценки запаса устойчивости колеса от вкатывания гребня на головку рельса при движении колесной пары по прямому участку пути // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2021. – № 1 (69). – С. 104–111. DOI: 10.26731/1813-9108.2021.1(69).104-111. EDN: DIETDK.

12. Марков А. А., Максимова Е. А., Антипов А. Г. Анализ развития дефектов рельсов по результатам многоканального периодического контроля // Дефектоскопия. – 2019. – № 12. – С. 3–15. DOI: 10.1134/S0130308219120017. EDN: CQVYYL.

13. Марков А. А., Максимова Е. А. Анализ эффективности ультразвуковых и магнитных каналов дефектоскопических комплексов при контроле рельсов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2019. – Т. 2. – № 2. – С. 22–32. EDN: HNQVES.

14. Бороненко Ю. П., Рахимов Р. В., Григорьев Р. Ю., Попов В. В. Анализ методов измерений силового воздействия подвижного состава на путь и систем технического контроля колес при движении поезда // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2020. – Т. 17. – № 3. – С. 324–344. DOI: 10.20295/1815-588X-2020-3-324-344. EDN: PDIIKB.

15. Марков А. А., Максимова Е. А., Антипов А. Г. Динамическая коррекция чувствительности дефектоскопических каналов при высокоскоростном контроле рельсов // Дефектоскопия. – 2021. – № 12. – С. 3–14. DOI: 10.31857/S0130308221120010. EDN: VMRTBG.

16. Коржин С. Н., Мироненко О. И., Меланин В. М., Беспалько С. В. Определение напряженного состояния колеса грузового вагона от реакции рельса // Наука и техника транспорта. – 2021. – № 4. – С. 8–12. DOI: 10.5388/3/20749325_2021_04_08. EDN: FCPDYF.

17. Бороненко Ю. П., Третьяков А. В., Зимакова М. В. Цифровая программно-аппаратная платформа для авто-

матизированного мониторинга технического состояния подвижного состава и железнодорожного пути на ходу поезда «Рубеж» // Сб. материалов научно-практ. конференции АО «ВНИИЖТ» «Наука 1520 ВНИИЖТ: Загляни за горизонт» (26–27 августа 2021 г.). – Щербинка: АО «ВНИИЖТ», 2021. – С. 38–44. EDN: OEVRPB.

18. 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 Российской Федерации. – 2018. – № 3 (76). – С. 58–64. EDN: XRLKOD.

19. Ромен Ю. С., Сулов О. А., Баляева А. А. Определение сил взаимодействия в системе колесо-рельс на основании измерения напряжений в шейке рельса // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. – 2017. – Т. 76. – № 6. – С. 354–361. DOI: 10.21780/2223-9731-2017-76-6-354-361. EDN: YKHKDN.

20. Коссов В. С., Гапанович В. А., Лунин А. А. [и др.] К вопросу определения боковых сил в условиях тяжеловесного движения // Железнодорожный транспорт. – 2018. – № 5. – С. 46–51. EDN: XMGKWD.

21. Manshin, Yu. P., Manshina, E. Yu., Geue, M. About the dynamic error of strain gauge torque measuring devices. Journal of Physics: Conference Series, Volume 2131, Mathematical modeling and computational methods in problems of electromagnetism, electronics and physics of welding, 052041. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052041.

22. Dobrovolsky, P. P., Kremis, I. I., Fedorinin, V. N., Sidorov, V. I. Comparative Analysis of the Frequency Responses of Vibration of Rotary Type Microcryogenic Machines. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2021, Vol. 57, Iss. 2, pp. 202–207. DOI: 10.3103/S8756699021020060. EDN: ZYTZNZ.

23. Сычев В. П., Шабалин Н. Г., Локтев А. А. [и др.] Расчет вибрационного воздействия на путь пассажирских поездов с повышенными скоростями движения для обеспечения безопасности и комфорта пассажира и поездных бригад // Наука и техника транспорта. – 2020. – № 3. – С. 110–115. EDN: IHCSZB.

24. Ma, Z., Chung, J., Liu, P., Sohn, H. Bridge displacement estimation by fusing accelerometer and strain gauge measurements. Structural Control and Health Monitoring, 2021, Vol. 28, Iss. 6, e2733. DOI: <https://doi.org/10.1002/stc.2733> [ограниченный доступ].

25. Федоринин В. Н. Патент № 2157513 С1 Российской Федерации, МПК G01J 4/04. Эллипсометрический датчик: № 99104550/28; заявл. 05.03.1999; опубл. 10.10.2000; заявитель Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники СО РАН. EDN: QDFVXB.

26. Кучерявый В. И., Мильков С. Н. Надежность газонепровода в линейной упругом грунте при изгибе // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 2. – С. 125–130. EDN: YKVAXB. ●

Информация об авторах:

Ададуров Александр Сергеевич – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «ВНИИЖТ-Инжиниринг», Санкт-Петербург, Россия, a.adadurov@vniizht-e.ru.

Федоринин Виктор Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер филиала Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук (КТИПМ), Новосибирск, Россия, fedorinin55@mail.ru.

Бехер Сергей Алексеевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики, электротехники, диагностики и управления в технических системах Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, behers@mail.ru.

Гуляев Михаил Александрович – аспирант Сибирского государственного университета путей сообщения, Новосибирск, Россия, lokigulyaev@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 03.07.2023, одобрена после рецензирования 30.09.2023, принята к публикации 04.10.2023.