

## Непрерывные измерения вертикальных сил взаимодействия пути и подвижного состава



Зиновий ШУЛЬМАН

Zinovy A. SHULMAN

**Разработаны и доведены до практического применения методика непрерывных измерений и динамометрические колесные пары, позволяющие с достаточно высокой степенью точности определять динамические вертикальные нагрузки железнодорожного подвижного состава на путь (взаимодействие элементов системы «экипаж-путь»).**

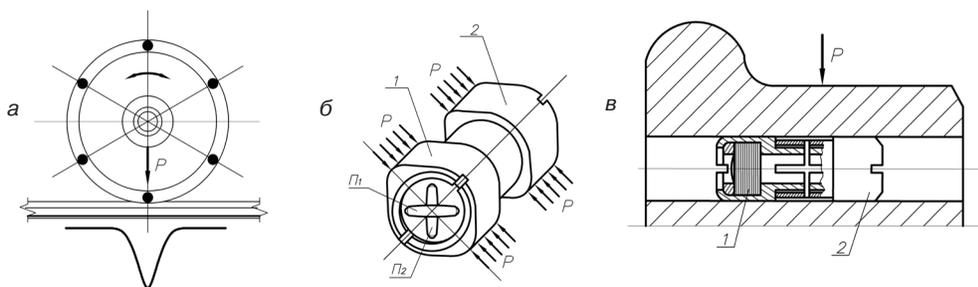
*Ключевые слова: железная дорога, система «экипаж-путь», силы взаимодействия, методика измерений, магнитоупругий датчик, динамометрическое колесо.*

*Шульман Зиновий Александрович – кандидат технических наук, технический директор корпорации «Промстальконструкция», Днепропетровск, Украина.*

**А**ктуальность изучения сил взаимодействия пути и подвижного состава определяется необходимостью изыскания резервов в работе системы «экипаж-путь», повышения прочности и надежности всех ее звеньев, а также корректировки норм содержания и оценки состояния пути.

Один из подходов к решению этого вопроса (предложен проф. М. Ф. Вериго и разработан А. К. Шафрановским [1]) заключался в том, что о величине действующих сил между колесом и рельсом можно судить по деформациям некоторых участков спицы или диска железнодорожного колеса.

Анализ эффективности подхода выявил ряд существенных недостатков, главные из которых следующие: погрешности, вызванные одновременным действием на колесо поперечных (горизонтальных) сил; погрешности из-за изменения эксцентриситета контакта колеса с рельсом; значительное удаление мест размещения тензорезисторов от точки контакта колеса с рельсом, что сказывается на точности измерения при больших скоростях движения вертикальных сил взаимодействия.



**Рис. 1. Динамометрическая колесная пара:**  
 а – функциональная схема; б – магнитоупругий силоизмерительный датчик; в – положение датчика в ободу колеса; 1, 2 – упругие элементы датчика; П1, П2 – обмотки преобразователя.

Разработанная нами методика и созданные для ее реализации средства измерений позволяют не только получать информацию о вертикальных силах взаимодействия практически на неограниченных по длине участках пути, но и значительно повысить точность самих измерений.

Предложенную методику отличает то, что с целью непрерывной регистрации вертикальных сил, действующих между колесом и рельсом, силоизмерительный датчик устанавливается (запрессовывается) в отверстие, рассточенное в ободу колеса. При этом датчик регистрирует силы в зоне, близко расположенной к контакту колеса с рельсом. Такое размещение регистратора позволяет значительно уменьшить погрешность оценки действующих на колесо боковых сил и изменения эксцентриситета контакта колеса с рельсом, которая неизбежно возникает при его качении. Кроме того, расположение датчика вблизи поверхности катания колеса дает возможность значительно расширить частотный диапазон регистрируемых нагрузок, что позволяет измерять силы соударения колеса с рельсом, возникающие при перекатывании через короткие неровности и стыки рельсов, силы в колесе с ползуном и тому подобное.

Количество силоизмерительных датчиков в колесе определяет характер регистрации действующих сил. Принятый угловой интервал между датчиками, равный 60 при диаметре железнодорожного колеса 950 мм, позволяет получать информацию о величине сил взаимодействия через 1/6 оборота колеса, т. е. практически непрерывную картину сил вдоль всего участка пути. При

установке в одной тележке двух колесных (динамометрических) пар информацию о вертикальных силах можно получать с меньшим интервалом и по обоим рельсовым нитям.

В качестве силоизмерителей в динамометрическом колесе используются датчики силы с магнитоупругим преобразователем (магнитоупругие датчики), которые отличаются высокой чувствительностью, стабильностью, простотой конструкции, прочностью и жесткостью упругого элемента. Принцип работы этих преобразователей основан на использовании физического явления, связанного с изменением магнитных свойств ферромагнетика под действием приложенной к нему механической нагрузки [2].

В разработанном магнитоупругом силоизмерительном датчике применен магнитоупругий преобразователь трансформаторного типа. В таких преобразователях цепи питания (первичная обмотка) и цепи с контрольно-измерительными устройствами (вторичная обмотка) разобщены, их контакт между собой обеспечивается исключительно магнитной связью. При ее наличии между первичной и вторичной обмотками преобразователя возможны высокие коэффициенты трансформации, а с ними и выходной сигнал повышенного напряжения.

Общий вид магнитоупругого силоизмерительного датчика и положение его в ободу колеса изображены на рис. 1.

Подготовленные и проградуированные на специальном стенде силоизмерительные датчики запрессовываются в обод колеса в специально подготовленные отверстия.



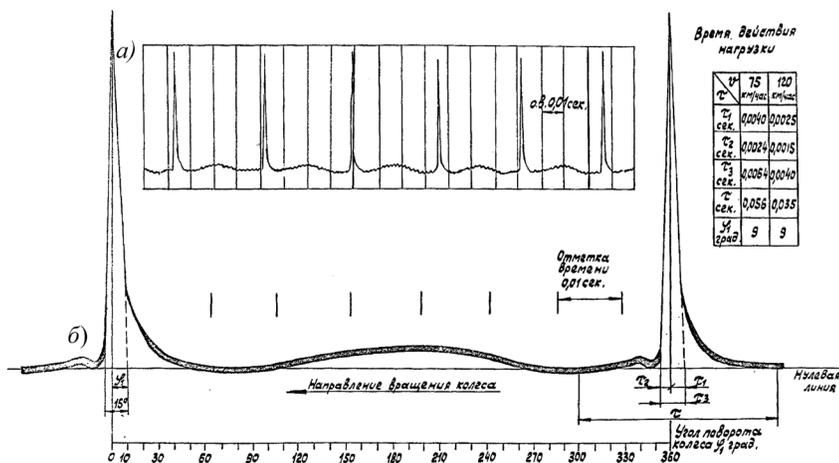


Рис. 2. Выходной сигнал силоизмерительного датчика при непрерывном вращении колеса:  
а – фрагмент осциллограммы записи;  
б – развернутая форма выходного сигнала.

Продольная ось отверстия выполняется с уклоном 1:20, равным уклону неизношенной поверхности катания колеса.

Перед запрессовкой обод в зоне отверстия разогревают до температуры 200–220°C. Затем в отверстие вставляют датчик. Как показал опыт, после остывания датчик обжимается усилием 10–15 кН, что значительно улучшает условия его работы и повышает линейность его характеристик.

Основные регулировочные характеристики магнитоупругих преобразователей снимаются на стенде в лабораторных условиях. По ним выбирают оптимальные параметры работы датчиков в динамометрическом колесе, обеспечивающие наилучшую линейность, максимальную чувствительность и стабильность во времени.

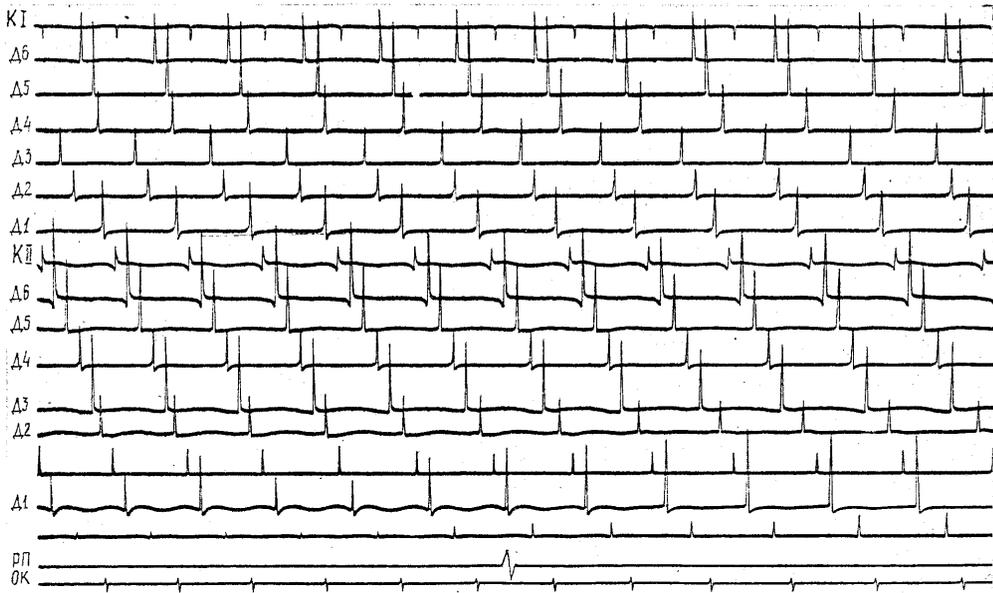
Статическими характеристиками динамометрической колесной пары являются: зависимость выходного сигнала магнитоупругого силоизмерительного датчика от приложенной к колесу нагрузки; погрешность, вносимая в результат измерения вертикальной нагрузки действием боковой (горизонтальной) силы; влияние на результат фиксируемых изменений в процессе вращения колеса эксцентриситета приложения вертикальной силы к поверхности его катания.

Выходная характеристика магнитоупругого датчика при приложении к колесу различной по величине вертикаль-

ной нагрузки  $P$  определяется градуировкой на стенде запрессованных в колесо силоизмерительных датчиков путем медленного нагружения динамометрической колесной пары вертикальным усилием. При этом колесная пара устанавливается таким образом, чтобы вертикальная ось датчика проходила через центр эллипса контакта колеса и рельса. Величина приложенной к колесу вертикальной нагрузки контролируется высокоточной тензометрической мерзодой. Как показали результаты градуировки, датчики имеют линейную выходную характеристику в рабочем диапазоне измеряемых нагрузок. Упругого гистерезиса не наблюдается.

Влияние эксцентриситета приложения нагрузки на выходной сигнал датчика находится путем нагружения динамометрического колеса вертикальной силой с различным эксцентриситетом. Изменение положения эксцентрично приложенной силы производится сдвижкой рельса относительно теоретического круга катания колеса. Величина эксцентриситета контролируется по оттиску на бумаге, прокладываемой между рельсом и колесом.

Влияние боковой силы  $H$  на результаты измерений вертикальной нагрузки определяется путем нагружения колесной пары поочередно вертикальной и боковой силами и совместным действием этих сил. Боковая сила прикладывается к гребню динамометрического колеса с помощью специ-



**Рис. 3.** Фрагмент записи сил взаимодействия при  $v = 80$  км/ч:  
 KI, KII – динамометрические колеса колесной пары;  
 Д1... Д6 – силоизмерительные датчики;  
 РП – репер пути; ОК – отметка оборота колеса.

ального нагрузочного устройства. Разработанное для этих целей, оно позволяет производить совместное нагружение динамометрической колесной пары боковой и вертикальной силами.

Результаты экспериментальных исследований показали, что погрешность от действия боковой силы на динамометрическое колесо является систематической. Вместе с тем, ввиду малого влияния (от 3,2 до 4,0% в самом неблагоприятном варианте) эту погрешность можно рассматривать и как случайную, приведя ее к среднеарифметическому значению боковой силы, измеренной на опытном участке пути.

На рис. 2а представлен результат градуировки датчика динамометрического колеса, полученный путем медленного (квазистатического) его вращения. В развернутом виде форма выходного сигнала датчика изображена на рис. 2б.

По результатам расчетно-экспериментальных исследований определены оптимальные технические характеристики измерительной системы:

- диаметр динамометрического колеса, мм – 950;
- число силоизмерительных датчиков в одном колесе, шт. – 6;
- пределы измеряемых усилий, кН – 0...180;

- интервал регистрации вертикальных сил вдоль пути, м – 0,5;

- частота исследуемого процесса, Гц – 0... 600;

- максимальная скорость, км/ч – 120;

- частота тока намагничивания преобразователей, кГц – 15–30;

- напряжение питания преобразователей, В – 24;

- ток намагничивания одного преобразователя, mA – 250;

- чувствительность, кН/мм – не менее 3,0;

- допустимая температура окружающей среды, °С – от –20 до +60;

- способ регистрации – отдельный по каждому датчику;

- максимальная относительная погрешность регистрации сил, % – 4,5.

Натурные испытания измерительной системы проводились на опытном перегоне. Специально подготовленный участок длиной 5 км имел отличную оценку состояния пути.

Измерения вертикальных сил на этом участке производились с помощью динамометрических колесных пар, установленных в тележках ЦНИИ-Х-3-О четырехосного грузового полувагона, являющегося наиболее массовым типом подвижного состава. Опытный груженный полувагон



Результаты измерений вертикальных нагрузок

Скорость, км/ч	Ось	Вертикальные силы, кН			Среднеквадратичное отклонение, кН	Число опытов
		P <sub>ср</sub>	P <sub>max</sub>	P <sub>min</sub>		
3	I	119,3	137,0	101,6	9,0	103
	II	122,6	148,5	96,7	13,2	115
	III	93,3	136,6	50,1	22,1	90
40	I	109,3	139,8	78,8	15,6	136
	II	122,6	143,8	98,9	10,8	94
	III	90,0	128,9	51,2	19,9	106
80	I	105,4	142,4	68,3	18,9	128
	II	118,8	165,1	72,4	23,6	115
	III	89,0	175,0	13,5	43,9	95

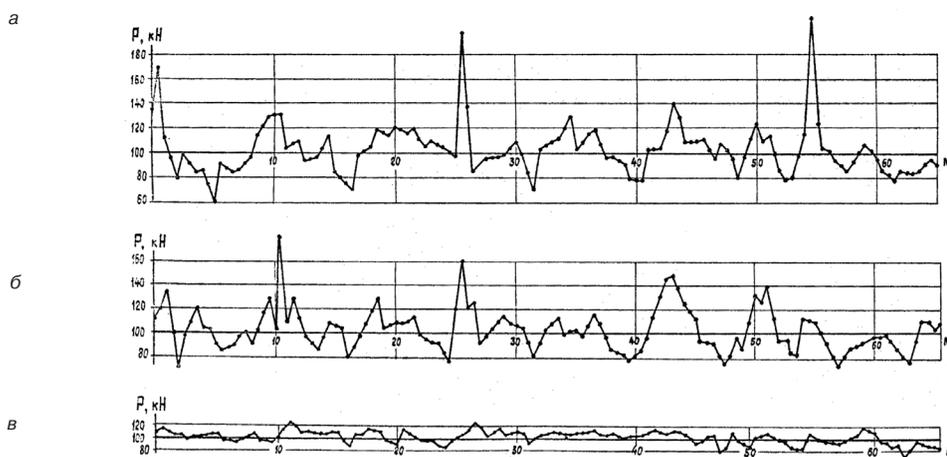


Рис. 4. Изменение сил по длине пути на участке без искусственных неровностей при: а – скорости движения 80 км/ч; б – 40 км/ч; в – 3 км/ч (точки измерений соединены условно).

включался в состав специально сформированного испытательного поезда, состоящего из двух секций тепловоза ТЭ-3, пассажирского вагона-лаборатории и вагона-электростанции.

Вертикальные силы измерялись под шестью колесами трех динамометрических колесных пар.

С целью изучения влияния неравномерного износа колес на величину сил взаимодействия динамометрическая колесная пара одной из осей имела естественный износ. Колесные пары двух других перед подкаткой их под опытный вагон прошли обточку.

Проверка в натуральных условиях измерительной системы показала, что она достаточно надежна. За время испытаний опытный

вагон прошел более 6000 км, тем не менее не было случаев существенных поломок аппаратуры или выхода из строя датчиков и токосъемников. Динамометрические колесные пары удовлетворительно работали при всех скоростях движения поезда.

На рис. 3 представлен фрагмент одной из записей сил, действующих между динамометрической колесной парой и опытным участком пути.

Впервые была продемонстрирована возможность определения вертикальных динамических сил взаимодействия пути и подвижного состава сил на широком фронте (большой протяженности) железной дороги. При этом удалось при их регистрации приблизиться к зоне контакта колеса и рельса.

График изменения сил по длине пути показан на рис. 4.

Данные статистической обработки значений вертикальных сил взаимодействия между колесами опытного вагона и рельсами опытного участка представлены в таблице 1. Как из нее следует, средние значения этих сил близки к среднеосевым нагрузкам, которые были получены в результате развески опытного вагона. Увеличение скорости движения поезда, по предварительной оценке, не приводит к росту средних значений сил на прямом участке пути при отсутствии существенных на нем неровностей.

Гистограммы и кривые нормального распределения сил при разных скоростях движения опытного поезда приведены на рис. 5.

Установлено, что на неровностях, имеющих различную балльную оценку состояния пути, вертикальные силы, действующие на рельс, оказались близкими по величине. При этом максимальные коэффициенты сил, возникающих из-за наличия в пути детерминированных неровностей (неисправностей III–IV степени), не превышают 1,4–1,5.

Наибольшие вероятные силы, вызванные неравноупругостью пути, на 10–23% ниже принятых в правилах расчета пути на прочность.

Полученные в эксперименте силы от эксцентричности насадки колес с дебалансом совпадают с подсчитанными по правилам.

Силы воздействия на путь колес с «ползуном» и от контакта экипажа с рельсами в зоне стыков достигают величин, в 3–4 раза превышающих статическую нагрузку.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шафрановский А. К. Измерение и непрерывная регистрация сил взаимодействия колесных пар локомотивов с рельсами // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 389. – М.: Транспорт, 1969. – 120 с.
2. Гуманюк М. Н. Магнитоупругие датчики в автоматике. – Киев: Техника, 1972. – 156 с.
3. Шульман З. А. Экспериментальное исследование динамических вертикальных сил в зоне контакта колеса и рельса // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Санкт-Петербург, 1981. – 360 с.
4. Молодилов В. А., Алексеев Г. М. К вопросу измерения сил, воспринимаемых колесной парой // Вестник ВНИИ железнодорожного транспорта. – 1971. – № 1. – С. 29–36.

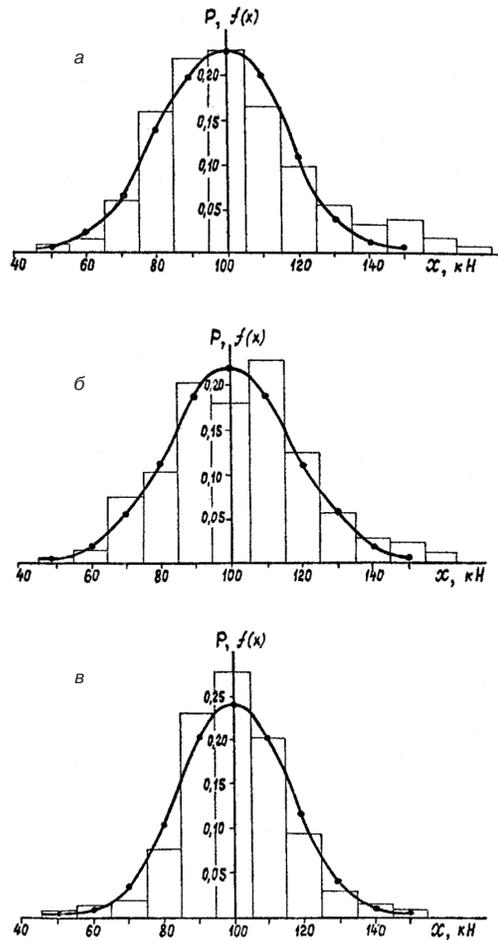


Рис. 5. Гистограммы и кривые нормального распределения сил взаимодействия на участке пути без искусственных неровностей: а – при  $v=100$  км/ч; б – при  $v=80$  км/ч; в – при  $v=40$  км/ч.

5. Шульман З. А. Основные параметры измерительных устройств для регистрации вертикальных динамических сил взаимодействия // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава // Труды Днепропетровского института жел.дор. транспорта. – Днепропетровск: ДИИЖТ, 1974. – Вып. 151. – С. 116–122.

6. Липовский Р. С., Шульман З. А. Метод измерения вертикальных сил взаимодействия между колесом и рельсом // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава // Труды Днепропетровского института жел.дор. транспорта. – Днепропетровск: ДИИЖТ, 1973. – Вып. 142. – С. 82–92.

7. Расчетно-теоретическое исследование напряженного состояния динамометрического колеса // Исследование взаимодействия пути и подвижного состава // Труды Днепропетровского института жел.дор. транспорта. – Днепропетровск: ДИИЖТ, 1979. – Вып. 204 (21). – С. 102–109.

8. Konishi, Shoichi. Measurement of loads on wheelset. Japan Railway Engineering, 1967–1968, № 3, pp. 26–29.

9. Weber, Hans Heinrich. Zur direkten Messung der Kräfte zwischen Rad und Schiene. Glase analen, 1961, N. 7, pp. 236–244.

