

ПОЛЕЗНЫЙ СЛУЧАЙНЫЙ ПРОЦЕСС ДЕЙСТВИЯ БОКОВЫХ СИЛ МЕЖДУ КОЛЕСОМ И РЕЛЬСОМ И ЕГО ВЕРОЯТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Савоськин А.Н.¹, Акашев М.Г.²

¹*Российский университет транспорта, г. Москва;*

²*Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт
подвижного состава, г. Коломна*

Ключевые слова: подвижной состав, тензометрическая колесная пара, боковая сила, полезный случайный процесс, вероятностные характеристики, коэффициент запаса устойчивости.

Аннотация. В статье предлагается методика определения вероятностных характеристик случайного процесса боковой силы, возникающей при взаимодействии колеса тензометрической колесной пары и рельса, основанная на представлении этого процесса как произведения двух случайных процессов полезного модифицированного процесса и случайного процесса типа телеграфного сигнала. Выполнена оценка коэффициента запаса устойчивости от схода колеса с рельса.

A USEFUL RANDOM PROCESS OF ACTING LATERAL FORCES BETWEEN A WHEEL AND RAIL AND ITS PROBABILISTIC CHARACTERISTICS

Savoskin A.N.¹, Akashev M.G.²

¹*Russian University of Transport, Moscow;*

²*Scientific-Research and Design-Technology Institute of Rolling Stock, Kolomna*

Keywords: rolling stock, tensometric wheelset, lateral force, useful random process, probabilistic characteristics, safety factor.

Abstract. The article proposes a method for determining the probabilistic characteristics of a random process of a lateral force arising from the interaction of the wheel of a strain-gauge wheelset and a rail, based on the representation of this process as a product of two random processes – a useful modified process and a random process such as a telegraph signal. The safety factor against wheel derailment is estimated.

На практике иногда встречаются случайные процессы, у которых полезная информация составляет малую долю t_p от длительности всего процесса t_f . Поэтому на основе анализа общей информации о процессе за всё время t_f невозможно обеспечить точность (доверительность) получения вероятностных характеристик этого случайного процесса. Примером такого процесса является случайный процесс боковых сил $F_y(t)$, возникающих между движущимся колесом и рельсом.

Боковая сила F_y (рис. 1) возникает при движении в прямых и кривых участках пути: в прямых – из-за боковых колебаний отхода и виляния (поперек оси пути), вызванных горизонтальными силами взаимодействия колес и рельсов (силами крива); в кривых – ввиду изменения кривизны пути.

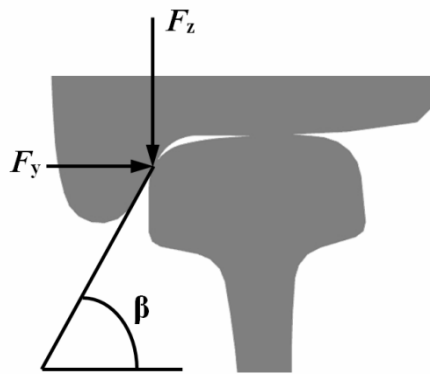


Рис. 1. Силы в контакте «колесо – рельс»

Скорректированный случайный процесс боковых сил (рис. 2) на правом и левом колёсах тензометрической колёсной пары (ТКП) порожней цистерны, двигающейся со средней скоростью 16,5 м/с (59,4 км/ч) [1, 2], был получен после исключения фрагментов с малыми величинами $F_y \leq 10$ кН. Эти фрагменты соответствуют движению в прямых участках пути, по станциям и по стрелкам и не влияют на процессы движения в кривых.

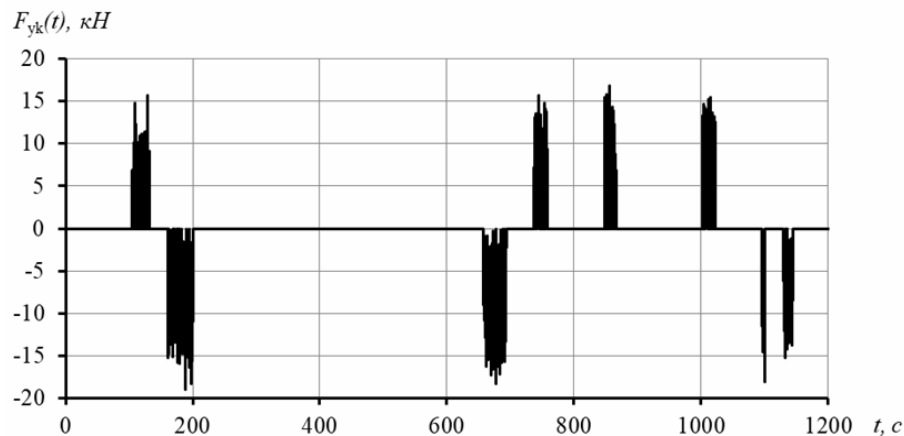


Рис. 2. Скорректированный случайный процесс боковых сил набегавшей ТКП порожней цистерны

Этот скорректированный случайный процесс боковых сил $F_{yk}(t)$, пересчитанный на зону контакта колеса и рельса, соответствует движению по восьми кривым. Он отличается достаточной однородностью, и его можно рассматривать как стационарный случайный процесс.

Выполним оценку безопасности движения рельсового экипажа с помощью коэффициента запаса устойчивости k_y колеса против схода с рельсов, определяемого по формуле из [3], в основе которой лежит критерий Надаля, предложенный в конце XIX в. [4-6]:

$$k_y = \frac{\operatorname{tg} \beta - \mu}{\mu \cdot \operatorname{tg} \beta + 1} \cdot \frac{F_z}{F_{y\max}}, \quad (1)$$

где β – угол наклона образующей гребня колеса к горизонтали, μ – коэффициент трения между колесом и рельсом, F_z – вертикальная сила, действующая от колеса на рельс, $F_{y\max}$ – максимальная боковая сила, действующая от колеса на рельс.

При вычислении k_y будем определять максимальное значение боковой силы $F_{y\max}$ по формуле Крамера как среднее значение абсолютного максимума $\bar{H}_a$ случайного процесса $F_{yk}(t)$ [7-9]:

$$\bar{H}_a = \bar{F}_{yk} + S(F_{yk}) \left(\sqrt{2 \ln(f_e t_f)} + \frac{1}{\sqrt{2 \ln(f_e t_f)}} \right), \quad (2)$$

где $\bar{F}_{yk}$ и $S(F_{yk})$ – среднее и среднее квадратическое значения скорректированного случайного процесса боковых сил $F_{yk}(t)$; f_e – эффективная частота и длительность этого процесса равная $t_f = 1200$ с.

Для определения $\bar{F}_{yk}$, $S(F_{yk})$, f_e , и, следовательно $\bar{H}_a$, необходимо выполнить вероятностный анализ процесса $F_{yk}(t)$. Длительность полезной составляющей в этом процессе равна $t_p = 180,754$ с, что в 6,64 раза меньше, чем t_f и отношение $t_p/t_f = 0,151$. Для вероятностного анализа таких процессов $F_{yk}(t)$, у которых длительность полезной составляющей мала по отношению к длительности всего процесса рекомендуется [7, 8] следующий приём. Их представляют в виде двух мультипликативно связанных случайных процессов (произведения двух процессов) телеграфного случайного процесса $F_t(t)$ и модифицированного случайного процесса $F_{ym}(t)$:

$$F_{yk}(t) = F_t(t) \cdot F_{ym}(t). \quad (3)$$

Здесь первый из них $F_t(t)$ представляет собой импульсный случайный процесс в виде телеграфного сигнала (рис. 3), принимающего одно из трёх значений 1, 0 и -1, причём длительность |1| соответствует длительности соответствующего процесса набегания, т.е. полезного процесса t_p .

Второй процесс $F_{ym}(t)$ является модифицированным случайным процессом скорректированной боковой силы, который представляет собой только процессы набегания. Фрагмент этого процесса (рис. 4) после выполнения процедур центрирования и фильтрации фильтром с нижней частотой среза 0,2 Гц имеет вид однородного стационарного случайного процесса.

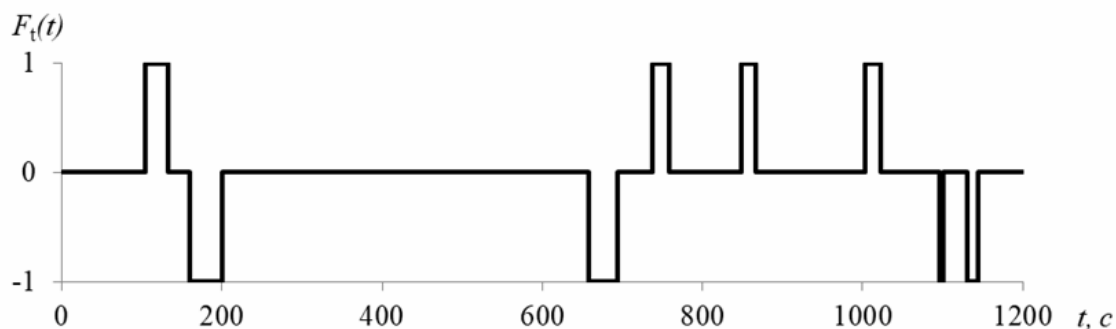


Рис. 3. Случайный процесс в виде телеграфного сигнала

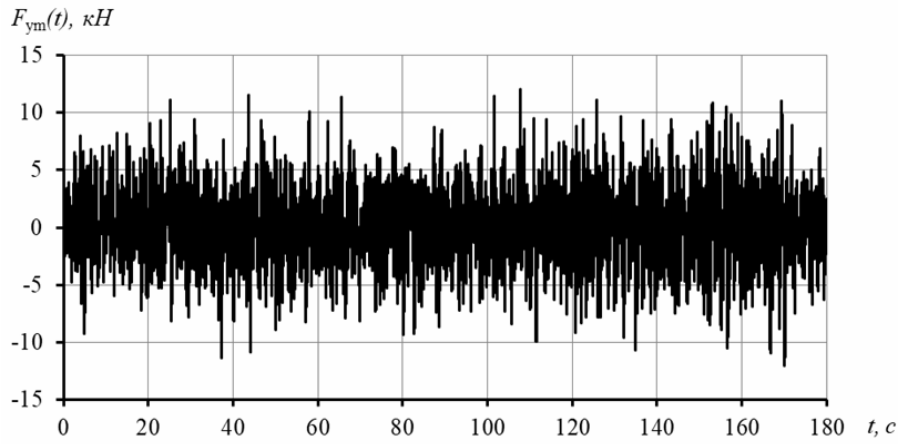


Рис. 4. Модифицированный случайный процесс боковой силы

Вероятностные характеристики процесса $F_{yk}(t)$ в соответствие с (3), а именно среднее значение $\bar{F}_{yk}$, среднее квадратическое отклонение $S(F_{yk})$ и нормированную автокорреляционную функцию $r_{yk}(\tau)$ можно определить следующим образом:

$$\bar{F}_{yk}(t) = \bar{F}_t(t) + \bar{F}_{ym}(t), \quad (4)$$

$$S(F_{yk}) = S(F_t) \cdot S(F_{ym}), \quad (5)$$

$$r_{yk}(\tau) = r_t(\tau) \cdot r_{ym}(\tau). \quad (6)$$

Среднее значение силы $\bar{F}$ и среднее квадратическое отклонение $S(F)$ равны:

$$\bar{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F(iT), \quad (7)$$

$$S^2(F) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [F(iT) - \bar{F}]^2, \quad (8)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$ – число шагов дискретизации, T – шаг дискретизации.

Для телеграфного сигнала $S(F_t)$ и $r_t(\tau)$ определяются следующими выражениями:

$$S(F_t) = \lambda_0 = t_p / t_f, \quad (9)$$

$$r_t(\tau) = \frac{R_t(\tau)}{S^2(F_t)} = \frac{\lambda_0^2 \exp(-2\lambda_0|\tau|)}{S^2(F_t)} = \exp(-2\lambda_0|\tau|), \quad (10)$$

Автокорреляционная функция отфильтрованного модифицированного процесса определялась по известной формуле [7-9]:

$$r_{ym}(\tau) = \frac{1}{S^2(F_{ym})(N-s)} \sum_{k=1}^{N-s} [F_{ym}(kT) - \bar{F}_{ym}] \cdot [F_{ym}((k+i)T) - \bar{F}_{ym}], \quad (11)$$

где T – шаг дискретизации процесса, равен 0.001 с, k – номер шага дискретизации процесса, $\tau = iT$ – сдвиг по времени между значениями реализации, $sT = (0,1 \div 0,25)NT$ – максимально допустимая величина этого сдвига.

График $r_{yk}(\tau)$ показывает (рис. 5, а), что эта функция является затухающей косинусоидальной. По этой функции была вычислена нормированная спектральная плотность скорректированного случайного процесса боковой силы:

$$g_{yk}(f) = \frac{\int_0^{\tau_{\max}} R_{yk}(\tau) \cos(2\pi f\tau) d\tau}{S^2(F_{yk})}. \quad (12)$$

График $g_{yk}(f)$ (рис. 5, б) имеет три максимума на частотах 1,25, 4,5 и 6,75 Гц. По этому графику было определено, входящее в (1) значение эффективной частоты f_e :

$$f_e = \sqrt{\int_0^{\infty} f^2 g_{yk}(f) df}. \quad (13)$$

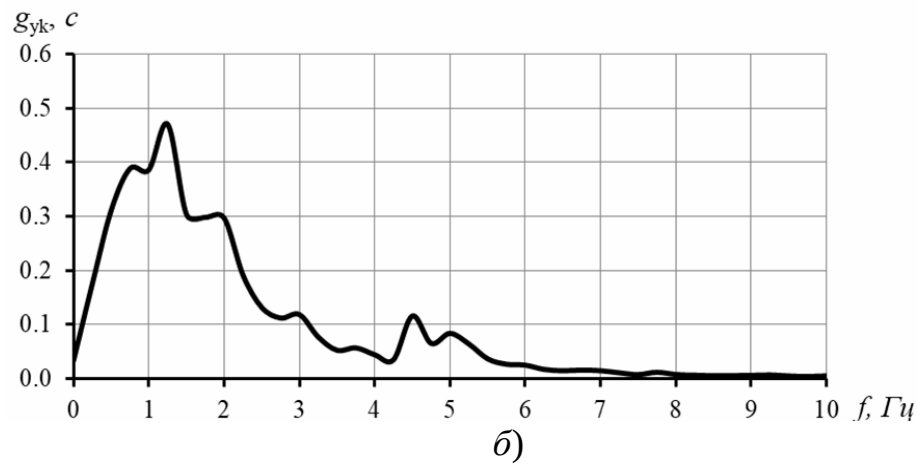
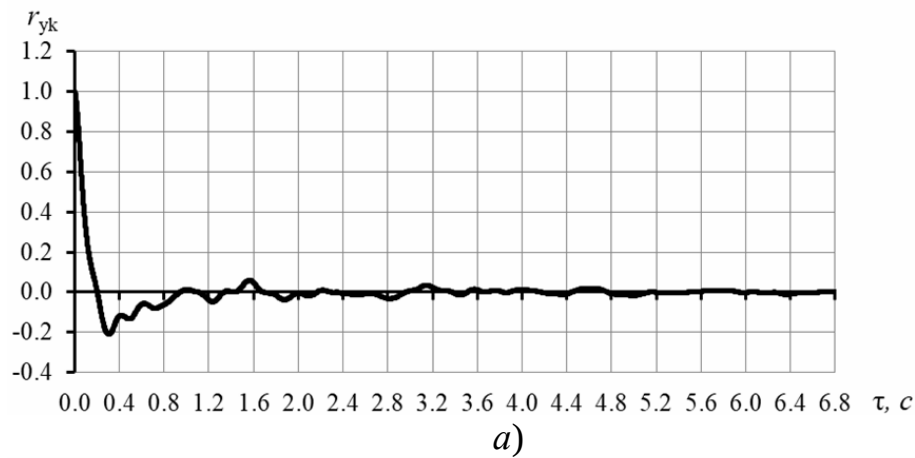


Рис. 5. Нормированные автокорреляционная функция (а) и спектральная плотность (б) случайного процесса боковой силы

В таблице 1 приведены вероятностные характеристики, рассчитанные для скорректированного случайного процесса боковых сил $F_{yk}(t)$.

Табл. 1. Моменты и характеристики спектральной плотности исходного скорректированного сигнала

$\bar{F}_{yk}$, кН	$S(F_{yk})$, кН	$S^2(F_{yk})$, кН ²	f_e , Гц	$\bar{H}_a$, кН
6,545	1,530	2,342	1,538	12,875

Применение выражения (3) и определение максимальной боковой силы по величине среднего значения абсолютного максимума скорректированного процесса по формуле (2) позволяют предъявить более строгие требования к рельсовому экипажу при дальнейшей оценке запаса устойчивости колеса против схода с рельсов. В нашем случае при вертикальной нагрузке от колеса на рельс $F_z=29,43$ кН, $\mu=0,25$ и $\beta=60^\circ$, значение этого коэффициента составит $k_y=2,372$, что намного больше допустимой величины $[k_y]=1,3$.

Вместе с тем при определении k_y в случае, если боковая сила представляет собой случайный процесс, традиционно рекомендуется определять ее максимальное значение как:

$$F_{y\max} = 2,5 \cdot S(F_y). \quad (14)$$

В соответствие с (8) среднеквадратическое отклонение боковой силы второго фрагмента случайного процесса набегания, приведенного на рисунке 2, равно $S(F_y)=3,402$ кН. Тогда максимальное значение боковой силы по (14) будет равно $F_{y\max}=8,505$ кН, что меньше, чем при ее определении по (2) $F_{y\max}=12,875$ кН. При этом величина k_y для этого фрагмента составит 3,592, т.е. будет в 1,514 раза больше, чем при определении $F_{y\max}$ по величине среднего значения абсолютного максимума исходного скорректированного случайного процесса боковой силы $\bar{H}_a$.

Это свидетельствует о том, что применение предложенной методики позволяет получить значительно меньшие значения коэффициента запаса устойчивости колеса против схода с рельсов и, следовательно, предъявляет более строгие требования к рельсовому экипажу.

Выводы

1. Рассмотренный способ повышения достоверности результатов вероятностного анализа полезного случайного процесса за счет мультипликативного его представления в виде произведения случайного телеграфного и модифицированного процессов существенно уточняет числовые значения вероятностных характеристик.

2. Определение максимального значения боковой силы по среднему значению абсолютных максимумов случайного процесса предъявляет более строгие требования к рельсовому экипажу, и этот способ целесообразно использовать при оценке величины коэффициента запаса устойчивости колеса против схода с рельсов.

Список литературы

1. Бидуля А.Л., Краснов О.Г., Акашев М.Г., Ефименко А.В. Геометрически-силовой метод оценки устойчивости порожних вагонов // Вагоны и вагонное хозяйство. 2011. № 2. С. 45-46.
2. Коссов В.С., Бидуля А.Л., Краснов О.Г., Акашев М.Г. Результаты эксплуатационных испытаний геометрически-силового метода оценки состояния пути // Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2013. № 5. С. 97-104.

3. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартиформ, 2016. 58 с.
4. Вершинский С.В., Данилов В.Н., Челноков И.И. Динамика вагона. М.: Транспорт, 1978. 352с.
5. Нормы расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). М.: ГосНИИВ-ВНИИЖТ, 1996. 319 с.
6. Погорелов Д.Ю., Симонов В.А. Показатель для оценки опасности схода подвижного состава путем вкатывания колеса на головку рельса // Вісн. СНУ ім. В. Даля. 2010. № 5 (147). Ч. 1. С. 64-70.
7. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Советское радио, 1974. 549 с.
8. Тихонов В.И. Выбросы траекторий случайных процессов. М.: Наука, 1987. 303 с.
9. Бирюков И.В., Савоськин А.Н., Бурчак Г.П. и др. Механическая часть тягового подвижного состава: учебник для вузов ж.-д. трансп. М.: Альянс, 2013. 440 с.

Сведения об авторах:

Савоськин Анатолий Николаевич – д.т.н., профессор кафедры «Электропоезда и локомотивы», РУТ (МИИТ), г. Москва;

Акашев Михаил Геннадьевич – ведущий инженер отдела «Путь и специальный подвижной состав», АО «ВНИКТИ», г. Коломна.