УДК 519.2:629.2

Л. Г. ЛАПИНА, И. А. МАЩЕНКО

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПУТИ ПО ПЕРЕКОСАМ РЕЛЬСОВЫХ НИТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ХОДОВЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Предложен способ качественной оценки состояния по перекосам рельсовых нитей участков железнодорожного пути по результатам проведенных на них ходовых динамических испытаний грузовых вагонов. При проведении исследований применялись методы математического моделирования и математической статистики, в частности спектрального анализа.

Качественную оценку перекосов рельсовых нитей предлагается проводить путем сравнения дисперсий и спектральных плотностей неровностей пути, вычисленных с использованием экспериментальных записей вертикальных ускорений боковых рам тележки над буксами и передаточной функции тракта «боковая рама тележки – путь», с базовыми дисперсиями и спектральными плотностями неровностей участков пути известной балльности. Приведены примеры практического применения такого способа оценки. Использование предложенного подхода при обработке результатов ходовых динамических испытаний позволит исключить те участки, где сумма баллов выходит за установленные пределы, и повысит тем самым достоверность экспериментальной оценки динамических качеств экипажа.

Запропоновано спосіб якісної оцінки стану за перекосами рейкових ниток ділянок залізничної колії, на яких проходили ходові динамічні випробування вантажних вагонів. При проведенні досліджень застосовувалися методи математичного моделювання та математичної статистики, зокрема спектрального аналізу.

Якісну оцінку перекосів рейкових ниток пропонується проводити шляхом порівняння дисперсій і спектральних густин нерівностей колії, обчислених з використанням експериментальних записів вертикальних прискорень бічних рам візка над буксами і передавальної функції тракту "бічна рама візка – колія», з базовими дисперсіями і спектральними густинами нерівностей ділянок колії відомої бальності. Наведено приклади практичного застосування такого способу оцінки. Його використання при обробці результатів ходових динамічних випробувань дозволить виключити ті ділянки, де сума балів виходить за встановлені межі, і підвищить тим самим достовірність експериментальної оцінки динамічних якостей екіпажу.

A method of a qualitative assessment of the distorted rail lines of the railway track portions is proposed using the results of dynamic running tests of freight cars. In the research methods of mathematical modeling and mathematical statistics, in particular a spectral analysis were used.

Qualitative assessments of distortions of rail lines are proposed to compare variances and spectral densities of irregularities of the track calculated using experimental records of vertical accelerations of the bogie side frames over axle boxes and the tract transfer function of the side bogie frame and track with the basic variances and spectral densities of irregular portions of the track of known intensities. Examples of practical applications of this method of assessments are presented. The proposed method for processing the results of dynamic running tests will exclude those areas where intensities of irregularities are beyond the measured limit, and thus increase the accuracy of the experimental evaluation of the dynamic response of the vehicle.

Для получения полного представления о состоянии пути, определяемом неровностями в вертикальной плоскости, наряду с оценкой по просадкам [1] необходимо произвести оценку и по взаимному положению рельсовых нитей по высоте (т. е. неровностям по уровню), доля которых в общем количестве отступлений от норм содержания рельсовой колеи на железных дорогах Украины весьма значительна.

Оценку состояния пути по уровню можно выполнить по энергетическим спектрам (спектральным плотностям (СП)) и дисперсиям неровностей путем сравнения их расчетных значений с некоторыми базовыми спектральными плотностями (БСП) и базовыми дисперсиями (БД) аналогично тому, как описано в работе [1] для просадок. В качестве исходных данных для определения СП неровностей пути используются записи вертикальных ускорений двух боковых рам тележки над буксами одной колесной пары, полученные во время ходовых динамических испытаний экипажа наряду с записями ускорений его обрессоренных частей.

По известным спектральным плотностям ускорений заданных точек эки-

пажа СП неровностей пути можно найти по известной формуле [2]

$$S_{\text{нер}}(\omega) = \frac{S_{\text{уск}}(\omega)}{\omega^4 \left| W(i\omega) \right|^2}, \qquad (1)$$

где $S_{\text{нер}}(\omega)$ – спектральная плотность неровностей пути; ω – круговая частота вынужденных колебаний, рад/сек ($\omega = 2\pi f$, f – частота, Гц); $S_{\text{уск}}(\omega)$ – СП ускорений заданной точки экипажа; $W(i\omega)$ – передаточная функция тракта «неровности пути – перемещение заданной точки экипажа»; i – мнимая единица.

Для вычисления СП неровностей рельсовых нитей по уровню можно определить СП ускорений боковых рам тележки над буксами одной колесной пары, вызванных колебаниями боковой качки, и передаточную функцию, устанавливающую связь между этими ускорениями и вызывающими их неровностями пути (неровностями по уровню). Для этого достаточно использовать упрощенную расчетную схему половины одной тележки грузового вагона, включающую в себя связанные осью колесной пары половины необрессоренных масс тележки с упругими колесами на упругом пути (рис. 1).

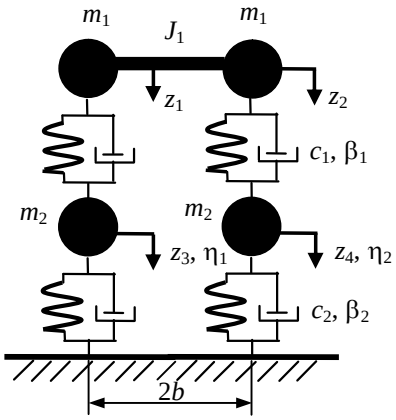


Рис. 1

В приведенной расчетной схеме m_1 – часть необрессоренной массы тележки, равная полусумме масс боковины, оси колесной пары, диска одного колеса и двух ступиц; J_1 – сумма моментов инерции (относительно вертикальной продольной плоскости симметрии экипажа) колесной пары и боковых рам тележки; c_1 – радиальная жесткость диска колеса; β_1 – эквивалентное демпфирование диска колеса; m_2 – масса половины диска одного колеса; c_2 – жесткость пути, приходящаяся на одно колесо; β_2 – эквивалентное демпфирование пути, приходящееся на одно колесо; $2b$ – расстояние поперек пути между колесами одной колесной пары; $z_1 = z_1(t)$, $z_2 = z_2(t)$, $z_3 = z_3(t)$, $z_4 = z_4(t)$ – вертикальные перемещения сосредоточенных масс в расчетной схеме; $\eta_1 = \eta_1(t)$, $\eta_2 = \eta_2(t)$ – вертикальные неровности двух рельсовых нитей.

Уравнения вынужденных колебаний такой системы имеют вид:

$$\begin{cases} (m_1 + \dfrac{J_1}{b^2})\ddot{z}_1 + (m_1 - \dfrac{J_1}{b^2})\ddot{z}_2 + \beta_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_3) + c_1(z_1 - z_3) = 0, \\ (m_1 + \dfrac{J_1}{b^2})\ddot{z}_2 + (m_1 - \dfrac{J_1}{b^2})\ddot{z}_1 + \beta_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_4) + c_1(z_2 - z_4) = 0, \\ m_2\ddot{z}_3 + \beta_2\dot{z}_3 + c_2 z_3 - \beta_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_3) - c_1(z_1 - z_3) = m_2\ddot{\eta}_1 + \beta_2\dot{\eta}_1 + c_2\eta_1, \\ m_2\ddot{z}_4 + \beta_2\dot{z}_4 + c_2 z_4 - \beta_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_4) - c_1(z_2 - z_4) = m_2\ddot{\eta}_2 + \beta_2\dot{\eta}_2 + c_2\eta_2. \end{cases} \qquad (2)$$

В данных исследованиях интерес представляют только колебания, вызванные неровностями пути по уровню $\theta(t)$. Введя новые переменные $\theta(t)=\eta_2(t)-\eta_1(t)$, $\delta(t)=z_2(t)-z_1(t)$, $\chi(t)=z_4(t)-z_3(t)$ и представив их в виде $\theta=\theta(\omega)\cdot e^{i\omega t}$, $\delta=\delta(\omega)\cdot e^{i\omega t}$, $\chi=\chi(\omega)\cdot e^{i\omega t}$, после несложных преобразований можно записать уравнения (2) в частотной области в виде:

$$\begin{cases}\left(-\dfrac{2J_1}{b^2}\omega^2+i\omega\beta_1+c_1\right)\delta(\omega)-\left(c_1+i\omega\cdot\beta_1\right)\chi(\omega)=0,\\ \left(-m_2\omega^2+i\omega(\beta_1+\beta_2)+c_1+c_2\right)\chi(\omega)-\left(c_1+i\omega\beta_1\right)\delta(\omega)=\\ =\left(-m_2\omega^2+i\omega\beta_2+c_2\right)\theta(\omega).\end{cases} \tag{3}$$

Для определения обратной передаточной функции $A_{\text{пер}}(i\omega)$, связывающей кососимметричное относительно оси пути перемещение необрессоренной части тележки $\delta(\omega)$ и неровности по уровню $\theta(\omega)$, удобно выразить $\chi(\omega)$ из первого уравнения системы (3) через $\delta(\omega)$ и подставить его во второе:

$$A_{\text{пер}}(i\omega)=\frac{\theta(\omega)}{\delta(\omega)}=$$

$$=\frac{\left(-m_2\omega^2+i\omega(\beta_1+\beta_2)+c_1+c_2\right)\cdot\left(-\dfrac{2J_1}{b^2}\omega^2+i\omega\beta_1+c_1\right)-(c_1+i\omega\beta_1)^2}{-m_2\omega^2+i\omega\beta_2+c_2}. \tag{4}$$

По разности экспериментальных записей ускорений двух боковых рам тележки над буксами одной колесной пары $\ddot{\delta}(t)=\ddot{z}_2(t)-\ddot{z}_1(t)$ однозначно определяется спектральная плотность $S_{\ddot{\delta}}(\omega)$. Спектральная плотность неровностей по уровню $S_\theta(\omega)$ может быть вычислена с помощью выражения

$$S_\theta(\omega)=\frac{a^2_{\text{пер}}}{\omega^4}\cdot S_{\ddot{\delta}}(\omega), \tag{5}$$

где $a^2_{\text{пер}}=\left|A_{\text{пер}}(i\omega)\right|^2$.

Численные значения этого коэффициента для случая задания параметров тележки 18-100 со стандартными колесами и пути с железобетонными шпалами приведены на рис. 2.

Как видно из графика, отличия между СП разности перемещений боковых рам тележки над буксами и СП перекосов рельсовых нитей существенно изменяются с ростом частоты. Поэтому, в отличие от случая оценки состояния пути по просадкам [1], приближенно принимать в качестве СП неровностей по уровню значения СП разности перемещений боковых рам тележки

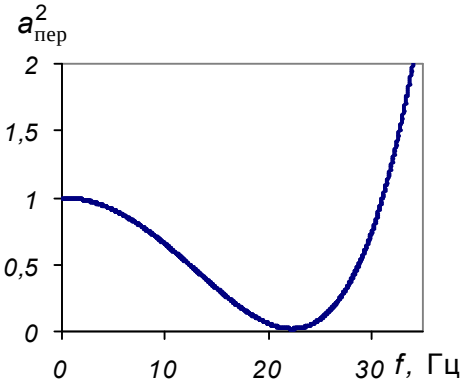


Рис. 2

над буксами одной колесной пары не следует, поскольку связывающий их коэффициент $a^2_{пер}$ существенно отличается от 1 в широком диапазоне частот.

Согласно [3] неровности по уровню подразделяются на перекосы и плавные отклонения по уровню. К перекосам относятся резкие изменения положения рельсовых нитей по уровню в разные стороны с длиной волны неровности 40 м и менее. Более длинные неровности в поперечной вертикальной плоскости считаются плавными отклонениями по уровню. Проведенные исследования показали, что с помощью описанного способа достоверно могут быть оценены неровности по уровню с длиной волны от 3 до 50 м [4, 5]. Исходя из этого, в дальнейшем исследуются только короткие неровности по уровню – перекосы рельсовых нитей с длиной волны от 3 до 40 м.

Вычислив для каждой скорости движения нижнюю ω_{min} и верхнюю ω_{max} границы частотного диапазона, соответствующие максимальной и минимальной (соответственно 40 м и 3 м) длине перекосов рельсовых нитей, можно найти дисперсию перекосов D_θ на каждом участке пути как площадь под кривой односторонней СП по известной формуле

$$D_\theta = \int_{\omega_{min}}^{\omega_{max}} S_\theta(\omega) d\omega . \qquad (6)$$

Интегральная оценка состояния пути по дисперсиям дает возможность получить результаты, несколько абстрагируясь от конкретного набора перекосов рельсовых нитей.

Путем сравнения спектральных плотностей и дисперсий перекосов участка пути, на котором проходили ходовые испытания вагонов, с базовыми СП и дисперсиями можно приближенно оценить балльность этого участка по перекосам.

Методика формирования БСП перекосов аналогична описанной в статье [6] для просадок. Суть ее состоит в том, что на основе реальных записей показаний путеизмерителя формируются процессы перекосов рельсовых нитей, соответствующие виртуальным участкам пути с заданной суммой баллов за перекосы $\Sigma_{пер}$. Для этого искусственно изменяются ординаты отдельных неровностей таким образом, чтобы изменить балльность участка до требуемого значения $\Sigma_{пер}$. Амплитуды перекосов подбираются так, чтобы они по возможности были близки к наибольшим для заданной степени отступления от норм содержания рельсовой колеи.

Данным способом сформирован ряд процессов, соответствующих различным значениям $\Sigma_{пер}$. В качестве исходного взята запись неровностей по уровню, имеющих наибольшую дисперсию в анализируемом частотном диа-

пазоне среди рассмотренных записей на участках нулевой балльности магистрального пути Пятихатки – Чаплино Приднепровской железной дороги (для таких участков имелось достаточно большая выборка записей показаний путеизмерителя). Следует отметить, что каждый из построенных случайных процессов является только одним вариантом возможных неровностей по уровню пути заданной балльности $\Sigma_{\text{пер}}$, однако при этом спектральная плотность и дисперсия таких неровностей близки к максимально возможным.

С учетом соотношений, установленных при анализе статистических характеристик перекосов на участках с $\Sigma_{\text{пер}} = 0$, определены верхняя и нижняя границы СП и дисперсии перекосов на участках различной балльности. Полученные значения верхней границы СП и дисперсии предлагается использовать как базовые при проведении качественной оценки состояния участков железнодорожного пути по перекосам.

Зависимость БД перекосов рельсовых нитей от суммы баллов за эти неровности на участке может быть аппроксимирована следующим аналитическим выражением:

$$D_{\theta\max}(\Sigma_{\text{пер}}) = \left(-1{,}44\cdot 10^{-4}\cdot \Sigma_{\text{пер}}^2 + 7{,}33\cdot 10^{-2}\cdot \Sigma_{\text{пер}} + 1{,}83\right)\cdot 10^{-6},\ \text{м}^2. \quad (7)$$

Нижняя граница дисперсий перекосов $D_{\theta\min}$ на участках пути балльности $\Sigma_{\text{пер}}$ определяется следующим образом:

$$D_{\theta\min}(\Sigma_{\text{пер}}) = D_{\theta\max}(\Sigma_{\text{пер}})/10. \quad (8)$$

Алгоритм проведения качественной оценки состояния пути по перекосам аналогичен описанному в статье [1] для просадок рельсовых нитей. Он предполагает сравнение дисперсии неровностей анализируемого участка с БД, а затем спектральной плотности этих неровностей – с БСП, соответствующими участкам пути заданной балльности. Практическое его применение продемонстрировано на примере оценки состояния двух участков пути (24-й и 31-й километры направления Новомосковск – Воскобойня) по записям ускорений боковых рам тележек цистерны-эталона (скорость движения на участках соответственно 110 км/ч и 90 км/ч), полученным при испытаниях, проведенных в марте 2011 г. Украинским научно-исследовательским институтом вагоностроения. Для этого направления имелась также «Ведомость оценки километров» (февраль 2011 г.), согласно которой перекосы рельсовых нитей на участке 24-й км оценены в 20 баллов, на участке 31-й км – 0 баллов.

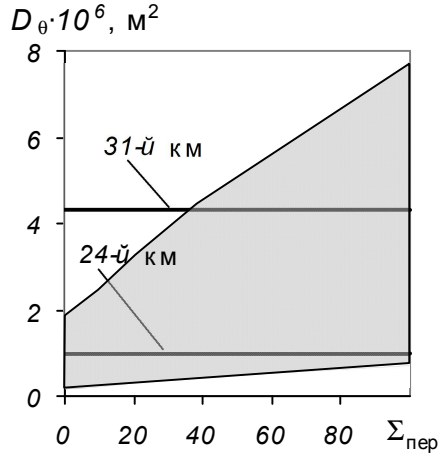
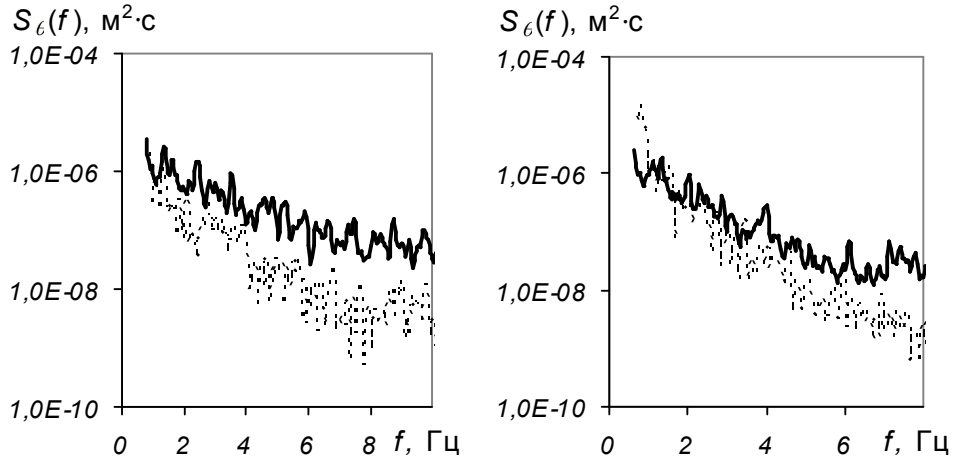


Рис. 3

На рис. 3 показано расположение уровней дисперсий перекосов рельсовых нитей D_θ на анализируемых участках пути в области возможных значений от $D_{\theta\min}$ до $D_{\theta\max}$ (на рисунке она выделена серым цветом) в зависимости от суммы баллов за перекосы

$\Sigma_{\text{пер}}$. На рис. 4 приведено сравнение расчетных СП перекосов рельсовых нитей на этих участках с соответствующими БСП: с БСП-20 (соответствующей участку пути с $\Sigma_{\text{пер}} = 20$) для участка 24-й км и с БСП-0 (соответствующей $\Sigma_{\text{пер}} = 0$) для участка 31-й км.



а) б)

Рис. 4

Как видно из рис. 3 и рис. 4а, дисперсия перекосов рельсовых нитей на участке 24-й км лежит в области допустимых значений для такой балльности, а СП перекосов на этом участке (пунктирная линия) не превышает БСП-20 (сплошная линия) во всем анализируемом частотном диапазоне. Следовательно, сумма баллов за перекосы рельсовых нитей $\Sigma_{\text{пер}}$ на данном участке вполне может соответствовать данным Ведомости.

На участке 31-й км дисперсия перекосов превышает допустимые для нулевой балльности значения (см. рис. 3), и СП перекосов в низкочастотной области на графике лежит выше БСП-0 (см. рис. 4б). Поэтому перекосы рельсовых нитей на этом участке могут быть оценены от 35 баллов и выше (что следует из рис. 3), но никак не в 0 баллов, как это указано в Ведомости. Данный факт может означать либо неточности данных Ведомости, либо сдвижку при фиксировании километровых отметок в испытаниях.

Выводы. 1. По имеющимся экспериментальным записям вертикальных ускорений двух боковых рам тележки грузового вагона над одной колесной парой можно определить СП и дисперсии перекосов рельсовых нитей на пути, по которому двигался этот вагон при испытаниях.

2. Сравнение характеристик перекосов, определенных по ускорениям боковых рам тележки, с БСП и БД позволяет получать качественную оценку состояния пути по перекосам рельсовых нитей и контролировать данные «Ведомости оценки километров». Это также дает возможность при обработке результатов динамических испытаний вагонов исключить в экспериментальных записях показателей динамических качеств экипажа данные, полученные на участках пути ненадлежащего состояния, повысив тем самым достоверность экспериментальной оценки динамических качеств экипажа, и умень-

шить различия между экспериментальными и прогнозными оценками исследуемых показателей.

1. *Лапина Л. Г.* Оценка просадок рельсовых нитей по ускорениям боковых рам тележек движущегося грузового вагона / *Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко* // Техническая механика. – 2013. – № 2. – С. 44 – 50.
2. *Ушкалов В. Ф.* Статистическая динамика рельсовых экипажей / *В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько*. – Киев : Наук. думка, 1982. – 360 с.
3. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колієвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії : ЦП-0020 : затв. наказом Укрзалізниці від 17.01.1996 р. № 9-Ц (зі змінами та доповненнями у відповідності до наказу від 01.12.2004 р. №917-ЦЗ). – Київ, 2005. – 48 с.
4. Спектральный состав неровностей пути и напряженно-деформированное состояние его элементов / *А. Я. Коган, М. А. Левинзон, С. В. Малинский, В. О. Певзнер* // Вестник ВНИИЖТ. – 1991. – № 1. – С. 39 – 43.
5. *Ушкалов В. Ф.* Расчетные возмущения для исследования динамики железнодорожных вагонов / *В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко* // Залізничний транспорт України. – 2012. – № 1. – С. 38 – 41.
6. *Лапина Л. Г.* Анализ статистических характеристик просадок рельсовых нитей и построение базовых неровностей пути / *Л. Г. Лапина* // Техническая механика. – 2013. – № 1. – С. 17 – 24.

Институт технической механики
НАН Украины и ГКА Украины,
Днепропетровск

Получено 27.11.13
в окончательном варианте 05.02.14