

## ОЦЕНКА ПРОСАДОК РЕЛЬСОВЫХ НИТЕЙ ПО УСКОРЕНИЯМ БОКОВЫХ РАМ ТЕЛЕЖЕК ДВИЖУЩЕГОСЯ ГРУЗОВОГО ВАГОНА

Целью работы является разработка способа качественной оценки просадок рельсовых нитей пути, на котором проходили ходовые динамические испытания грузовых вагонов. При проведении исследований применялись методы математического моделирования и математической статистики, в частности спектрального анализа.

Для упрощенной плоской расчетной схемы грузового вагона определена передаточная функция, позволяющая по записям ускорений неподрессоренных частей тележки вычислить спектральную плотность просадок рельсовых нитей участка пути, на котором зарегистрированы данные записи. Предложен способ качественной оценки просадок рельсовых нитей, который заключается в сравнении дисперсий и спектральных плотностей неровностей пути, вычисленных с использованием экспериментальных записей вертикальных ускорений боковых рам тележки над буксами грузового вагона, и базовых дисперсий и спектральных плотностей неровностей участков пути известной бальности. Приведены примеры практического применения этого способа.

Использование предложенного способа качественной оценки просадок позволит при обработке экспериментальных записей исключить зоны, где сумма баллов за просадки рельсовых нитей выходит за пределы, установленные для пути хорошего состояния, и повысит тем самым достоверность экспериментальной оценки динамических качеств экипажа.

Метою роботи є розробка способу якісної оцінки осідань рейкових ниток колії, на якій проходили ходові динамічні випробування вантажних вагонів. При проведенні досліджень застосовувалися методи математичного моделювання і математичної статистики, зокрема спектрального аналізу.

Для спрощеної плоскої розрахункової схеми вантажного вагона визначена передавальна функція, що дозволяє за записами прискорень неідресорених частин візка обчислити спектральну густину осідань рейкових ниток ділянки колії, на якій зареєстровані дані записи. Запропоновано спосіб якісної оцінки осідань рейкових ниток, який полягає в порівнянні дисперсій і спектральної густини нерівностей колії, обчислених з використанням експериментальних записів вертикальних прискорень бічних рам візка над буксами вантажного вагона, і базових дисперсій та спектральних густин нерівностей ділянок колії відомої бальності. Наведені приклади практичного застосування цього способу.

Використовування запропонованого способу якісної оцінки осідання дозволить при обробці експериментальних записів виключити зони, де сума балів за осідання рейкових ниток виходить за межі, встановлені для колії доброго стану, і підвищити тим самим достовірність експериментальної оцінки динамічних якостей екіпажа.

The research aim is to provide a method of a qualitative assessment of settlements of the lines of rails of the track on which the dynamic tests of the freight cars are carried out. In the study the methods of the mathematical modelling and mathematical statistics, in particular a spectral analysis are applied.

To simplify the design plane scheme of the freight car, the transfer function is derived to calculate a spectral density for settlements of the lines of rails of the track path on which the present records are registered using records of accelerations of unsprung truck parts. A method of a qualitative assessment of settlements of the lines of rails which compares the variances and spectral densities of the track irregularities calculated from the experimental records of vertical accelerations of the truck side frames over the freight car axle boxes, and the basic variances and spectral densities of irregularities of the track path of the known intensities is proposed. Examples of practical applications of this method are presented.

The method proposed eliminates the zones where the sum of points for settlement of the lines of rails is beyond the limits for the track of good conditions, and thereby enhances the accuracy of the experimental estimation of the dynamic qualities of the vehicle in processing the experimental data.

Согласно установленным требованиям, ходовые динамические испытания железнодорожных вагонов должны проводиться на пути, состояние которого типично для сети железных дорог и соответствует оценке не ниже, чем «хорошо» [1]. Однако на практике иногда оказывается, что некоторые отрезки опытного пути (их, как правило, немного) находятся в удовлетворительном состоянии. Начало и конец таких участков не фиксируются в экспериментальных поездках при записи контролируемых показателей и изменении скоростного режима движения состава. Присутствие в записях данных, полученных на участках пути удовлетворительного состояния, иногда приводит к существенно завышенным экспериментальным значениям динамических по-

© Л. Г. Лапина, И. А. Машенко, 2013

казателей экипажа, который может получить согласно Нормам [2] неудовлетворительную оценку хода и быть признан непригодным к эксплуатации.

Если перед обработкой записей динамических процессов проанализировать состояние пути, на котором проводились испытания, то можно в ходе обработки исключить зоны, соответствующие записям с участков пути удовлетворительного состояния. Это позволит получить данные о динамических показателях, соответствующих колебаниям экипажа при движении по пути с оценкой не ниже, чем «хорошо», не завышая необоснованно их значения.

Отрезки пути различного состояния было бы несложно выделить, если бы в состав диагностического поезда наряду с испытуемыми вагонами входил и вагон-путеизмеритель, как это было сделано, например, при проведении испытаний, результаты которых описаны в [3]. В тех случаях, когда в испытаниях вагон-путеизмеритель не участвует, для определения в записях процессов зон, которые нужно исключить, можно использовать информацию, содержащуюся в специальной ведомости оценки состояния рельсового пути (далее Ведомость), составленной по результатам расшифровки записей показаний путеизмерителя при плановых проверках. Однако данные такой Ведомости по разным причинам (с учетом временного и человеческого факторов) не всегда соответствуют действительному состоянию пути на момент проведения испытаний, поэтому представляет интерес проконтролировать оценку, зафиксированную в Ведомости, используя результаты тех же испытаний – записи ускорений неподрессоренных частей тележки.

Несмотря на то, что речь идет лишь о качественной оценке состояния пути, невозможно установить визуальную связь между ускорениями тележки и неровностями пути, поскольку высокий уровень ординат в записях ускорений совсем не обязательно свидетельствует о высоком уровне ординат соответствующих неровностей. Тем не менее, записи ускорений можно использовать для приближенной качественной оценки состояния пути, если такую оценку производить не по временным процессам неровностей, а по их энергетическим спектрам (спектральным плотностям (СП)) и дисперсиям путем сравнения расчетных СП и дисперсий неровностей пути с некоторыми базовыми спектральными плотностями и дисперсиями неровностей.

В данной работе показано, как с помощью такого способа можно оценить неровности пути в вертикальной плоскости, обусловленные просадками рельсовых нитей.

Определив по экспериментальным записям ускорений  $\ddot{z}$  боковых рам тележки над буксами их спектральную плотность  $S_z$ , можно [4] найти СП просадок  $\eta$  рельсовых нитей:

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{S_z(\omega)}{\omega^4 |W(i\omega)|^2}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота вынужденных колебаний, рад/сек ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – частота в Гц);  $W(i\omega)$  – передаточная функция тракта «просадки – перемещение рамы тележки»;  $i$  – мнимая единица.

Для вычисления передаточной функции, входящей в выражение (1), рассмотрена упрощенная расчетная схема грузового вагона (рис. 1). Поскольку жесткость рессорного подвешивания тележек значительно меньше жесткостей пути и колес и, следовательно, эта связь в сложной механической систе-

ме, которой является вагон, слабая, для решения поставленной задачи можно рассматривать тележки без учета кузова, а в данном случае даже половину одной тележки (боковую раму с упругими колесами), приходящуюся на один рельс.

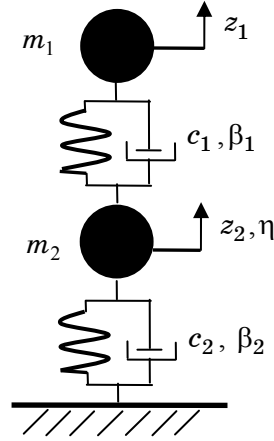


Рис. 1

В приведенной расчетной схеме  $m_1$  – масса, равная сумме масс одной боковой рамы тележки, двух полуосей колесных пар и полусумме масс дисков двух колес;  $c_1$  – удвоенная радиальная жесткость диска колеса;  $\beta_1$  – удвоенное эквивалентное демпфирование диска колеса;  $m_2$  – масса, равная сумме масс ободьев двух колес и полусумме масс их дисков;  $c_2$  – жесткость пути (на сторону тележки);  $\beta_2$  – эквивалентное демпфирование пути (на сторону тележки);  $z_1, z_2$  – вертикальные перемещения сосредоточенных масс в расчетной схеме,  $\eta$  –

входное возмущение (просадки рельсового пути).

Уравнения вынужденных колебаний такой системы имеют вид:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + \beta_1 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + c_1 (z_1 - z_2) = 0; \\ m_2 \ddot{z}_2 + c_2 z_2 + c_1 (z_2 - z_1) + \beta_2 \dot{z}_2 + \beta_1 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) = m_2 \ddot{\eta} + \beta_2 \dot{\eta} + c_2 \eta. \end{cases} \quad (2)$$

Представив переменные и входное возмущение в виде  $z_1 = z_1(\varpi) \cdot e^{i\varpi t}$ ,  $z_2 = z_2(\varpi) \cdot e^{i\varpi t}$ ,  $\eta = \eta(\varpi) \cdot e^{i\varpi t}$ , можно записать уравнения (2) в частотной области:

$$\begin{cases} (-m_1 \varpi^2 + c_1 + i\varpi\beta_1) \cdot z_1(\varpi) - (c_1 + i\varpi\beta_1) \cdot z_2(\varpi) = 0; \\ (-m_2 \varpi^2 + (c_1 + c_2) + i\varpi(\beta_1 + \beta_2)) \cdot z_2(\varpi) - (c_1 + i\varpi\beta_1) \cdot z_1(\varpi) = \\ = (-m_2 \varpi^2 + c_2 + i\varpi\beta_2) \cdot \eta(\varpi). \end{cases} \quad (3)$$

Выразив из первого уравнения  $z_2(\varpi)$  и подставив во второе уравнение, несложно определить обратную передаточную функцию  $A_{пр}(i\varpi)$ , связывающую перемещение боковой рамы тележки  $z_1(\varpi)$  и возмущение  $\eta(\varpi)$ :

$$A_{пр}(i\varpi) = \frac{\eta(\varpi)}{z_1(\varpi)} = \frac{1}{(-\varpi^2 m_2 + c_2 + i\varpi\beta_2)} \times \left[ (-\varpi^2 m_2 + (c_1 + c_2) + i\varpi(\beta_1 + \beta_2)) \frac{(-\varpi^2 m_1 + c_1 + i\varpi\beta_1)}{c_1 + i\varpi\beta_1} - (c_1 + i\varpi\beta_1) \right]. \quad (4)$$

Далее по спектральной плотности  $S_{z_1}(\varpi)$  экспериментальных записей ускорений  $\ddot{z}_1(t)$  боковой рамы тележки с учетом обратной передаточной

функции из выражения (4) вычисляется спектральная плотность просадок рельсовых нитей:

$$S_{\eta}(\omega) = \frac{a_{\text{пр}}}{\omega^4} \cdot S_{\dot{z}_1}(\omega), \quad (5)$$

где  $a_{\text{пр}} = \frac{|A_{\text{пр}}(i\omega)|^2}{|W(i\omega)|^2}$ .

На рис. 2 приведены численные значения коэффициента  $a_{\text{пр}}$ , показывающего, как отличается СП неровностей пути  $S_{\eta}(\omega)$  от СП перемещений

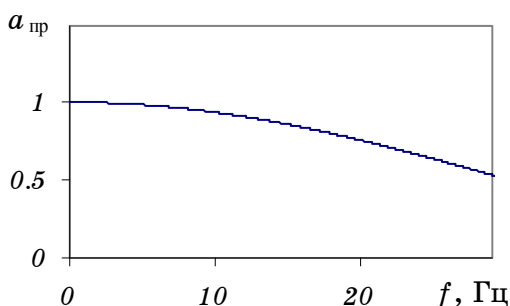


Рис. 2

боковой рамы тележки. Эти значения получены для параметров тележки 18-100 со стандартными колесами и пути с железобетонными шпалами. Рассмотренная область частот соответствует просадкам рельсовых нитей длиной от 0,9 до 12 м [5, 6], которые учитываются при подсчете баллов: например, при скорости движения путеизмерителя  $V=70$  км/ч это диапазон от 1,6 до 21,6 Гц, при  $V=100$  км/ч – от 2,3 до 30,9 Гц.

Как следует из графика, при низких частотах значения спектральных плотностей неровностей пути и перемещений боковой рамы тележки близки между собой, а с ростом частоты различие увеличивается (примерно в 2 раза при 30 Гц).

Дисперсия неровностей пути в диапазоне частот, соответствующем длинам просадок рельсовых нитей, которые учитываются при определении суммы баллов, по значениям СП неровностей пути  $S_{\eta}(\omega)$  может быть вычислена по известной формуле

$$D_{\eta} = \int_{\omega_{\min}}^{\omega_{\max}} S_{\eta}(\omega) d\omega, \quad (6)$$

где  $\omega_{\min}$  и  $\omega_{\max}$  соответствуют максимальной (12 м) и минимальной (0,9 м) учитываемым длинам просадок и определяются скоростью движения экипажа.

Как показано в статье [7], на участках пути с одинаковой суммой баллов за просадки  $\Sigma_{\text{пр}}$  значения СП неровностей при одном значении частоты могут различаться весьма существенно. Следовательно, широким является и интервал изменения значений дисперсии  $D_{\eta}$  для каждого значения  $\Sigma_{\text{пр}}$ , причем интервалы, соответствующие различным значениям  $\Sigma_{\text{пр}}$ , в значительной мере пересекаются. На рис. 3 серым цветом показано поле изменения дисперсий просадок для разных значений  $\Sigma_{\text{пр}}$ , построенное по данным [7] с учетом множителя  $1/2\pi$ .

Путем сравнения спектральных плотностей и дисперсий неровностей участка пути, на котором проходили ходовые испытания вагонов, с базовыми

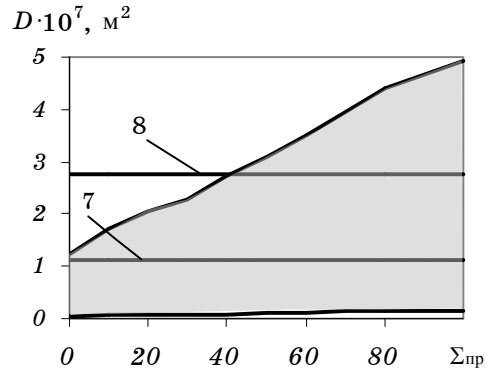


Рис. 3

СП и дисперсиями можно качественно оценить состояние этого участка, а точнее, дать ответ на вопрос: «Может ли сумма баллов за просадки на данном участке равняться приведенной в Ведомости?». Базовые спектральные плотности (БСП) и дисперсии (БД) – это значения наибольших СП и верхних границ интервалов изменения дисперсий для пути заданной балльности. Такая оценка проводится следующим образом.

Прежде всего, нужно сравнить дисперсию неровностей анализируемого участка  $D_{\eta}$  с базовыми дисперсиями. Если значение  $D_{\eta}$  окажется больше, чем БД неровностей пути с балльностью  $\Sigma_{\text{пр}}^{\text{Вед}}$ , указанной в Ведомости, это может означать только одно: на момент проведения испытаний анализируемый участок находится в худшем состоянии, чем зафиксировано в Ведомости.

В том случае, когда дисперсия неровностей рассматриваемого участка не превышает БД неровностей пути с балльностью  $\Sigma_{\text{пр}}^{\text{Вед}}$ , нужно провести сравнение СП неровностей этого участка с БСП неровностей пути такой же балльности. Если значения СП расположены, в основном, ниже БСП (допускается превышение уровня БСП на один порядок в небольших частотных диапазонах), то это означает, что состояние участка не противоречит указанному в Ведомости.

Если значение  $D_{\eta}$  существенно меньше значения БД, соответствующего  $\Sigma_{\text{пр}}^{\text{Вед}}$ , а уровень СП неровностей меньше БСП, то можно предположить, что на момент проведения ходовых испытаний состояние участка пути улучшилось (например были выполнены ремонтные работы). Однако, учитывая большой разброс значений спектральных плотностей и дисперсий неровностей пути одинаковой балльности, однозначно утверждать, что сумма баллов за просадки на анализируемом участке будет меньше  $\Sigma_{\text{пр}}^{\text{Вед}}$ , нельзя.

Поскольку одной и той же БД могут соответствовать разные БСП, а одной и той же БСП – разный набор неровностей, отличающихся длиной и амплитудой, а следовательно, и начисленными за них баллами, таким способом, к сожалению, невозможно точно определить балльность участка. Несмотря на это, результаты проведенного сравнения позволяют проконтролировать данные Ведомости, а иногда и выявить неточности в ней.

Практическое применение описанного способа показано на примере оценки состояния двух участков пути (7-й и 8-й километры) по записям ускорений боковых рам тележек полувагона (скорость движения на участках 50 км/ч), полученным при испытаниях на направлении Дарница – Полтава в августе 2010 г. (проведены Украинским научно-исследовательским институтом вагоностроения). Для этой дистанции пути имелась также «Ведомость оценки состояния пути» (август 2010 г.)

Вычисленная по формуле (6) дисперсия неровностей на 7-м км, балльность которого за просадки согласно Ведомости равна 20, оказалась значительно ниже, чем значения БД неровностей пути с суммой баллов за просадки  $\Sigma_{\text{пр}}=20$ , и близкой к БД неровностей пути с  $\Sigma_{\text{пр}}=0$  (горизонтальная линия 7 на рис. 3). Поэтому далее выполнено сравнение СП неровностей этого участка с БСП неровностей пути с  $\Sigma_{\text{пр}}=20$  (рис. 4а), а также с БСП неровностей пути нулевой балльности (рис. 4б). Как видно, в первом случае СП неровностей удовлетворяет требованиям, а во втором – не удовлетворяет. Это позволяет предположить, что состояние участка 7-й км на момент проведения испытаний соответствовало данным Ведомости.

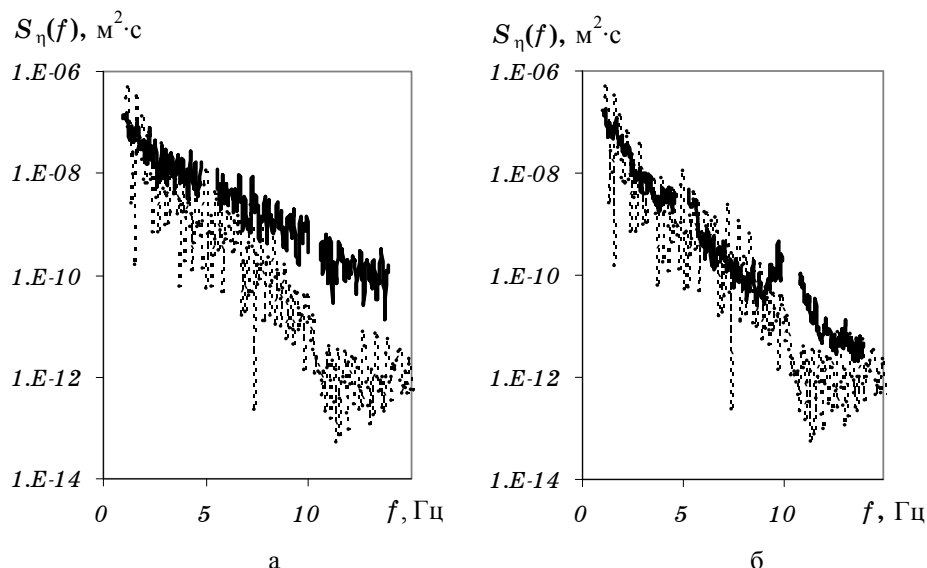


Рис. 4

Дисперсия неровностей участка 8-й км, сумма баллов за просадки на котором согласно той же Ведомости равна 0, оказалась существенно выше, чем БД неровностей пути с  $\Sigma_{\text{пр}}=0$  (горизонтальная линия 8 на рис. 3). В этом случае сравнивать СП с БСП не имеет смысла, поскольку сразу можно утверждать, что на момент проведения ходовых испытаний сумма баллов за просадки на участке оказалась больше, чем указано в Ведомости. Если бы между данными Ведомости и испытаниями был большой временной интервал, можно было бы предположить, что путь в этом месте претерпел разрушение. Но поскольку данные вагона-путьеизмерителя получены в том же месяце, скорее всего, имели место неточности в самой Ведомости.

Следует отметить, что увеличение суммы баллов только за просадки может не повлиять на общую оценку состояния участка пути («отлично», «хорошо» и т. д.).

Неровность  $\eta(t)$ , фигурирующая в уравнениях, представляет собой геометрическую неровность пути. Поэтому с помощью предлагаемого подхода по известным экспериментальным записям ускорений рамы тележки можно оценить спектральную плотность именно геометрических неровностей пути, на котором проходили испытания. На практике состояние железнодорожного пути определяют на основании показаний вагона-путьеизмерителя, который измеряет неровности в процессе движения под нагрузкой, т. е. в динамике.

Вычислить коэффициент, аналогичный  $a_{пр}$ , для перехода от ускорений рамы тележки к неровностям пути, включающим динамическую составляющую, затруднительно. Но для практического его использования это, по-видимому, и не требуется. Динамическая составляющая неровностей, обусловленная взаимодействием экипажа и пути, является высокочастотной, поскольку путь (особенно на железобетонных шпалах) имеет большую жесткость. Значит, основной вклад этой составляющей будет приходиться на область частот, соответствующую просадкам длиной менее 0,9 м, которые не учитываются при определении балльности.

Для получения полного представления о состоянии пути в вертикальной плоскости необходимо аналогичным образом оценивать еще и перекосы рельсовых нитей. Это можно сделать при наличии записей ускорений боковых рам тележки над противоположными буксами одной колесной пары.

**Выводы.** Предложен способ качественной оценки просадок рельсовых нитей пути, на котором проходили ходовые динамические испытания вагонов. Способ заключается в сравнении дисперсий и спектральных плотностей неровностей пути, вычисленных с использованием экспериментальных записей вертикальных ускорений боковых рам тележки над буксами грузового вагона, и базовых дисперсий и спектральных плотностей неровностей участков пути заданной балльности. Его применение позволит при обработке экспериментальных записей исключить зоны, где сумма баллов за просадки выходит за пределы, установленные для пути хорошего состояния. Это повысит достоверность экспериментальной оценки динамических качеств экипажа, поскольку не будет необоснованных превышений уровней динамических показателей испытываемых вагонов. Кроме того, будут, по-видимому, меньше отличия между экспериментальными и прогнозными оценками динамических показателей, полученными в результате расчетов вертикальных колебаний экипажа на пути хорошего состояния.

1. ОСТ 24.050.37-84. Вагоны грузовые и пассажирские. Методы испытаний на прочность и ходовые качества. – 1984. – 51 с.
2. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с.
3. *Краснов О. Г.* О некоторых особенностях влияния колесной пары грузового вагона / *О. Г. Краснов* // Вагоны и вагонное хозяйство. – 2012. – № 3(31). – С. 38 – 40.
4. *Ушкалов В. Ф.* Статистическая динамика рельсовых экипажей. / *В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько.* – Киев : Наук. думка, 1982. – 360 с.
5. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колісвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. – Київ, 2005. – 48 с.
6. *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.
7. *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 18.02.13,  
в окончательном варианте 11.04.13