

ФОРМИРОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ ВХОДНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛИЗА НЕРОВНОСТЕЙ РЕАЛЬНЫХ УЧАСТКОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Предложен подход к построению расчетных входных возмущений для использования при исследованиях динамических качеств рельсовых экипажей. Составляющие возмущений формируются из реализаций случайных процессов, сгенерированных при помощи алгоритма Райса–Пирсона по огибающим максимальных значений спектральных плотностей неровностей железнодорожного пути, зарегистрированных вагоном-путеизмерителем.

Запропоновано підхід до побудови розрахункових вхідних збурень для використання при дослідженнях динамічних якостей рейкових екіпажів. Складові збурень формуються з реалізацій випадкових процесів, що згенеровані за допомогою алгоритму Райса–Пірсона за огинаючими максимальних значень спектральної густини нерівностей залізничної колії, зареєстрованих вагоном-коліввимірником.

An approach to construction of calculated entrance disturbances for studying dynamic qualities of rail cars is offered. Disturbances components are formed from realization of the random processes by using the Rice-Pearson algorithm according to the envelopes of maximal values of spectral densities of railway track irregularities recording by the track-testing car.

Для формирования расчетных входных возмущений, применяемых при исследованиях динамических качеств железнодорожных экипажей, в условиях недостатка экспериментальных данных о геометрии пути представляет интерес построение и использование теоретических реализаций неровностей, спектральный состав которых соответствует реальному пути.

В данной работе для получения таких реализаций использовались записи на бумажной ленте просянок и отклонений по направлению в плане правой и левой рельсовых нитей, зарегистрированные вагоном-путеизмерителем ЦНИИ-2 на прямых и в кривых больших и средних радиусов участка Пятихатки–Чаплино Приднепровской железной дороги при плановой проверке состояния пути в феврале 2007 г. Для определения в цифровом виде фактических вертикальных и горизонтальных неровностей рельсовых нитей, от которых в силу особенностей применяемого в путеизмерителе хордового метода измерений отличаются полученные записи [1], последние были отсканированы, оцифрованы, а затем преобразованы с помощью передаточной функции измерительной системы, позволяющей компенсировать искажения зарегистрированного сигнала.

Для каждой сформированной таким образом реализации неровностей вычислены оценки ее спектральной плотности как функции пространственной частоты F , определяемой длиной волны гармонической составляющей неровности и измеряемой в кол/м. Основываясь на данных [2], отметим, что особенности измерительной, регистрирующей и обрабатывающей систем вагона-путеизмерителя ЦНИИ-2 позволяют достаточно точно получать спектры вертикальных неровностей для частот от 0,0185 до 1,09 кол/м, за исключением точек разрыва графика их обратной частотной характеристики, которые имеют место при частотах, соответствующих длинам волн, кратным базе измерительной тележки $l = 2,7$ м. Исходя из этого, значения спектральной плотности на этих частотах и в их окрестностях, а именно на частотах от 0,35 до 0,39 кол/м и от 0,72 до 0,76 кол/м исключались из рассмотрения при дальнейшем анализе, поскольку они имеют значительные погрешности. Горизонтальные неровности пути, как следует из приведенных в [2] данных, могут быть проанализированы для частот от 0,015 до 0,2 кол/м.

© Л. Г. Лапина, И. А. Машенко, 2010
Техн. механика. – 2010. – № 2.

Полученные оценки спектральных плотностей вертикальных и горизонтальных неровностей сгруппированы в зависимости от наибольшей на данном участке степени отступлений соответствующих неровностей от норм содержания рельсовой колеи. Указанные оценки даже в пределах одной группы имеют значительный разброс. В качестве характеристики неровностей с заданной степенью наибольших на участке отступлений от норм воспользуемся огибающей максимальных значений их спектральных плотностей. В этом случае полностью учитывается частотный состав анализируемых неровностей. Для примера на рис. 1 показаны спектральные плотности вертикальных неровностей с отступлениями от норм не выше II степени и горизонтальных неровностей с отступлениями не выше I степени (тонкие линии), а также соответствующие огибающие их максимальных значений (толстые линии).

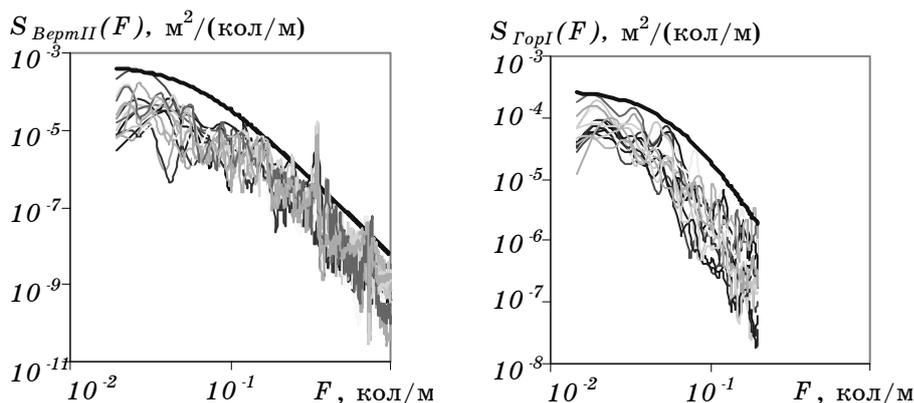


Рис. 1

Для огибающих максимальных значений спектральных плотностей вертикальных и горизонтальных неровностей пути с наибольшими на участке отступлениями от норм различной степени подобраны аналитические выражения, аппроксимирующие их наилучшим образом. Эти выражения представляют собой дробно-рациональные функции частоты F , аналогичные тем, которые рекомендованы для статистического описания дорог различного качества содержания Федеральным управлением железных дорог США [3]:

$$S(F) = \frac{a}{(b + F^2)(c + F^2)}, \quad (1)$$

где $S(F)$ – значение спектральной плотности неровности для пространственной частоты F , выраженной в кол/м; a , b и c – коэффициенты, которые определяются видом неровности (вертикальная или горизонтальная) и наибольшей на участке степенью ее отступления от норм содержания рельсовой колеи.

Значения коэффициентов a , b и c в выражении (1) для оценок спектральных плотностей неровностей с отступлениями от норм различной степени приведены в таблице. Отметим, что среди проанализированных отрезков пути подавляющая часть имела отступления от норм содержания не выше I или не выше II степени. Поэтому для определения оценок спектральных плотностей вертикальных и горизонтальных неровностей с такими отступлениями количество экспериментальных данных было вполне достаточным.

Характеристики спектрального состава неровностей с единичными отступлениями от норм III и IV степеней получены только по одному отрезку пути.

Таблица

Вид неровностей	Наибольшая степень отступлений	Значения коэффициентов для оценок огибающих максимальных значений спектральных плотностей, 10^3		
		$a, \text{ м}^2 \cdot (\text{кол/м})^3$	$b, (\text{кол/м})^2$	$c, (\text{кол/м})^2$
Вертикальные	I	$3,0 \cdot 10^{-6}$	3,5	3,5
	II	$6,0 \cdot 10^{-6}$	4,0	3,0
	III	$3,8 \cdot 10^{-6}$	4,0	4,0
	IV	$5,0 \cdot 10^{-6}$	3,0	3,0
Горизонтальные	I	$3,5 \cdot 10^{-6}$	4,0	3,0
	II	$8,0 \cdot 10^{-6}$	1,0	3,0
	III	$4,6 \cdot 10^{-6}$	2,0	1,5

Определенные с помощью аналитических выражений вида (1) с коэффициентами из таблицы оценки спектральных плотностей используем для численного моделирования реализаций неровностей пути различного состояния, применив один из наиболее широко распространенных алгоритмов генерирования случайных процессов с заданной спектральной плотностью, основанный на разложении Райса–Пирсона [3]:

$$\eta_j = \sum_{k=1}^K \sqrt{2S(\omega_k) \cdot \Delta\omega} \cdot \cos(\omega_k \cdot j \cdot \Delta t + \varphi_k), \quad j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где η_j – ординаты текущей реализации результирующего случайного процесса (неровности); K – количество ординат заданной спектральной плотности $S(\omega)$; $S(\omega_k)$ – значение заданной спектральной плотности при частоте ω_k ; $\Delta\omega$ – шаг по аргументу заданной спектральной плотности $S(\omega)$; Δt – шаг по времени; φ_k – случайная фаза, значения которой распределены равномерно на интервале $[0, 2\pi]$; N – количество точек результирующей реализации неровности.

Поскольку данный алгоритм предусматривает вычисления во временной области, воспользуемся известными соотношениями для перехода из пространственной области во временную:

$$\omega = F \cdot 2\pi V, \quad S(\omega) = S(F) / 2\pi V,$$

где V – скорость движения экипажа по неровности.

Реализаций случайного процесса с заданной спектральной плотностью при помощи алгоритма Райса–Пирсона может быть сгенерировано бесконечно много. В качестве примера на рис. 2 приведена одна из таких реализаций (темная тонкая линия), полученная по огибающей максимальных значений спектральной плотности вертикальных неровностей с отступлениями от норм не выше I степени. Для сравнения здесь же показаны вертикальные неровности (светлая толстая линия) реального участка пути, спектральная плотность которых близка к упомянутой огибающей.

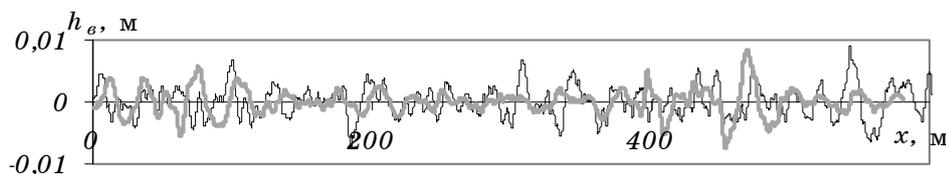


Рис. 2

Как видно из этого рисунка, амплитуды смоделированного процесса в основном несколько выше амплитуд неровностей реального участка, но наибольшие значения ординат обоих процессов близки между собой. Что касается фаз гармонических компонент смоделированного и реального процессов, то они заметно различаются. Влиянием указанных фаз обусловлен и возможный существенный разброс выборочных характеристик выходных процессов, соответствующих отдельным реализациям входного возмущения с одинаковыми спектральными плотностями [3]. Поэтому данный фактор необходимо обязательно учитывать при построении расчетных возмущений.

При выполнении исследований, описанных в данной работе, процедура генерирования случайных процессов с помощью разложения Райса–Пирсона (2) была организована таким образом, что реализации, имеющие одинаковый порядковый номер в ансамбле, сформированы с использованием одинаковой комбинации случайных фаз φ_k . Поэтому далее понятия «одинаковый порядковый номер в ансамбле реализаций» и «одинаковая комбинация фаз» будем считать эквивалентными.

Количество формируемых реализаций составляющих возмущения для каждого выражения спектральной плотности ограничим десятью, считая, что этого достаточно для выбора из них тех, которые могут быть использованы при построении расчетного возмущения, позволяющего получить оценки динамических характеристик экипажа, близкие к экспериментальным данным.

Расчетное входное возмущение рассматриваем в виде таких четырех составляющих: вертикальных симметричной и кососимметричной относительно оси пути, а также двух горизонтальных поперечных, различных по двум рельсовым нитям. Значения вертикальных составляющих сгенерируем следующим образом. По оценкам спектральных плотностей неровностей пути с отступлениями от норм заданной степени, описанным аналитическим выражением (1) с коэффициентами из таблицы, при помощи алгоритма Райса–Пирсона сформируем ансамбли реализаций неровностей. При этом исходные неровности правой и левой рельсовых нитей могут иметь различные наибольшие на участке степени отступлений от норм. Если считать, что реализация $h_i(x)$ соответствует неровностям правой рельсовой нити, а $h_j(x)$ – левой, то значения симметричной $h_C(x)$ и кососимметричной $h_K(x)$ составляющих в каждой точке пути определяются так:

$$h_C(x) = \frac{h_i(x) + h_K(x)}{2}, \quad h_K(x) = \frac{h_i(x) - h_K(x)}{2}. \quad (3)$$

В случае, когда вертикальные неровности правой и левой рельсовых нитей формируются по выражениям спектральных плотностей неровностей одинаковой степени отступлений от норм, должно выполняться условие $i \neq K$: в противном случае было бы $h_K(x) \equiv 0$, что противоречит данным,

полученным по записям показаний путеизмерителя на реальных участках пути. Если же теоретические неровности пути строятся для случая разных степеней отступлений по правой и левой рельсовым нитям, т. е. по формулам (1) с различными коэффициентами, то выполнение условия $i \neq K$ необходимым не является.

При формировании горизонтальных составляющих расчетного возмущения последовательность действий будет такой же, за исключением вычислений по формуле (3).

Рассмотрим ансамбли реализаций неровностей, полученные с помощью алгоритма Райса–Пирсона по аналитическим выражениям огибающих максимальных значений спектральных плотностей неровностей правой и левой рельсовых нитей в вертикальной и горизонтальной плоскостях для каждой степени отступлений. Если даже, как было отмечено выше, ограничиться десятью реализациями в ансамбле, то для формирования из них приемлемого расчетного возмущения необходимо проанализировать результаты расчетов нескольких сотен тысяч вариантов (расчеты при возмущениях, сформированных из реализаций с различными порядковыми номерами (т.е. с различной комбинацией фаз в смоделированных процессах) и степенями отступлений от норм в вертикальном и в горизонтальном направлениях, и расчеты для различных скоростей движения порожнего и груженого вагонов). Среди этих вариантов наверняка найдется такое сочетание реализаций, при котором сформированное расчетное возмущение будет удовлетворять основному предъявляемому к нему требованию: близости результатов расчетов, полученных с использованием данного возмущения, к экспериментальным данным. Однако перебор всех возможных вариантов даже при наличии высокопроизводительной вычислительной техники представляет собой весьма трудоемкую задачу. Существенно сузить область поиска решения поставленной задачи можно с помощью предлагаемого далее подхода.

Возьмем за основу один из реальных участков пути, качественное состояние которого соответствует оценке «хорошо». На выбранном участке вертикальные неровности имеют единичное отступление IV степени на одной рельсовой нити и отступления не выше II степени на другой, горизонтальные – не выше II степени на обеих рельсовых нитях. Однако сравнение реализаций горизонтальных неровностей, сгенерированных при помощи алгоритма Райса–Пирсона, с горизонтальными неровностями рельсовых нитей выбранного участка показало, что по уровню к ним ближе реализации, полученные по выражениям спектральных плотностей неровностей с отступлениями от норм не выше I степени. Именно такие реализации и будем использовать при формировании горизонтальных составляющих возмущения. Вклад горизонтальных неровностей в общую балльность выбранного участка существенно меньше, чем вертикальных, поэтому при незначительном уменьшении их уровня качественная оценка участка пути практически не изменится. Для вертикальных составляющих возьмем такие же наибольшие степени отступлений, как и на выбранном реальном участке пути, а именно: IV на одной рельсовой нити и II на другой.

Анализ записей вагона-путеизмерителя выявил практически синхронный характер изменения вертикальных и горизонтальных неровностей правой и левой рельсовых нитей на исследуемых участках пути. Этот факт в отношении просадок подтверждается и данными статьи [4]. Поэтому при выборе реализаций сгенерированных неровностей для формирования составляющих

расчетного возмущения целесообразно ограничиться рассмотрением только тех из них, которые имеют одинаковую или достаточно близкие комбинации фаз гармонических компонент.

Для предварительного отбора приемлемых реализаций неровностей проведены расчеты по определению показателей динамических качеств полувагона при одной скорости движения, близкой к средней из диапазона скоростей в принятых для сравнения экспериментах: при нулевых горизонтальных составляющих выбраны вертикальные составляющие, а затем для них – горизонтальные. Для удовлетворительного согласования с результатами эксперимента всех расчетных показателей наиболее приемлемыми оказались расчетные возмущения $W4^*$, построенные с использованием 4-ой реализации вертикальных неровностей, сформированных по формулам (3) для наибольших отступлений от норм IV степени на одной рельсовой нити и II – на другой: с горизонтальными составляющими с одинаковой комбинацией фаз – возмущения $W49$ (с 9-ой реализацией горизонтальных неровностей) и $W43$ (с 3-ей реализацией); с горизонтальными составляющими с близкими комбинациями фаз – $W467$ (с 6-ой реализацией на одной рельсовой нити и 7-ой – на другой).

Отобранные таким образом возмущения использованы при динамических расчетах полувагонов в широком диапазоне скоростей движения. На рис. 3, 4 показаны зависимости от скорости (сплошные линии с маркерами) полученных при этом таких показателей динамических качеств порожнего (рис. 3) и груженого (рис. 4) полувагонов: вертикальных ускорений пятников кузова \ddot{z}_D , коэффициентов вертикальной динамики кузова K_{DK} , горизонтальных поперечных ускорений пятников кузова \ddot{y}_D и рамных сил H_p в долях осевой нагрузки P_0 . Светлыми горизонтальными линиями нанесены предельные значения показателей для «допустимого» хода вагона.

Для сравнения с расчетными значениями использованы экспериментальные данные (пунктирные линии на рисунках), которые включают в себя результаты испытаний на опытном полигоне Белореченская–Майкоп (Россия), испытаний УкрНИИВ (Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения, г. Кременчуг) и ДНУЖТ (Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта, г. Днепропетровск) на различных участках железных дорог Украины. Разброс их по уровням примерно соответствует минимальным и максимальным значениям анализируемых показателей для типовых полувагонов с неизношенными стандартными колесами.

Как видно из рисунков, во всем диапазоне скоростей движения расчетные значения показателей в основном попадают в полосу экспериментальных данных. Следует отметить, что при возмущении $W467$ (маркеры ▲), горизонтальные составляющие которого имеют разные, но достаточно близкие комбинации фаз (что не противоречит данным о реальном пути), результаты оказались в целом даже несколько лучше, чем, например, при возмущениях $W49$ (маркеры ◆) или $W43$ (маркеры ■), горизонтальные составляющие которых имеют одинаковую комбинацию фаз. Однако подобрать реализации неровно-

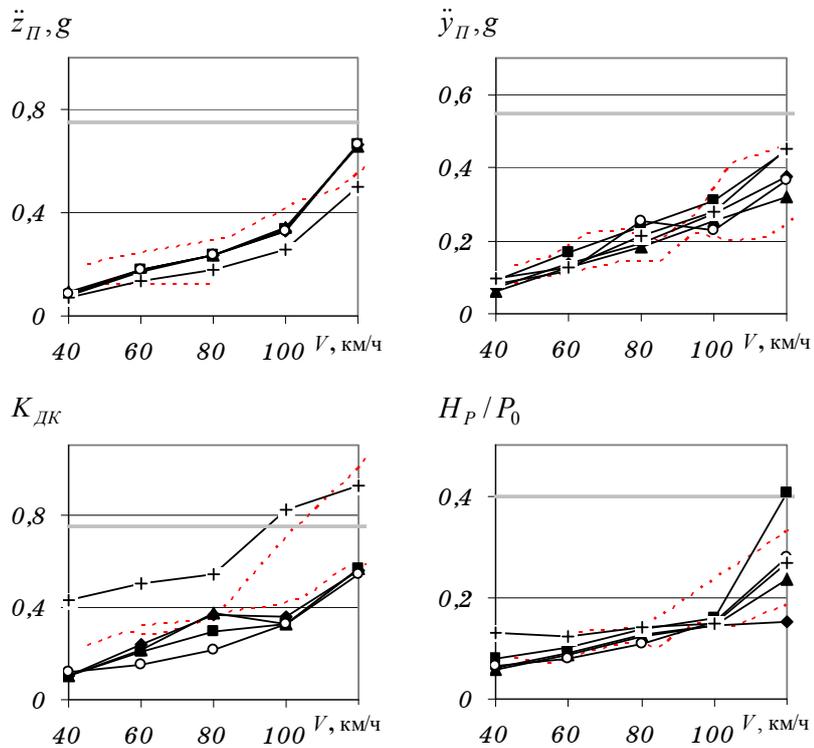


Рис. 3

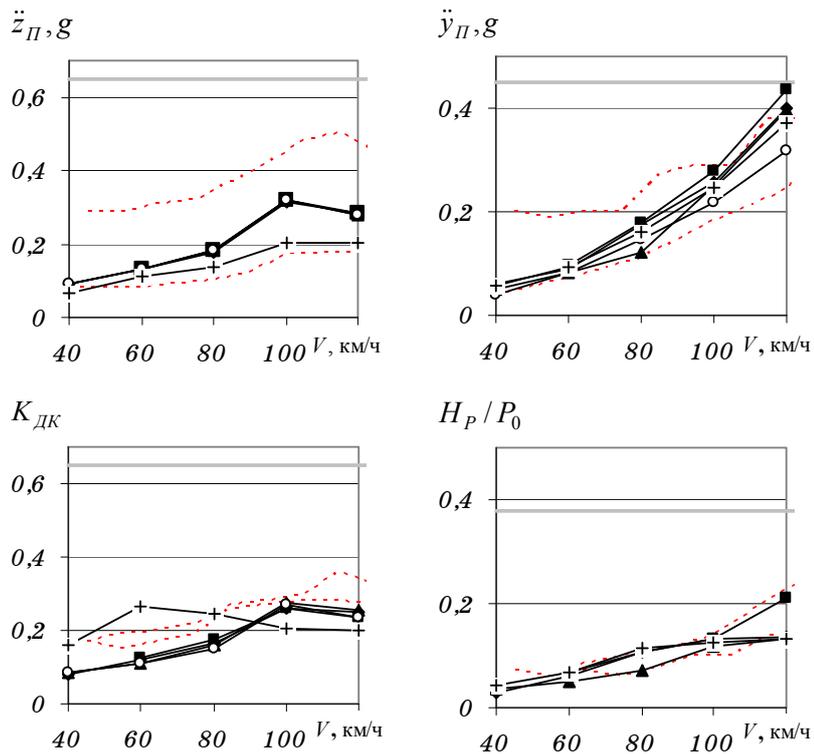


Рис. 4

стей с одинаковой комбинацией фаз гораздо проще, поэтому на практике все же целесообразно строить возмущения из реализаций горизонтальных неровностей с одинаковыми порядковыми номерами в ансамбле.

Кроме того, на рисунках показаны результаты расчетов, полученные при задании двух других возмущений: вертикальные составляющие одного из них отличаются комбинациями фаз смоделированных процессов, а горизонтальные имеют близкие комбинации (маркеры +); вертикальные составляющие второго имеют одинаковую комбинацию фаз, а горизонтальные – существенно различные (маркеры O). Сопоставление динамических показателей полувагонов, полученных при задании таких возмущений, с соответствующими экспериментальными данными показало их заметное различие в отдельных случаях. Так, использование в качестве вертикальных составляющих входного возмущения сочетаний реализаций, отличающихся фазами, привело к несколько заниженным значениям вертикальных ускорений пятников кузова и завышенным значениям коэффициентов вертикальной динамики кузова полувагона, поскольку в этом случае уровень кососимметричной вертикальной составляющей возмущения $\eta_{КС}$ оказался значительно выше, чем на реальных участках пути хорошего состояния. Использование в качестве горизонтальных составляющих входного возмущения сочетаний реализаций с существенно различной комбинацией фаз позволило получить вполне приемлемые значения показателей в горизонтальной плоскости, однако привело к заниженным значениям коэффициентов вертикальной динамики кузова порожнего полувагона. Поэтому подобные возмущения нецелесообразно применять для динамических расчетов вагонов.

Выводы. Предложен подход, позволяющий на основе анализа информации об отступлениях от норм содержания рельсовой колеи неровностей реальных участков пути, спектрального состава этих неровностей и предварительных расчетов при одной скорости движения построить расчетные входные возмущения, приемлемые для практического применения при исследованиях динамики железнодорожных экипажей. Такие возмущения могут быть сформированы из определенного сочетания реализаций случайных процессов, сгенерированных с применением разложения Райса–Пирсона по огибающим максимальных значений спектральных плотностей соответствующих неровностей, полученных в результате обработки записей показаний вагона-путеизмерителя. Вертикальные составляющие возмущения по двум рельсовым нитям не должны отличаться комбинациями случайных фаз гармонических компонент, и при их формировании следует использовать аналитические выражения спектральных плотностей неровностей с различными наибольшими на участке степенями отступлений от норм содержания рельсовой колеи. Горизонтальные составляющие возмущения формируются с использованием выражений спектральных плотностей неровностей с одинаковой степенью отступлений; при этом они могут незначительно различаться комбинациями фаз. Окончательный вывод о приемлемости построенных возмущений делается по результатам расчетов порожних и груженых вагонов в широком диапазоне скоростей движения.

При использовании записей вагона-путеизмерителя рассмотренного участка достаточно хорошее совпадение результатов расчетов со средними значениями динамических показателей, полученными в эксперименте на пути хорошего состояния, имеет место в случае, когда расчетное возмущение

сформировано из реализаций неровностей в вертикальной плоскости, сгенерированных с использованием аналитических выражений спектральных плотностей неровностей с единичным отступлением от норм содержания рельсовой колеи IV степени по одной рельсовой нити и с отступлениями не выше II степени по другой, и реализаций горизонтальных неровностей, имеющих отступления не выше I степени по обеим рельсовым нитям.

1. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колісвимірвальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. – Київ, 2005. – 48 с.
2. Коган А. Я. 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.
3. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол, Е. Ю. Трубицкая, С. Ф. Редько, А. И. Залесский. – Киев : Наук. думка, 1989. – 312 с.
4. Боронахин А. М. К вопросу о синтезе путеизмерительных комплексов нового поколения / А. М. Боронахин, В. И. Гупалов, Н. С. Филипеня // Железные дороги мира. – 2004. – № 8. – С. 68 – 74.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 04.02.10,
в окончательном варианте 04.02.10