УДК 519.2:629.2

Л. Г. ЛАПИНА

АНАЛИЗ РАСЧЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Целью работы является выбор составляющих расчетных возмущений, приемлемых для выполнения расчетов по прогнозированию динамических качеств грузовых вагонов в горизонтальной плоскости. Исследования проведены с помощью математического моделирования динамики вагона с учетом неровностей рельсового пути на примере порожнего и груженого полувагонов.

Рассмотрены две группы расчетных возмущений. В первую из них входят неровности реальных участков железнодорожного пути, полученные путем обработки записей показаний вагона-путеизмерителя. Во вторую группу входят модели составляющих возмущений: полигармоническая модель с параметрами, определенными по результатам анализа неровностей на участках магистрального пути Приднепровской железной дороги, и модель, сформированная с помощью формул и таблиц из Руководящего документа РД 32.68-96. Проанализированы уровни составляющих указанных возмущений и выполнены расчеты по определению нормируемых показателей горизонтальной динамики полувагонов в широком диапазоне скоростей движения. По результатам сравнения полученных оценок показателей с соответствующими экспериментальными данными сделаны выводы о приемлемости использования рассмотренных возмущений для проведения прогнозных расчетов.

Метою роботи є вибір складових розрахункових збурень, прийнятних для виконання розрахунків з прогнозування динамічних якостей вантажних вагонів в горизонтальній площині. Дослідження проведено за допомогою математичного моделювання динаміки вагона з урахуванням нерівностей рейкової колії на прикладі порожнього і навантаженого піввагонів.

Розглянуто дві групи розрахункових збурень. До першої з них входять нерівності реальних ділянок залізничної колії, отримані шляхом обробки записів показань вагона-колієвимірювача. До другої групи входять моделі складових збурень: полігармонічна модель з параметрами, які визначені за результатами аналізу нерівностей на ділянках магістральної колії Придніпровської залізниці, і модель, що сформована за допомогою формул і таблиць з Керівного документа РД 32.68-96. Проаналізовано рівень складових зазначених збурень і виконано розрахунки з визначення нормованих показників горизонтальної динаміки піввагонів в широкому діапазоні швидкостей руху. За результатами порівняння отриманих оцінок показників з відповідними експериментальними даними зроблено висновки щодо прийнятності використання розглянутих збурень для проведення прогнозних розрахунків.

The study purpose is to choose the components of the calculated disturbances for predicting the dynamic qualities of the freight cars in a horizontal plane. The studies are carried out using mathematical modeling the car dynamics with provision for irregularities of the rail track illustrated by the example of empty and loaded open wagons.

The two groups of the calculated disturbances are examined. The first group includes irregularities of real sections of the railway track measured by processing the records of the track-testing car. The second group includes the models of the disturbances components: the polyharmonic model with the parameters based on the analysis of irregularities on sections of the main road of the Pridneprovsk Railway, and the model based on the formula and tables presented in the Guideline Document PD 32.68-96. Levels of components of the disturbances presented are analyzed, and the normalized factors of the horizontal dynamics of the open wagons in a wide range of the running speeds are determined using computations. From the results of a comparison of the estimations obtained with the corresponding experimental data, we can make the inference that disturbances under consideration are acceptable for the predicted computations.

Ключевые слова: *грузовые вагоны, расчетные возмущения, показатели динамических качеств.*

Оценка показателей динамических качеств железнодорожных экипажей во временно́й области традиционно выполняется методом математического моделирования процессов, происходящих в системе «экипаж–путь» [1]. Для получения достоверных прогнозных оценок динамического поведения экипажа наряду с обоснованным выбором расчетной схемы и учетом основных характеристик системы необходимым условием является корректное задание входных возмущений, действующих со стороны пути. Нормативная база, регламентирующая такие возмущения, на сегодняшний день в Украине отсутствует. Исследователи применяют различные подходы к формированию

входных возмущений, в частности используют неровности реальных участков железнодорожного пути (которые представляют собой реализации широкополосных случайных процессов) либо создают математические модели неровностей. Но какой бы подход ни применялся, критерием приемлемости задаваемых возмущений должна быть близость оценок показателей, определённых при расчетах, и соответствующих экспериментальных данных.

Понятие «возмущение» включает в себя совокупность составляющих, характеризующих неровности железнодорожного пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При проведении расчетов вертикальные и горизонтальные составляющие принято считать независимыми. Вопросы приемлемости для прогнозных расчетов вертикальных составляющих возмущений, сформированных несколькими различными способами, рассмотрены в статье [2]. Результаты аналогичных исследований горизонтальных составляющих приведены в данной работе.

Для составляющих расчетного возмущения в горизонтальной плоскости обычно используется одна из двух комбинаций неровностей, поступающих на колеса рельсового экипажа и вызывающих его колебания [1]:

– горизонтальные отклонения рельса под правым и левым колесами $\eta_{\text{п}}^{\text{г}}$ и $\eta_{\text{л}}^{\text{г}}$;

– горизонтальные неровности $\eta_{\text{о}}^{\text{г}}$, приведенные к оси пути (или неровности пути в плане), и изменения полуширины колеи $\eta_{\text{ш}}^{\text{г}}$, которые вычисляются как

$$\eta_{\text{о}}^{\text{г}} = \left(\eta_{\text{п}}^{\text{г}} + \eta_{\text{л}}^{\text{г}}\right)/2, \quad \eta_{\text{ш}}^{\text{г}} = \left(\eta_{\text{п}}^{\text{г}} - \eta_{\text{л}}^{\text{г}}\right)/2. \qquad (1)$$

Выбор той или иной комбинации определяется особенностями используемых расчетных схем и математических моделей, а также требованиями программного продукта, реализующего их.

Описание горизонтальных составляющих расчетных возмущений

Неровности реальных участков рельсового пути. В качестве исходного материала для формирования неровностей реальных участков пути возьмем записи показаний вагона-путеизмерителя ЦНИИ-2, зарегистрированные при плановой проверке состояния магистрального пути на участке Пятихатки – Чаплино Приднепровской железной дороги. Как известно [3], записанное путеизмерителем положение рельсовых нитей по направлению в плане по форме и величине отличается от фактического геометрического положения рельсовых нитей в силу особенностей применяемой двухточечной схемы измерений. Чтобы перейти от записей путеизмерителя к фактическим неровностям рельсовых нитей в горизонтальной плоскости под движущимся путеизмерителем, указанные записи должны быть преобразованы с учетом передаточной функции измерительной системы [4].

Рассмотрим горизонтальные составляющие возмущений, сформированные в виде отклонений рельса под правым и левым колесами, для двух участков пути. Первый из этих участков на обеих рельсовых нитях имеет неровности в плане с отступлениями от норм содержания рельсовой колеи не выше I степени и, следовательно, сумму баллов за такие неровности, равную 0 [3]. Качественная оценка состояния пути на данном участке – «отлично». На втором участке горизонтальные неровности имеют более высокий уровень: присутствуют отступления от норм I и II степени, сумма баллов за которые равна

28 (в пересчете на 1 км пути), качественная оценка состояния пути – «хорошо». Ограничения скорости движения на обоих выбранных участках не требуется [3].

Горизонтальные составляющие возмущений, соответствующих двум описанным участкам, обозначим $H_1^{г} = \left(\eta_{п1}^{г}(x), \eta_{л1}^{г}(x)\right)$ и $H_2^{г} = \left(\eta_{п2}^{г}(x), \eta_{л2}^{г}(x)\right)$, где пространственная координата x определяет положение вдоль оси пути.

Полигармоническая модель. В статье [5] предложено при проведении прогнозных расчетов по определению показателей динамических качеств вагонов использовать достаточно простую модель входного возмущения, горизонтальные составляющие которого формируются в виде линейной комбинации гармонических компонент

$$B(x) = \sum_{j=1}^{N} b_j \cdot \sin\left(2\pi \cdot x / L_j\right), \qquad (2)$$

где b_j и L_j, $j = \overline{1,N}$ – соответственно амплитуда и длина волны гармонической компоненты; N – количество гармонических компонент в модели.

Для построения модели горизонтальных составляющих возмущения использован второй вариант комбинации неровностей, а именно задание неровностей, приведенных к оси пути, и изменения полуширины колеи. Такой вариант при моделировании является предпочтительным, поскольку позволяет сформировать различные неровности на правой и левой рельсовых нитях, что соответствует реальному положению вещей и дает возможность адекватно оценить параметры взаимодействия экипажа и пути, особенно при скоростях движения, близких к критической.

Значения параметров выражения (2) определяются по результатам амплитудно-частотного анализа обработанных записей показаний вагона-путеизмерителя, зарегистрированных на участках магистрального пути хорошего и отличного состояния. В работе [5] показано, что значение N можно принять равным 9, а значения L_j и b_j ($j = \overline{1,9}$) – такими, как приведено в табл. 1.

Таблица 1

Номер гармонической компоненты j	Значения длин неровностей и амплитуд гармонических составляющих			
	для неровностей, приведенных к оси пути		для изменения полуширины колеи	
	$L_{оj}$, м	$b_{оj}$, мм	$L_{шj}$, м	$b_{шj}$, мм
1	41,0	5,6	41,0	1,3
2	27,0	2,0	27,0	0,5
3	22,0	2,0	21,0	0,5
4	18,0	2,0	18,0	0,5
5	15,0	0,8	15,0	0,5
6	13,0	0,8	12,0	0,5
7	10,0	0,8	9,0	0,5
8	8,0	0,8	7,5	0,5
9	6,0	0,8	6,0	0,5

Возмущение, горизонтальные составляющие $B_{\text{о}}(x)$ и $B_{\text{ш}}(x)$ которого формируются по формуле (2) с параметрами из табл. 1, обозначим $B_{\text{ош}} = \left(B_{\text{о}}(x), B_{\text{ш}}(x)\right)$.

При необходимости задания в расчетах неровностей на правой и левой рельсовых нитях возмущение $B_{\text{ош}}$ может быть преобразовано в возмущение $B_{\text{пл}} = \left(B_{\text{п}}(x), B_{\text{л}}(x)\right)$, составляющие которого с учетом формулы (1) вычисляются так:

$$B_{\text{п}}(x) = B_{\text{о}}(x) + B_{\text{ш}}(x), \qquad B_{\text{л}}(x) = B_{\text{о}}(x) - B_{\text{ш}}(x). \qquad (3)$$

Возмущения в руководящем документе РД 32.68-96. Многие исследователи при решении задач динамики рельсовых экипажей для колеи 1520 мм формируют возмущения с использованием материалов, содержащихся в руководящем документе (РД) РД 32.68-96 [6]. Этот документ разработан и введен в действие Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ОАО «ВНИИЖТ», г. Москва). В нем устанавливаются способы представления случайных возмущений от неровностей железнодорожного пути, которые могут использоваться при исследованиях вагонных конструкций методами математического моделирования и при проектировании вагонов.

Согласно РД, при моделировании процессов, происходящих в системе «экипаж–путь», для существующего пути расчетные возмущения во временно́й области предлагается представлять в виде детерминированных функций периодических или одиночных неровностей. В случаях, когда используемая математическая модель предусматривает задание возмущения, поступающего на первую по ходу движения колесную пару, и учет запаздывания его поступления на остальные колесные пары, составляющие возмущения как функции длины пути x могут быть представлены в виде

$$\eta_j(x) = \frac{h_{0j}}{2}\left(1 - \cos\frac{2\pi}{L}x\right), \qquad (4)$$

где $j = 1, 2$ – стороны тележки; h_{0j} – максимальное значение неровности; L – длина неровности.

Ориентировочные значения максимальной величины горизонтальных неровностей пути $h_0^{\text{г}}$ различной длины для моделирования динамических процессов в системе «вагон–путь» при скоростях движения грузовых поездов до 120 км/ч, рекомендованные [6], приведены в табл. 2.

В тексте РД отсутствуют рекомендации относительно того, какие именно значения длины L «менее 10» и «более 20» необходимо использовать для формирования возмущений. Поэтому рассмотрим следующие: «менее 10» – это 5 м, «более 20» – 30 м.

Таблица 2

Длина неровности L, м	Максимальные значения неровности $h_0^{\text{г}}$, мм
менее 10	18
10	20
20	22
более 20	25

Горизонтальные составляющие возмущений, сформированные по формуле (4) с параметрами из табл. 2, будем обозначать $R_{L_i,L_j} = \left(R_{L_i}(x), R_{L_j}(x)\right)$, $i = \overline{1,4}$, $j = \overline{1,4}$. Например, запись $R_{30,30} = \left(R_{30}(x), R_{30}(x)\right)$ означает, что горизонтальные составляющие расчетного возмущения одинаковы по обеим рельсовым нитям и представляют собой неровности длиной 30 м с соответствующим значением амплитуды, равным 25 мм.

Помимо описания модели возмущений, в РД отмечено, что при исследовании колебаний экипажей может быть использована реальная неровность железнодорожного пути, замеренная путеизмерителем, с учетом передаточных функций измерительного механизма. Числовой материал для такого способа задания возмущений (банк данных) в виде файлов с массивами символьных данных находится во ВНИИЖТе. Однако оценка приемлемости таких возмущений для расчетов по прогнозированию динамических качеств грузовых вагонов является практически невыполнимой, поскольку указанные реальные неровности пути не находятся в свободном доступе.

Сравнение горизонтальных составляющих возмущений. Графически фрагменты составляющих анализируемых возмущений представлены на рис. 1. В качестве примеров здесь приведены неровности, поступающие на один рельс: составляющие $\eta^{\text{г}}_{\text{п}1}(x)$ и $\eta^{\text{г}}_{\text{п}2}(x)$ возмущений $\text{Н}^{\text{г}}_1$ и $\text{Н}^{\text{г}}_2$, составляющая $B_{\text{п}}(x)$ полигармонической модели $B_{\text{пл}}$ и составляющие $R_{10}(x)$ и $R_{30}(x)$ модели, построенной по рекомендациям РД. Процессы $R_{10}(x)$ и $R_{30}(x)$ были центрированы для удобства их сравнения с другими составляющими.

Такие статистические характеристики анализируемых процессов, как размах (т. е. разность между максимальным и минимальным значениями) и среднеквадратическое отклонение (СКО), которые позволяют оценить уровень неровностей, приведены в табл. 3.

Как видно из графиков на рис. 1 и данных табл. 3, значения размаха и СКО составляющих возмущений $\text{Н}^{\text{г}}_2$, $B_{\text{пл}}$ и R_{L_i,L_j} достаточно близки между собой, а возмущения $\text{Н}^{\text{г}}_1$ – отличаются от них в меньшую сторону. Однако на основании этих данных нельзя спрогнозировать, насколько будут различаться между собой результаты расчетов с использованием рассматриваемых составляющих, поскольку их частотный состав различен.

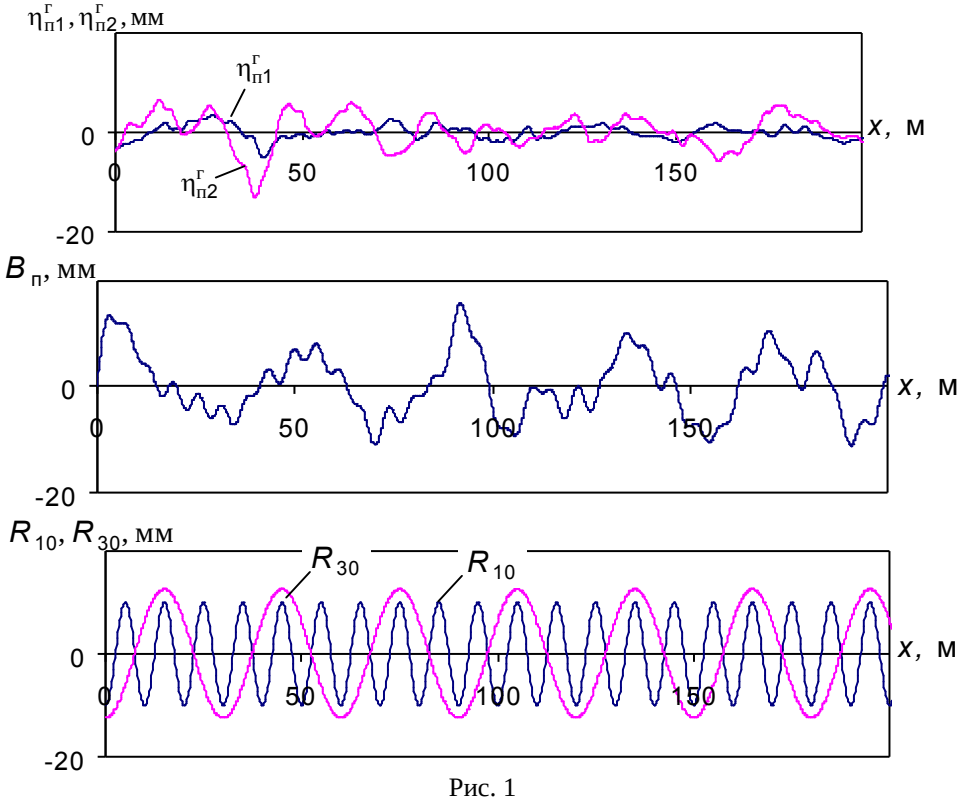

Рис. 1

Таблица 3

Наименование возмущения	Наименование составляющей	Значение размаха, мм	Значение СКО, мм
$H^{г}_{1}$	$\eta^{г}_{п1}$	8,4	1,4
	$\eta^{г}_{л1}$	6,1	1,1
$H^{г}_{2}$	$\eta^{г}_{п2}$	20,2	3,2
	$\eta^{г}_{л2}$	19,5	4,3
$B_{пл}$	$B_{п}$	30,7	6,0
	$B_{л}$	22,1	3,9
R_{L_i,L_j}	R_5	18,0	6,4
	R_{10}	20,0	7,1
	R_{20}	22,0	7,8
	R_{30}	25,0	8,8

Результаты расчетов. С использованием возмущений $H^{г}_{1}$, $H^{г}_{2}$, $B_{пл}$ и R_{L_i,L_j} ($i=\overline{1,4}$, $j=\overline{1,4}$) были проведены расчеты по определению максимальных значений показателей динамических качеств грузового полувагона.

Выполнен анализ максимальных значений таких нормируемых показателей динамических качеств полувагона в горизонтальной плоскости, как горизонтальные поперечные ускорения пятников кузова $\ddot{y}_П$ в долях ускорения свободного падения g и рамные силы $H_Р$ в долях осевой нагрузки P_0 при движении с постоянной скоростью V по прямым участкам пути. Проведено сравнение результатов численного определения показателей с экспериментальными данными, собранными на железных дорогах Украины и России [7, 8].

Зависимости максимальных значений ускорений $\ddot{y}_П$ и рамных сил $H_Р / P_0$ от скорости движения полувагона V при задании различных возмущений приведены на рис. 2 (порожний режим) и рис. 3 (груженый). На этих рисунках сплошными линиями без маркеров показаны границы областей экспериментальных данных, пунктирными линиями – значения показателей для «допустимого» хода вагона. Линии с маркерами ◇ иллюстрируют результаты расчетов, полученные при задании возмущения $\text{Н}_1^{\text{г}}$, ◆ – возмущения $\text{Н}_2^{\text{г}}$, ● – возмущения $B_{\text{пл}}$, △ – возмущения $R_{20,20}$, □ – возмущения $R_{30,30}$.

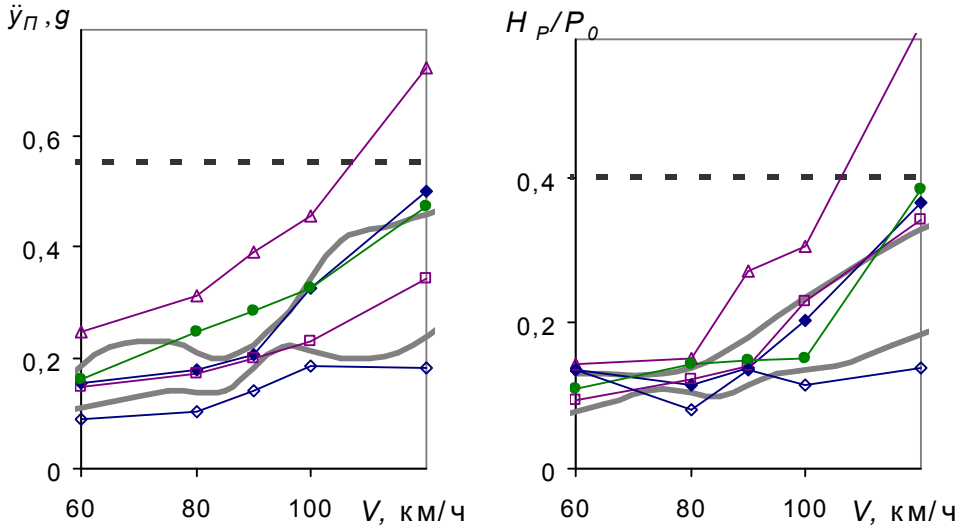

Рис. 2

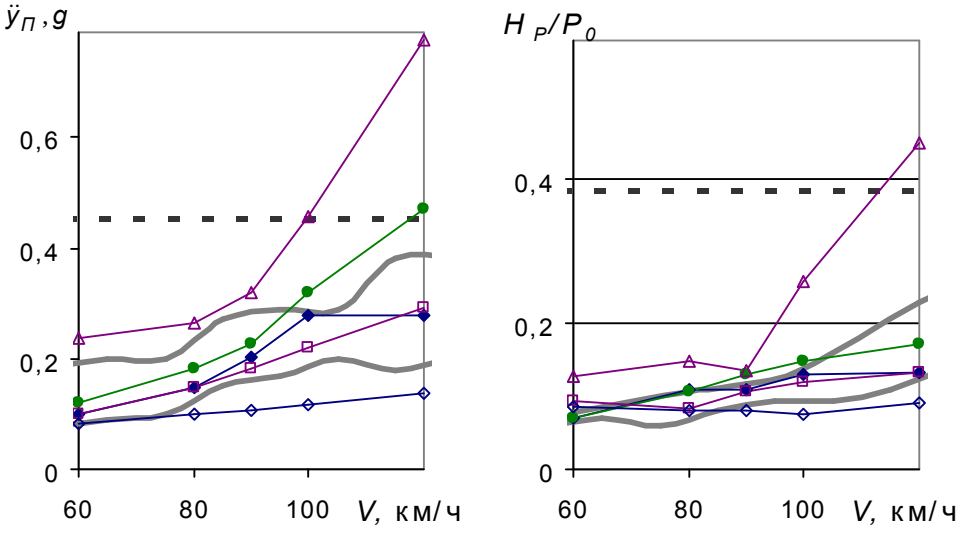

Рис. 3

Как видно из рис. 2 и 3, оценки показателей горизонтальной динамики, полученные в расчетах при задании возмущения $Н_1^г$ (неровностей реального участка пути с низким их уровнем), в большинстве из рассмотренных случаев лежат ниже нижней границы области экспериментальных данных. Задание возмущения $Н_2^г$ (неровностей реального участка с достаточно высоким их уровнем) позволяет получить в расчетах значения $\ddot{y}_П$ и H_P / P_0, лежащие в областях соответствующих экспериментальных данных либо незначительно выходящие за их верхнюю границу. Это говорит о том, что данное возмущение является вполне приемлемым для проведения численных расчетов по определению максимальных значений показателей динамических качеств вагонов в горизонтальной плоскости.

Также приемлемым для прогнозирования динамических качеств полувагона в горизонтальной плоскости является возмущение $B_{пл}$ (полигармоническая модель). Несмотря на то, что данная модель, как и все модели, не в полной мере соответствует реальным неровностям пути (в частности, её составляющие представляют собой не широкополосные случайные, а детерминированные процессы), её использование позволяет получить оценки показателей динамики, лежащие в области соответствующих экспериментальных данных либо незначительно выходящие за её верхнюю границу как в порожнем, так и в груженом режимах движения.

Результаты расчетов, полученные при задании возмущений $R_{5,5}$ и $R_{10,10}$, а также возмущения $R_{20,30}$, показали, что в порожнем режиме при высоких скоростях движения (например, в случае возмущения $R_{10,10}$ – при $V > 80$ км/ч) в системе «экипаж – путь» происходит рост сил взаимодействия, который приводит к всползанию колеса на рельс и невозможности дальнейшего движения вагона. Учитывая это обстоятельство, следует признать, что модели составляющих горизонтальных возмущений с одинаковыми неровностями на обеих рельсовых нитях длиной 5 и 10 м, а также с неровностями длиной 20 м на одной рельсовой нити и 30 м на другой являются неприемле-

мыми для расчетов по определению максимальных значений показателей динамических качеств вагонов в широком диапазоне скоростей движения.

Из рис. 2 и 3 также видно, что при задании возмущения $R_{30,30}$ (т. е. с неровностями на обеих рельсовых нитях длиной 30 м) результаты численного определения показателей горизонтальной динамики полувагона принадлежат области экспериментальных данных при всех рассмотренных скоростях движения. Значения $\ddot{y}_{П}$ и H_P / P_0, полученные при задании возмущения $R_{20,20}$ (с неровностями на обеих рельсовых нитях длиной 20 м), на графиках лежат выше верхней границы области экспериментальных данных практически во всех случаях, а при высоких скоростях движения даже существенно превышают значения для «допустимого» хода вагона.

Таким образом, приемлемые (с точки зрения близости полученных результатов расчетов к экспериментальным данным) оценки максимальных значений показателей динамических качеств полувагона в горизонтальной плоскости могут быть получены только при задании в модели возмущений, рекомендованной РД, параметров, соответствующих неровностям длиной более 20 м. В противном случае адекватно оценить нормируемые показатели горизонтальной динамики полувагона не удается.

Выводы. Обработанные записи показаний вагона-путеизмерителя целесообразно использовать в качестве горизонтальных составляющих входных возмущений при проведении расчетов по прогнозированию динамических качеств полувагонов в том случае, когда эти записи получены на участках пути с уровнем неровностей достаточно высоким, но не требующим ограничений скорости движения.

Приемлемой (с точки зрения близости полученных значений и экспериментальных данных) для проведения расчетов по определению максимальных значений показателей динамических качеств полувагонов является полигармоническая модель горизонтальных составляющих входного возмущения с параметрами, полученными по результатам амплитудно-частотного анализа реальных неровностей пути.

Рекомендации документа РД 32.68-96 позволяют сформировать горизонтальные составляющие возмущения, приемлемые (с точки зрения близости полученных результатов расчетов к экспериментальным данным) для численного определения максимальных значений показателей динамических качеств полувагона в горизонтальной плоскости, только в случае использования в модели параметров неровностей длиной более 20 м. Использование моделей, которые включают в себя более короткие неровности, не позволяет адекватно оценить нормируемые показатели горизонтальной динамики полувагона и поэтому не может быть рекомендовано для расчетов.

1. Математическое моделирование колебаний рельсовых транспортных средств / *В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, В. С. Иккол и др.* / под ред. *В. Ф. Ушкалова*. – Киев : Наукова думка, 1989. – 240 с.
2. *Лапина Л. Г.* Анализ вертикальных составляющих возмущений, традиционно применяемых при прогнозировании динамических качеств грузовых вагонов / *Л. Г. Лапина* // Техническая механика. – 2015. – № 2. – С. 90 – 99.
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-0267 : Затв. наказом Укрзалізниці № 033-Ц від 01.02.2012 р. / М-во інфраструктури України, Держадміністрація залізничного транспорту України, Укрзалізниця, Головне управління колійного господарства ; Розроб. *Рибкін В. В., Патласов О. М.* – К. : Поліграфсервіс, 2012. – 46 с.
4. *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.
5. *Лапина Л. Г.* Построение полигармонической модели горизонтальных составляющих входных возмущений для исследования динамики грузовых вагонов / *Л. Г. Лапина* // Техническая механика. – 2016. – № 2. – С. 106 – 112.
6. РД 32.68 96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. – М. : ВНИИЖТ, 1996. – 17 с.
7. *Донченко А. В.* Оптимальна динаміка вантажних вагонів / *А. В. Донченко, В. В. Ільчишин* // Залізничний транспорт України. – 2007. – № 1. – С. 67 – 70.
8. *Ромен Ю. С.* Динамические качества грузовых вагонов на тележках с осевыми нагрузками до 25 тс / *Ю. С. Ромен, А. В. Заверталюк, А. В. Коваленко* // Вестник ВНИИЖТ. – 2006. – № 1. – С. 21 – 26.

Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины,
Днепр

Получено 14.07.2016,
в окончательном варианте 03.10.2016