

АНАЛИЗ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ, ТРАДИЦИОННО ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ КАЧЕСТВ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Целью работы является оценка приемлемости составляющих ряда расчетных возмущений для выполнения расчетов по прогнозированию динамических качеств грузовых вагонов в вертикальной плоскости. При проведении исследований применялись методы математического моделирования.

Рассмотрены три группы расчетных возмущений. В первую из них входит полигармоническая модель, параметры которой определены по результатам анализа неровностей на участках магистрального пути Приднепровской железной дороги. Вторая группа возмущений сформирована с помощью формул и таблиц, приведенных в Руководящем документе «Расчетные неровности железнодорожного пути...». Третья группа – это неровности, входящие в состав программного комплекса «Универсальный механизм». Проанализирован уровень составляющих указанных возмущений и выполнены расчеты по определению нормируемых показателей динамических качеств порожнего и груженого 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 оцінка прийнятності складових низки розрахункових збурень для виконання розрахунків щодо прогнозування динамічних якостей вантажних вагонів у вертикальній площині. При проведенні досліджень застосовувалися методи математичного моделювання.

Розглянуто три групи розрахункових збурень. До першої з них входить полігармонічна модель, параметри якої визначено за результатами аналізу нерівностей на ділянках магістральної колії Придніпровської залізниці. Другу групу збурень сформовано за допомогою формул і таблиць, наведених у Керівному документі «Розрахункові нерівності залізничної колії...». Третя група – це нерівності, що входять до складу програмного комплексу «Універсальний механізм». Проаналізовано рівень складових зазначених збурень та виконано розрахунки щодо визначення нормованих показників динамічних якостей порожнього і завантаженого піввагонів в широкому діапазоні швидкостей руху. За результатами порівняння отриманих оцінок показників з відповідними експериментальними даними зроблено висновки про прийнятність використання розглянутих збурень для проведення прогнозних розрахунків.

The work aim is to assess the admissibility of a number of components of the calculated perturbations to predict the dynamic qualities of the freight cars in a vertical plane. In the research methods of mathematical modelling have been employed.

Three groups of the calculated disturbances are examined. The first group deals with a polyharmonic model whose parameters are determined analyzing irregularities in the areas of the main track of the Pridneprovsk Railways. The second group of disturbances is formed by the formulas and tables from a Handbook on Calculating Irregularities of Railway Track. Irregularities of the software package "Universal Mechanism" present the third group. A level of components of those disturbances is analysed and the normalized factors of dynamic qualities of empty and loaded open wagons in a wide range of speeds are computed. Conclusions on the serviceability of disturbances considered for predictions are made comparing assessments of factors and the corresponding experimental data.

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

Расчеты показателей динамических качеств железнодорожных экипажей во временной области традиционно производятся методом математического моделирования взаимодействия в нелинейной системе «экипаж–путь». Для получения достоверных прогнозных оценок этих показателей наряду с обоснованным выбором расчетной схемы и учетом основных характеристик системы необходимым условием является корректное задание входных возмущений со стороны пути. В Украине на сегодняшний день отсутствует нормативная база для расчетных возмущений. Некоторые способы их моделирования описаны и проанализированы в работах [1, 2]. Кроме того, в ряде случаев исследователи задают входные возмущения в виде единичных неровностей, тригонометрических функций либо пользуются реализациями неровностей,

© Л. Г. Лапина, 2015

входящими в состав специализированных программных комплексов. Но какой бы подход ни применялся, критерием приемлемости используемых возмущений должна быть близость 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 этом вертикальные и горизонтальные составляющие при проведении расчетов считаются независимыми. Вертикальные составляющие возмущений могут быть представлены одной из следующих комбинаций:

- вертикальные отклонения рельсовой нити под правым и левым колесами (соответственно η_r^V и η_l^V);

- симметричные и кососимметричные вертикальные неровности пути. Симметричная составляющая возмущения η_{sym} характеризует неровности профиля пути и определяется как полусумма отклонений рельсовых нитей η_r^V и η_l^V . Кососимметричная составляющая η_{sk-sym} характеризует превышение одной рельсовой нити над другой и вычисляется как полуразность η_r^V и η_l^V .

В данной работе рассмотрены симметричные и кососимметричные вертикальные составляющие ряда возмущений, традиционно применяемых при проведении расчетов динамических качеств грузовых вагонов, и проанализированы полученные с их помощью результаты.

Описание вертикальных составляющих расчетных возмущений

Полигармоническая модель. В работах [2, 3] предложен способ построения достаточно простой модели входного возмущения, параметры которой определяются по результатам анализа и обобщения экспериментальных данных. Составляющие возмущения в такой модели формируются в виде линейной комбинации гармонических компонент:

$$B(x) = \sum_{i=1}^N b_i \cdot \sin(2\pi \cdot x / L_i), \quad (1)$$

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

Параметрами L_i и b_i такой модели являются значения основных длин и амплитуд, характерных для неровностей железнодорожного пути. При использовании в качестве исходных данных записей показаний вагона-путеизмерителя, зарегистрированных на различных участках магистрального пути Приднепровской железной дороги, определено, что для симметричной и кососимметричной вертикальных составляющих возмущения значение N можно принять равным 8, а значения b_i и L_i ($i = \overline{1, 8}$) – такими, как приведено в табл. 1.

Возмущение, вертикальные составляющие которого формируются данным способом, будем называть возмущением B , а его составляющие обозначим b_{sym} и b_{sk-sym} .

Таблица 1

Наименование составляющей	Длина неровности L_j , м	Амплитуда неровности b_j , мм
Симметричная b_{sym}	40,0	4,8
	17,0	1,5
	6,0	0,6
	5,0	0,6
	4,1	0,4
	3,3	0,4
	2,3	0,2
	1,1	0,1
Кососимметричная b_{sk-sym}	33,0	2,8
	17,0	1,2
	8,2	1,1
	6,2	1,3
	5,0	0,6
	3,7	0,3
	1,9	0,6
	1,1	0,1

Возмущения в руководящем документе ВНИИЖТ. Научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ОАО «ВНИИЖТ», г. Москва) разработан и введен в действие Руководящий документ РД 32.68 96 (РД), устанавливающий способы представления случайных возмущений от неровностей железнодорожного пути, которые могут использоваться при исследованиях вагонных конструкций [4]. Согласно этому документу, при моделировании процессов, происходящих в системе «экипаж-путь», для существующего пути расчетные возмущения во временной области предлагается представлять в виде детерминированных функций периодических или одиночных неровностей:

$$\eta_{ij}(t) = \frac{h_{0j}}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi}{L} t^* \right) \right), \quad (2)$$

где $i = 1, 2, 3, 4$ – номера колес на j -ой стороне вагона; $j = 1, 2$ – стороны тележки; t – текущее время; h_{0j} – максимальное значение неровности; L – длина неровности; $t^* = t + (l_T + l) / V$ для $i = 1$; $t^* = t + l / V$ для $i = 2$; $t^* = t + l_T / V$ для $i = 3$; $t^* = t$ для $i = 4$; $0 \leq t \leq n(l_T + l) / V$; l_T – база тележки; l – база вагона; V – скорость движения вагона; n – количество периодов неровностей.

Во многих программных комплексах, используемых для расчетов динамики железнодорожных экипажей, предусматривается задание возмущения, поступающего на первую по ходу движения колесную пару, и учитывается запаздывание его поступления на остальные колесные пары. В этом случае

составляющие возмущения как функции длины пути x могут быть представлены в виде:

$$\eta_j(x) = \frac{h_{0j}}{2}(1 - \cos \omega x), \quad (3)$$

где $\omega = 2\pi/L$ – пространственная частота.

Значения максимальной величины вертикальных неровностей пути (неровностей в продольном профиле пути $\eta_0^{\hat{a}}$ и перекосов $\eta_0^{i\hat{a}\hat{\delta}}$) различной длины для моделирования динамических процессов в системе «вагон–путь» при скоростях движения грузовых поездов до 120 км/ч, рекомендованные [4], приведены в табл. 2.

Таблица 2

Вид неровности	Значения неровности пути в мм при ее длине L , м			
	$L < 10$	$L = 10$	$L = 20$	$L > 20$
Неровность в продольном профиле $\eta_0^{\hat{a}}$	16	18	20	24
Перекос пути $\eta_0^{i\hat{a}\hat{\delta}}$	12	14	20	-

При проведении расчетов с помощью математических моделей, в которых предусмотрено задание симметричной и кососимметричной вертикальных составляющих возмущения, значения η_{sym} следует вычислять по формуле (3) при $h_{0j} = \eta_0^{\hat{a}}$ из табл. 2, а значения η_{sk-sym} – при $h_{0j} = \eta_0^{i\hat{a}\hat{\delta}}$.

Возмущения, составляющие которого вычислены по формуле (3) с параметрами из табл. 2, назовем Ru , а их симметричную и кососимметричную составляющие обозначим $ru_{sym}(L)$ и $ru_{sk-sym}(L)$, где L – значение длины неровности, используемое при формировании этой составляющей.

В тексте РД отсутствуют рекомендации относительно того, какие именно значения длины L «менее 10» и «более 20» необходимо использовать для формирования возмущений. Поэтому мы имеем полное право выбрать следующие: «менее 10» – это 5 м, «более 20» – 30 м. Кроме того, несмотря на то, что в тексте РД не указана возможность формирования полигармонической модели неровностей, построим возмущения с составляющими, которые вычисляются как сумма гармонических компонент с параметрами, указанными в табл. 2.

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. Можно предположить, что многие исследователи, которые в своих работах при описании задаваемых возмущений ссылаются на данный РД, используют именно такие возмущения. 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.

Неровности пути из программного комплекса «Универсальный механизм». В состав некоторых программных комплексов, предназначенных для моделирования динамики механических систем, включены модули возмущающих воздействий, рекомендованных для расчетов. Так, пользователю программного комплекса «Универсальный механизм» (UM) [5] наряду с возможностью самостоятельного задания неровностей путевой структуры предоставляются готовые файлы, содержащие записи неровностей рельсовых нитей. Файлы *uic-good-vert-left.way*, *uic-good-vert-right.way*, *uic-bad-vert-left.way* и *uic-bad-vert-right.way* описывают вертикальные неровности левой и правой рельсовых нитей пути условно хорошего и плохого состояния. На основе числового содержимого этих файлов могут быть сформированы симметричная и кососимметричная составляющие возмущений *Uic-good* и *Uic-bad*. Эти составляющие обозначим $Uic-good_{sym}$, $Uic-good_{sk-sym}$, $Uic-bad_{sym}$ и $Uic-bad_{sk-sym}$.

Сравнение уровня вертикальных составляющих возмущений

Графически фрагменты симметричных составляющих анализируемых возмущений представлены на рис. 1, кососимметричных – на рис. 2. Для возмущений Ru в качестве примеров приведены симметричная составляющая $ru_{sym}(10)$, сформированная по формуле (3) с данными из табл. 2 при $L = 10$, и $ru_{sym}(20 + 30)$, представляющая собой сумму гармонических компонент при $L_1 = 20$ и $L_2 = 30$, а также кососимметричная составляющая $ru_{sk-sym}(20)$, сформированная при $L = 20$.

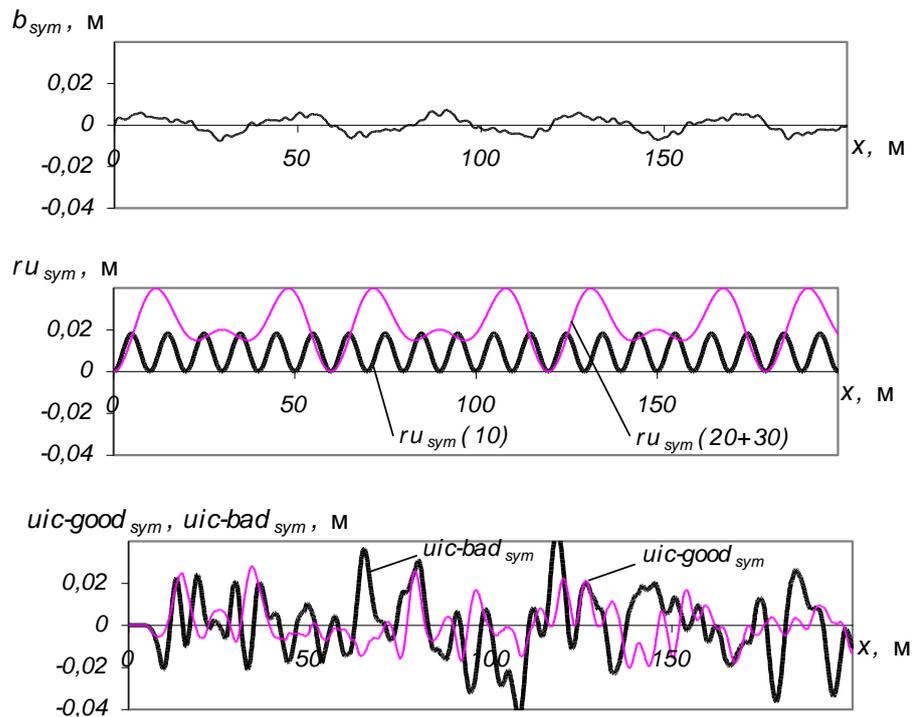


Рис. 1

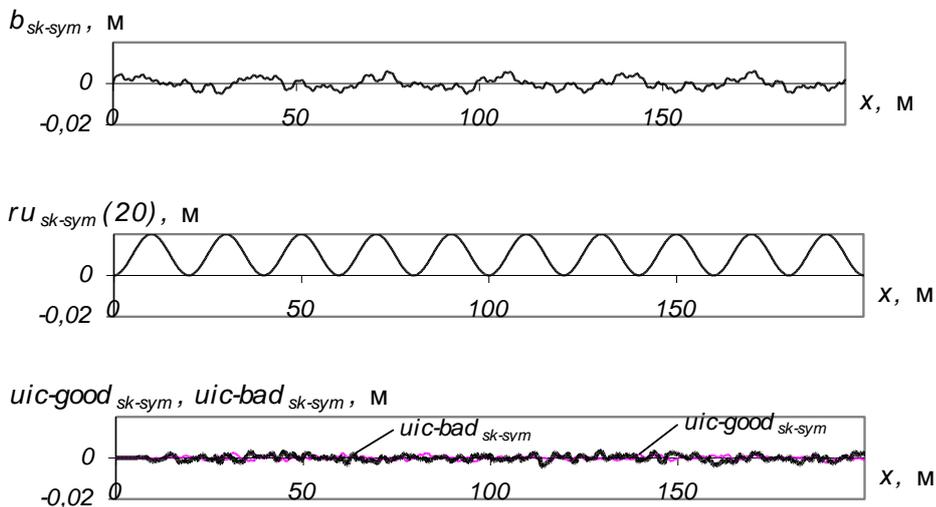


Рис. 2

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.

Таблица 3

Наименование возмущения	Наименование составляющей	Значение размаха, мм	Значение СКО, мм
<i>B</i>	b_{sym}	15,6	3,7
	b_{sk-sym}	13,4	2,5
<i>Ru</i>	$ru_{sym}(5)$	16,0	5,7
	$ru_{sk-sym}(5)$	12,0	4,3
	$ru_{sym}(10)$	18,0	6,4
	$ru_{sk-sym}(10)$	14,0	5,0
	$ru_{sym}(20)$	20,0	7,1
	$ru_{sk-sym}(20)$	20,0	7,1
	$ru_{sym}(30)$	24,0	8,5
	$ru_{sym}(20+30)$	39,9	11,0
<i>Uic-good</i>	$Uic-good_{sym}$	56,2	9,8
	$Uic-good_{sk-sym}$	5,3	0,9
<i>Uic-bad</i>	$Uic-bad_{sym}$	94,6	15,7
	$Uic-bad_{sk-sym}$	8,9	1,4

Анализ графиков на рис. 1–2 и данных табл. 3 позволяет отметить, что размах составляющих возмущений *Ru* (за исключением составляющей $ru_{sym}(20+30)$, формирование которой РД не предусмотрено) близок к раз-

маху составляющих возмущения B , которые, как уже отмечалось, были сформированы на основании обработки данных с реальных участков магистрального пути. Однако в отличие от одночастотных составляющих возмущений Ru , такой уровень максимальных значений b_{sym} и b_{sk-sym} обусловлен присутствием в их составе восьми неровностей различной длины, амплитуда каждой из которых в отдельности невелика. Средний уровень неровностей в возмущениях Ru (который характеризуется значениями СКО) в 1,4–2,8 раза превышает средний уровень составляющих возмущения B .

Возмущения $Uic-good$ и $Uic-bad$ по сравнению с возмущениями B и Ru характеризуются значительно более высоким уровнем (как максимальным, так и средним) симметричных составляющих и низким – кососимметричных.

Результаты расчетов. С использованием возмущений B , Ru , $Uic-good$ и $Uic-bad$ были проведены расчеты по определению максимальных значений показателей динамических качеств грузового полувагона. Поскольку вертикальные составляющие возмущений оказывают влияние на динамику экипажа только в вертикальной плоскости, анализировались соответствующие нормируемые показатели – вертикальные ускорения пятников кузова \ddot{z}_1 и коэффициенты вертикальной динамики кузова $K_{\Delta\hat{e}}$. Сравнение результатов численного определения показателей производилось с экспериментальными данными, собранными на железных дорогах Украины и России [6, 7]. При расчетах груженого полувагона к симметричной и кососимметричной составляющим возмущения B были применены корректирующие коэффициенты [1, 2], позволяющие учесть влияние массы экипажа. В случае задания возмущений Ru , $Uic-good$ и $Uic-bad$ такие коэффициенты не применялись, поскольку никакая корректировка в зависимости от параметров экипажа положениями РД и руководством пользователя УМ не предусмотрена.

При выполнении расчетов с возмущением Ru оказалось, что задание кососимметричных составляющих $ru_{sk-sym}(5)$, $ru_{sk-sym}(10)$ и $ru_{sk-sym}(20)$ в соответствии с рекомендациями РД независимо от того, какая была задана симметричная составляющая, приводит к возникновению в системе «экипаж – путь» значительных сил взаимодействия, вызывающих всползание колеса на рельс. Такая ситуация является аварийной и не характерна при эксплуатации железнодорожных экипажей на пути хорошего состояния, следовательно, кососимметричные составляющие возмущения Ru не могут быть рекомендованы к использованию при расчетах для прогнозирования динамических качеств вагонов. Дальнейшие исследования проводились при задании кососимметричных составляющих возмущений Ru , тождественно равных нулю.

Кроме того, расчеты показали, что при задании симметричных составляющих $ru_{sym}(30)$ и $ru_{sym}(20)$ (т. е. при учёте неровностей длиной 30 и 20 м) результаты численного определения показателей вертикальной динамики порожнего полувагона лежат значительно ниже нижней границы области экспериментальных данных. Такой результат согласуется с выводами статьи [3], где было показано, что учет в возмущении только неровностей большой и средней длины (к таковым и относятся неровности длиной 30 и 20 м) приводит к получению заниженных оценок показателей динамики.

С другой стороны, при задании составляющей $ru_{sym}(5)$ (т. е. неровностей длиной 5 м) уже при $V = 80$ км/ч значения \ddot{z}_i и $K_{\ddot{a}\hat{e}}$ значительно превышают не только верхнюю границу области экспериментальных данных этих показателей, но и предельные значения для «допустимого» хода вагона. При более высоких скоростях движения происходит всползание колеса на рельс, что указывает на неприемлемость данного возмущения для прогнозирования динамических качеств экипажей.

Зависимости максимальных значений вертикальных ускорений пятников кузова \ddot{z}_i и коэффициентов вертикальной динамики кузова $K_{\ddot{a}\hat{e}}$ от скорости движения полувагона V при задании различных возмущений приведены на рис. 3 (порожний режим) и рис. 4 (груженный). На этих рисунках сплошными линиями без маркеров показаны границы областей экспериментальных данных, штриховыми линиями – значения показателей для «допустимого» хода вагона. Линии с маркерами • иллюстрируют результаты расчетов, полученные при задании возмущения B , с маркерами ■ – при задании симметричной составляющей $ru_{sym}(10)$, □ – $ru_{sym}(20+30)$, ▲ – возмущения $Uicbad$, △ – $Uicgood$.

Как видно из рисунков, задание возмущения B во всех рассмотренных случаях позволяет получить значения динамических показателей, лежащие в областях соответствующих экспериментальных данных или достаточно близко к их границам. Это значит, что, несмотря на то, что данная модель возмущения, как и большинство моделей, не в полной мере соответствует реальным неровностям пути (в частности, её составляющие представляют собой не широкополосный случайный, а детерминированный процесс), использование такой модели при численном определении максимальных значений показателей динамических качеств вагонов в вертикальной плоскости является вполне приемлемым.

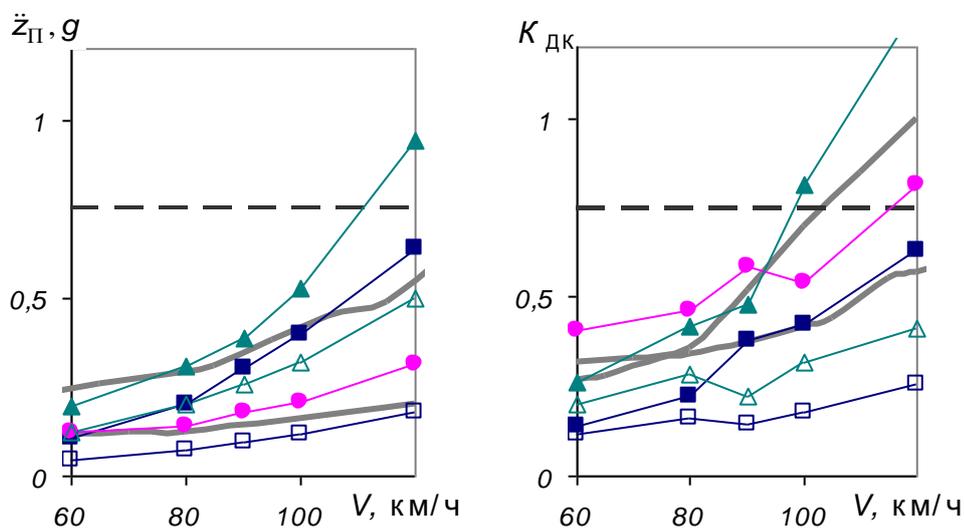


Рис. 3

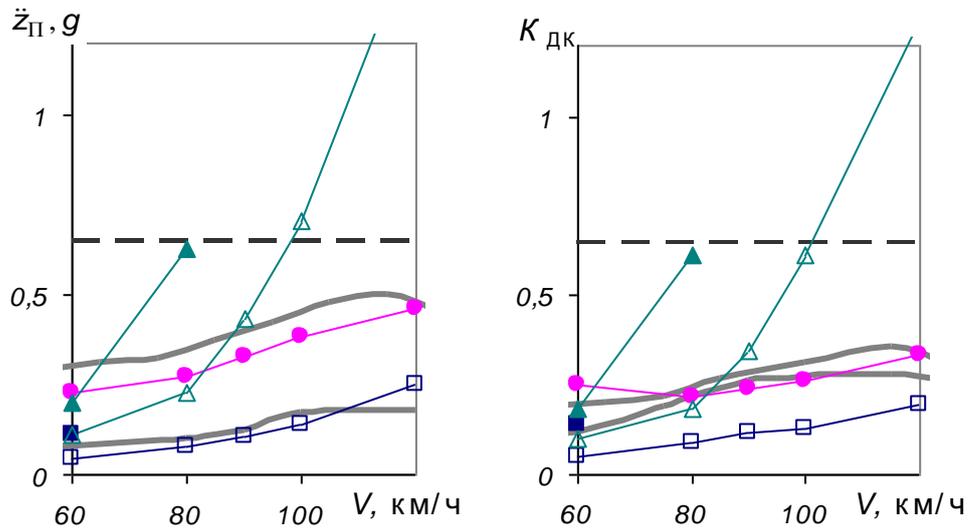


Рис. 4

Удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными результаты расчетов порожнего полувагона, полученные при задании составляющей возмущения $ru_{sym}(10)$ (т. е. с неровностями длиной 10 м), несколько хуже – составляющей $ru_{sym}(20+30)$ (в этом случае неровности представляют собой сумму неровностей длиной 20 и 30 м). Однако составляющая $ru_{sym}(10)$ оказалась абсолютно неприемлемой для определения динамических показателей полувагона в груженом режиме движения, поскольку уже при скорости 80 км/ч возникшие в системе силы взаимодействия привели к всползанию колеса на рельс. Значения показателей \ddot{z}_i и $K_{\Delta\hat{E}}$, определенные при задании составляющей $ru_{sym}(20+30)$, так же, как и в случае порожнего вагона, в основном оказались ниже нижней границы области экспериментальных данных, что нежелательно при прогнозных расчетах. Таким образом, симметричные составляющие возмущений Ru так же, как и кососимметричные, нельзя признать приемлемыми с точки зрения близости результатов расчетов и эксперимента.

В случае задания возмущения $Uic-good$ для расчетов порожнего полувагона при всех рассмотренных скоростях движения полученные максимальные значения показателей вертикальной динамики лежат в областях экспериментальных данных или достаточно близко к их границам. При задании возмущения $Uic-bad$ рост значений \ddot{z}_i и $K_{\Delta\hat{E}}$ с увеличением скорости является более интенсивным по сравнению с результатами эксперимента. Значительно большее расхождение результатов расчетов, полученных при задании возмущений $Uic-good$ и $Uic-bad$, с экспериментальными данными имеет место в случае груженого полувагона при высоких скоростях движения. При задании возмущения $Uic-bad$ значительное превышение результатов экспериментов наблюдается уже при скорости 80 км/ч, а при ее дальнейшем увеличении происходит всползание колеса на рельс. Такие результаты расчетов говорят о том, что использование данных, содержащихся в файлах неровно-

стей программного комплекса УМ, не позволяет адекватно оценить значения показателей вертикальной динамики полувагона в порожнем и груженом режимах в широком диапазоне скоростей, а значит, симметричная и кососимметричная составляющие возмущений *Uic-good* и *Uic-bad* не могут быть признаны приемлемыми для прогнозных расчетов.

Выводы. Полигармоническая модель *B* вертикальных составляющих входного возмущения является приемлемой для проведения расчетов по определению максимальных значений показателей динамических качеств полувагонов с точки зрения близости полученных значений и экспериментальных данных.

Применяя при расчетах порожнего и груженого полувагонов в широком диапазоне скоростей движения симметричную и кососимметричную составляющие возмущений *Ru*, сформированные по данным РД [4], не удаётся получить расчетные значения показателей вертикальной динамики, близкие к экспериментальным данным. Такой вывод не является неожиданным, поскольку геометрические параметры моделей возмущений, предложенные в РД, существенно отличаются от соответствующих характеристик неровностей реальных участков пути и построенных на их базе моделей. Поэтому указанный документ не может быть рекомендован в качестве руководства для формирования расчетных возмущений.

Использование данных, содержащихся в файлах неровностей программного комплекса УМ, не позволяет адекватно оценить значения показателей вертикальной динамики полувагона в порожнем и груженом режимах в широком диапазоне скоростей движения, а значит, симметричная и кососимметричная составляющие возмущений *Uic-good* и *Uic-bad* не могут быть признаны приемлемыми для проведения расчетов по прогнозированию динамических качеств экипажей.

1. 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.
2. Ушкалов В. Ф. Расчетные возмущения для оценки динамических качеств грузовых вагонов / В. Ф. Ушкалов, Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко // *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта им. акад. В. Лазаряна*. – Вып. 4 (46). – Днепропетровск, 2013. – С. 135 – 144.
3. Лапина Л. Г. Амплитудно-частотный анализ составляющих возмущений от вертикальных неровностей железнодорожного пути / Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко // *Техническая механика*. – 2012. – №2. – С. 9 – 15.
4. РД 32.68 96. Расчетные неровности железнодорожного пути для использования при исследованиях и проектировании пассажирских и грузовых вагонов. – М.: ВНИИЖТ, 1996. – 17 с.
5. Универсальный механизм. Моделирование динамики механических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.umlab.ru/>
6. Донченко А. В. Оптимална динаміка вантажних вагонів / А. В. Донченко, В. В. Ільчишин // *Залізничний транспорт України*. – 2007. – №1. – С. 67 – 70.
7. 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,
Днепропетровск

Получено 27.03.15,
в окончательном варианте 20.05.15