

## ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЗАПИСЕЙ ВАГОНА-ПУТЕИЗМЕРИТЕЛЯ ПРИ ПОСТРОЕНИИ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Для построения расчетных возмущений, необходимых при исследованиях динамических качеств грузовых железнодорожных экипажей, предложен способ, согласно которому возмущение формируется по данным обработки записей показаний вагона-путеизмерителя ЦНИИ-2 с корректировкой вертикальных составляющих в зависимости от параметров исследуемого экипажа.

Для побудови розрахункових збурень, які необхідні при дослідженнях динамічних якостей вантажних залізничних екіпажів, запропоновано спосіб, згідно якому збурення формуються за даними обробки записів показань вагона-колієвимірювача ЦНИИ-2 з коректуванням вертикальних складових в залежності від параметрів досліджуваного екіпажу.

A method of the construction of calculated perturbations for studying the dynamic properties of railway freight vehicles is proposed. According to this method, the perturbation is formed processing data of records of the TsNII-2 track measurement car with the adjustment of the vertical components depending on the parameters of the car under consideration.

Неотъемлемой составляющей процесса создания новых единиц подвижного состава или модернизации существующих являются теоретические исследования, в частности расчеты вынужденных колебаний железнодорожных экипажей. Результаты таких исследований позволяют давать прогнозные оценки показателей динамических качеств проектируемых или модернизируемых экипажей, корректировать значения отдельных параметров системы на стадии создания опытных образцов, сокращать расходы на ходовые испытания и т. п. Однако при некорректно заданном в расчетах возмущении можно не только неправильно оценить значение того или иного показателя, но и неверно спрогнозировать качественное поведение исследуемой механической системы в эксплуатации.

Модель возмущения, поступающего на вход исследуемой механической системы (рельсового экипажа), может быть представлена в виде различных комбинаций вертикальных и горизонтальных составляющих. В данной работе полагается, что возмущение имеет такие четыре составляющие:

- симметричную вертикальную неровность рельсовой колеи, приведенную к оси пути, характеризующую неровности профиля пути и определяемую как полусумма вертикальных неровностей правого и левого рельсов;
- кососимметричную вертикальную неровность пути, характеризующую превышение одной рельсовой нити над другой и определяемую как полуразность вертикальных неровностей правого и левого рельсов;
- горизонтальные неровности правого и левого рельсов.

### 1. Формирование возмущений по записям вагона-путеизмерителя.

Информация о возмущениях, действующих на рельсовый экипаж со стороны пути, может быть получена различными способами. Одним из них является использование показаний вагона-путеизмерителя, который производит измерения геометрических параметров рельсовой колеи в процессе движения, т. е. под динамической нагрузкой. Полученные при этом записи вертикальных неровностей каждой рельсовой нити (просадок) и горизонтальных неровностей (положения рельсовых нитей по направлению в плане) в силу особенностей применяемых в настоящее время двухточечных схем измерения отличаются от фактических неровностей пути под движущимся путеизмерителем как формой, так и величиной [1]. Для устранения методической погрешности

© Л.Г. Лапина, И.А. Машенко, 2011

измерений и определения фактических неровностей под движущимся путеизмерителем указанные записи должны быть преобразованы с учетом передаточной функции измерительной системы.

Формирование реализаций неровностей для каждого анализируемого отрезка пути осуществляется следующим образом: к оцифрованным записям просадок и неровностей в плане применяется прямое преобразование Фурье; полученные комплексные коэффициенты Фурье умножаются на комплексную обратную частотную характеристику измерительной системы (имеющую разный вид для вертикальных и горизонтальных неровностей); с помощью обратного преобразования Фурье определяются реализации неровностей.

Сопоставление с результатами экспериментов расчетных значений нормируемых показателей динамических качеств полувагонов, полученных при задании возмущений, сформированных по записям путеизмерителя на участках пути хорошего состояния, показало, что значения показателей в вертикальной плоскости для порожнего вагона расположены на уровне нижней границы области экспериментальных данных, а для груженого – существенно ниже этой границы. В то же время расчетные значения показателей полувагона в горизонтальной плоскости и качественно, и количественно хорошо согласуются с результатами экспериментов. Это позволило предположить, что вертикальные составляющие возмущения, сформированные по записям просадок, нуждаются в корректировке.

## **2. Способ корректировки вертикальных составляющих возмущения.**

Проанализируем более подробно процессы, которые применяются в качестве составляющих возмущений при проведении расчетов. Прежде всего следует отметить, что величина просадок рельсовых нитей, измеряемая путеизмерителем и используемая при формировании вертикальных составляющих возмущения, зависит не только от геометрических неровностей пути, но и от силы воздействия поездной нагрузки на путь, т. е. измеряемые просадки являются результатом динамического взаимодействия железнодорожного пути и вагона-путеизмерителя. Значения просадок, а следовательно, и вертикальных неровностей, приведенных к оси пути, в каждой контролируемой ( $n$ -ой) точке пути могут быть представлены в виде суммы трех составляющих [2]:

$$\eta(n) = \eta_{ст} + \eta_{дин}(n) + \eta_{геом}(n), \quad (1)$$

где  $\eta_{ст}$  – статическая составляющая для любой точки пути, обусловленная деформацией рельсовых нитей под действием нагрузки вагона-путеизмерителя в статике;  $\eta_{дин}(n)$  – динамическая составляющая, вызванная динамическим нагружением движущегося вагона-путеизмерителя в  $n$ -ой точке пути;  $\eta_{геом}(n)$  – геометрическая составляющая, не зависящая от нагрузки на путь и характеризующая его геометрические неровности в  $n$ -ой точке.

Поскольку при обработке записей путеизмерителя полученные процессы центрируются, информация о статической составляющей практически исключается из рассмотрения, следовательно, можно считать, что соответствующий член в выражении (1) отсутствует.

По информации, содержащейся в записях вагона-путеизмерителя при традиционном способе измерений, оценить вклад в величину неровности пути  $\eta$  каждой из двух оставшихся составляющих невозможно, для этого требуется изменение методов сбора и обработки информации [2]. Это важное

обстоятельство было учтено при разработке способа формирования расчетных возмущений для исследования динамики железнодорожных экипажей.

На уровень составляющей  $\eta_{дин}$  в каждой точке пути влияют многие параметры: участвующие во взаимодействии массы, упругие характеристики подвешивания, демпфирование в подвешивании, скорость движения экипажа, значение геометрической составляющей  $\eta_{geom}$  и др. Поэтому для всех грузовых экипажей, имеющих значения параметров, отличные от параметров вагона-путеизмерителя, изготовляемого на базе пассажирского вагона, вертикальные составляющие расчетных возмущений нужно корректировать с учетом данных о параметрах конкретного вагона. Составляющие возмущения в горизонтальной плоскости, которые в меньшей степени испытывают влияние характеристик экипажа, а в основном определяются геометрией пути, в корректировке не нуждаются.

Оценим вертикальные составляющие возмущений, необходимые для расчетов грузовых вагонов, с позиций колебательных процессов, происходящих в этих механических системах под действием задаваемых возмущений, взяв за основу способ корректирующих множителей [3].

В данном случае соотношения между разными возмущениями будем определять в частотной области приближенно в виде некоторых постоянных корректирующих коэффициентов. Такие коэффициенты при амплитудах неровностей удобнее переносить во временную область, где, как правило, путем интегрирования проводятся расчеты грузовых экипажей как нелинейных систем. При таком подходе достаточно использовать простые расчетные схемы.

Рассмотрим линейные модели вагона-путеизмерителя и грузового вагона с учетом симметрии относительно вертикальной поперечной плоскости (рис. 1). Элементы расчетной схемы, соответствующие путеизмерителю, будем обозначать символами без верхнего индекса, а грузовому вагону – с

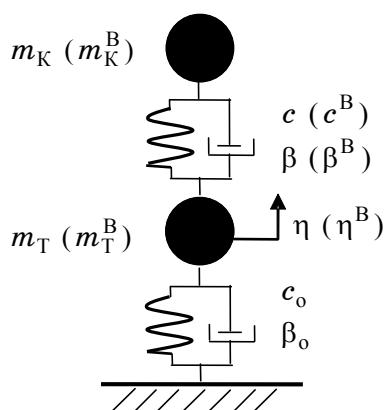


Рис. 1

верхним индексом «В». В этих моделях масса обрессоренной части, т. е. половина массы кузова (включая надрессорную балку тележки)  $m_K$  (или  $m_K^B$ ) и масса одной тележки  $m_T$  ( $m_T^B$ ) соединены между собой жесткостью, соответствующей жесткости подвешивания  $c$  ( $c^B$ ), и демпфером вязкого трения  $\beta$  ( $\beta^B$ );  $c_0$  и  $\beta_0$  – жесткость и коэффициент вязкого трения основания. Перемещение массы  $m_T$  ( $m_T^B$ ) будем считать возмущением  $\eta$  ( $\eta^B$ ).

Уравнения вынужденных колебаний рассматриваемых вагонов будут иметь следующий вид:

вагона-путеизмерителя

$$m_K \cdot \ddot{z} + \beta \cdot \dot{z} + c \cdot z = m_T \cdot \ddot{\eta} + (\beta_0 - \beta) \cdot \dot{\eta} + (c_0 - c) \cdot \eta, \quad (2)$$

грузового вагона

$$m_K^B \cdot \ddot{z}^B + \beta^B \cdot \dot{z}^B + c^B \cdot z^B = m_T^B \cdot \ddot{\eta}^B + (\beta_0 - \beta^B) \cdot \dot{\eta}^B + (c_0 - c^B) \cdot \eta^B; \quad (3)$$

где  $z$ ,  $z^B$  – перемещения массы кузова соответственно вагона-путеизмерителя и грузового вагона в расчетной схеме;  $\eta$ ,  $\eta^B$  – неровности рельсового пути (перемещения масс тележек), определяемые как приведенные к оси пути вертикальные перемещения колес соответствующего вагона и включающие в себя динамическую  $\eta_{дин}$  и геометрическую  $\eta_{geom}$  составляющие.

Запишем уравнения (2) и (3) в частотной области, представив переменные в виде  $z = z(\varpi) \cdot e^{i\varpi t}$ ,  $z^B = z^B(\varpi) \cdot e^{i\varpi t}$ ,  $\eta = \eta(\varpi) \cdot e^{i\varpi t}$ ,  $\eta^B = \eta^B(\varpi) \cdot e^{i\varpi t}$ :

$$\begin{aligned} & \left( -m_K \cdot \varpi^2 + c + \beta \cdot i\varpi \right) \cdot z(\varpi) = \\ & = \left( -m_T \cdot \varpi^2 + (c_0 - c) + (\beta_0 - \beta) \cdot i\varpi \right) \cdot \eta(\varpi), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \left( -m_K^B \cdot \varpi^2 + c^B + \beta^B \cdot i\varpi \right) \cdot z^B(\varpi) = \\ & = \left( -m_T^B \cdot \varpi^2 + (c_0 - c^B) + (\beta_0 - \beta^B) \cdot i\varpi \right) \cdot \eta^B(\varpi), \end{aligned}$$

где  $z(\varpi)$ ,  $z^B(\varpi)$ ,  $\eta(\varpi)$ ,  $\eta^B(\varpi)$  – зависящие от частоты  $\varpi$  модули неизвестных координат и неровностей для вагона-путеизмерителя и грузового вагона.

Искомый корректирующий коэффициент  $k(\varpi)$  определяется отношением между возмущениями для грузового вагона  $\eta^B(\varpi)$  и вагона-путеизмерителя  $\eta(\varpi)$  из уравнений (4):

$$k(\varpi) = \frac{\eta^B(\varpi)}{\eta(\varpi)} = b^B(\varpi) \cdot \frac{z^B(\varpi)}{z(\varpi)}, \quad (5)$$

где  $b^B(\varpi) = b_1^B(\varpi) \cdot b_2(\varpi)$ ,  $|b^B(\varpi)| = |b_1^B(\varpi)| \cdot |b_2(\varpi)|$ ,

$$|b_1^B(\varpi)| = \sqrt{\frac{\left( -m_K^B \cdot \varpi^2 + c^B \right)^2 + \left( \beta^B \cdot \varpi \right)^2}{\left( -m_K \cdot \varpi^2 + c \right)^2 + \left( \beta \cdot \varpi \right)^2}},$$

$$|b_2(\varpi)| = \sqrt{\frac{\left( -m_T \cdot \varpi^2 + (c_0 - c) \right)^2 + \left( (\beta_0 - \beta) \cdot \varpi \right)^2}{\left( -m_T^B \cdot \varpi^2 + (c_0 - c^B) \right)^2 + \left( (\beta_0 - \beta^B) \cdot \varpi \right)^2}}.$$

Для получения приближенных оценок коэффициента  $k$ , не зависящих от частоты, заменим множитель  $b^B(\varpi)$  его среднеарифметической оценкой  $b^B$  [4] в анализируемом частотном диапазоне и воспользуемся нормативными данными [5] о допустимых значениях динамических показателей экипажей. Поскольку нормируются значения ускорений, а не перемещений, применим известное в операционном исчислении соотношение между изображениями второй производной и функции  $\ddot{z}(\varpi) = z(\varpi) \cdot \varpi^2$  и в качестве неизвестных амплитуд ускорений  $z(\varpi) \cdot \varpi^2$  и  $z^B(\varpi) \cdot \varpi^2$  зададим нормативные значения

ускорений пятников кузова, допустимые для соответствующего вагона. Тогда

$$k = b^B \cdot \frac{[\ddot{z}^B]}{[\ddot{z}]} \quad (6)$$

Используя предельные нормативные значения ускорений пятников кузова для того или иного хода вагона («отличного», «хорошего» или «удовлетворительного»), можно найти соответствующие корректирующие коэффициенты, на которые следует умножать симметричную вертикальную составляющую возмущения.

Для широкого класса четырехосных грузовых вагонов с тележками модели 18-100 приведем выражение (6) к виду, более удобному для практического применения. Примем следующие параметры в расчетной схеме: для вагона-путеизмерителя  $m_K = 28,7$  т и  $m_T = 7,3$  т; для различных грузовых вагонов (полувагонов, крытых вагонов, платформ и цистерн) с нагрузкой на ось, не превышающей 23,5 т, масса которых находится в интервале от 18,4 т (минимальная тара) до 94 т (полностью загруженный), половина массы кузова  $m_K^B$  составляет от 4,5 до 42,3 т; параметры тележек соответствуют параметрам серийных пассажирской и грузовой тележек.

Чтобы выражение (6) можно было применять для расчетов и порожних, и груженых грузовых вагонов целесообразно в качестве  $[\ddot{z}^B]$  принять среднее между нормативными данными для порожнего  $[\ddot{z}^П]$  и груженого  $[\ddot{z}^Г]$  вагонов. В качестве  $[\ddot{z}]$  нужно взять допустимое значение для заселенного пассажирского вагона, поскольку его масса близка к массе вагона-путеизмерителя с установленным регистрирующим и записывающим оборудованием. Воспользовавшись усредненными допустимыми значениями для «отличного», «хорошего» и «удовлетворительного» хода грузового вагона получим:  $[\ddot{z}^B]/[\ddot{z}] = 3$ .

В соответствии с выражением (6) при усредненных допустимых значениях ускорений можно получить зависимость корректирующих коэффициентов

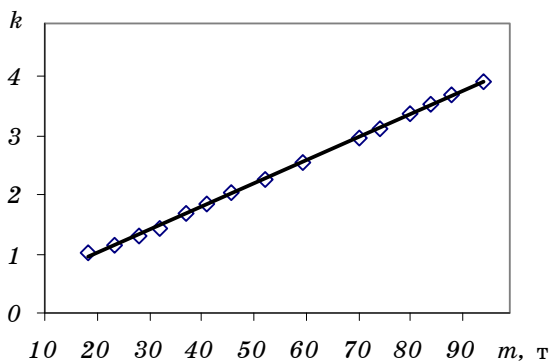


Рис. 2

$k$  от массы  $m$  вагона (тары или брутто), выраженной в тоннах. График этой зависимости показан на рис. 2. При его построении использованы значения масс пятнадцати видов грузовых вагонов, оборудованных тележками модели 18-100 (маркеры  $\diamond$ ). Как видим, изменение уровня вертикальной составляющей возмущения при изменении массовых параметров вагонов является весьма существенным, и этого нельзя не учитывать при построении расчетного возмущения.

Зависимость корректирующего коэффициента от массы вагона (порожнего или груженого), приведенная на графике, близка к линейной, поэтому при-

ближенно ее можно заменить линейным трендом (сплошная линия на рис. 2) и описать уравнением

$$k = 0,039 \cdot m + 0,131 . \quad (7)$$

Выражение (7) достаточно хорошо аппроксимирует значения корректирующих коэффициентов  $k$ , вычисленных по формуле (6): величина квадрата смешанной корреляции, отражающая близость значений линии тренда к фактическим данным и в идеальном случае равная 1, составляет 0,999; относительная погрешность не превышает 5 %.

Таким образом, для определения значений корректирующих коэффициентов при симметричных составляющих расчетных возмущений для грузовых экипажей, оборудованных серийными тележками модели 18-100, можно воспользоваться выражением (7), которое позволяет вычислять данные коэффициенты для расчетов не только порожних и полностью загруженных вагонов с тележками 18-100, но и в промежуточных случаях, т. е. при неполной их загрузке. При расчетах экипажей с другими тележками, отличающимися массово-жесткостными параметрами, следует использовать формулу (6).

Умножать на корректирующий коэффициент  $k$  следует только симметричную составляющую возмущений, поскольку кососимметричная составляющая характеризует перекося рельсовых нитей, который зависит в основном от геометрии пути и в гораздо меньшей степени от динамического фактора. При увеличении нагрузки на путь уровни просадок на левой и правой рельсовых нитях возрастают примерно одинаково. Чтобы все-таки учесть это «примерно», в расчетах уровень кососимметричной составляющей можно увеличить в зависимости от значения  $k$  на 10-20 %.

**3. Пример практического применения откорректированных возмущений.** Покажем, что дает на практике применение предлагаемого способа корректировки вертикальных составляющих возмущений при определении показателей динамических качеств типового порожнего (масса тары 13,8 т) и груженого (масса брутто 84,6 т) полувагонов с серийными тележками модели 18-100 и неизношенными колесами стандартного профиля.

При построении модели возмущений использованы записи на бумажной ленте показаний серийного вагона-путеизмерителя ЦНИИ-2, полученные в феврале 2007 г. во время плановой проверки состояния магистрального пути на участке Пятихатки – Чаплино Приднепровской железной дороги. По результатам обработки записей, зарегистрированных на отрезке пути с качественной оценкой «хорошо» и достаточно высокой для такого состояния балльностью, обусловленной, главным образом, вертикальными неровностями (просадками), было сформировано возмущение  $U_0$ . С использованием выражения (7) определены значения корректирующих коэффициентов при вертикальных симметричных составляющих возмущений:  $k=1,1$  для порожнего полувагона и  $k=3,9$  для груженого. При расчетах груженого полувагона кососимметричная составляющая возмущения была увеличена на 20 %.

Для различных скоростей движения  $V$  при возмущениях, откорректированных описанным в п. 2 способом, а также исходном возмущении  $U_0$  определены значения нормируемых показателей динамических качеств полувагонов: вертикальных ускорений пятников кузова  $\ddot{z}_П$ , коэффициентов вертикальной динамики кузова  $K_{ДК}$ , горизонтальных поперечных ускорений пят-

ников кузова  $\ddot{y}_П$ , рамных сил  $H_P$  в долях осевой нагрузки  $P_0$  ( $H_P/P_0$ ). Результаты расчетов показаны на рис. 3, 4. Горизонтальными сплошными линиями на рисунках нанесены предельные значения показателей для допустимого» хода вагона [5]. Критерием правильности выбора возмущения считалось удовлетворительное согласование расчетных динамических показателей с результатами экспериментального определения тех же показателей (пунктирные линии на графиках) для типовых полувагонов с неизношенными стандартными колесами на участках хорошего состояния железных дорог Украины и России [6, 7].

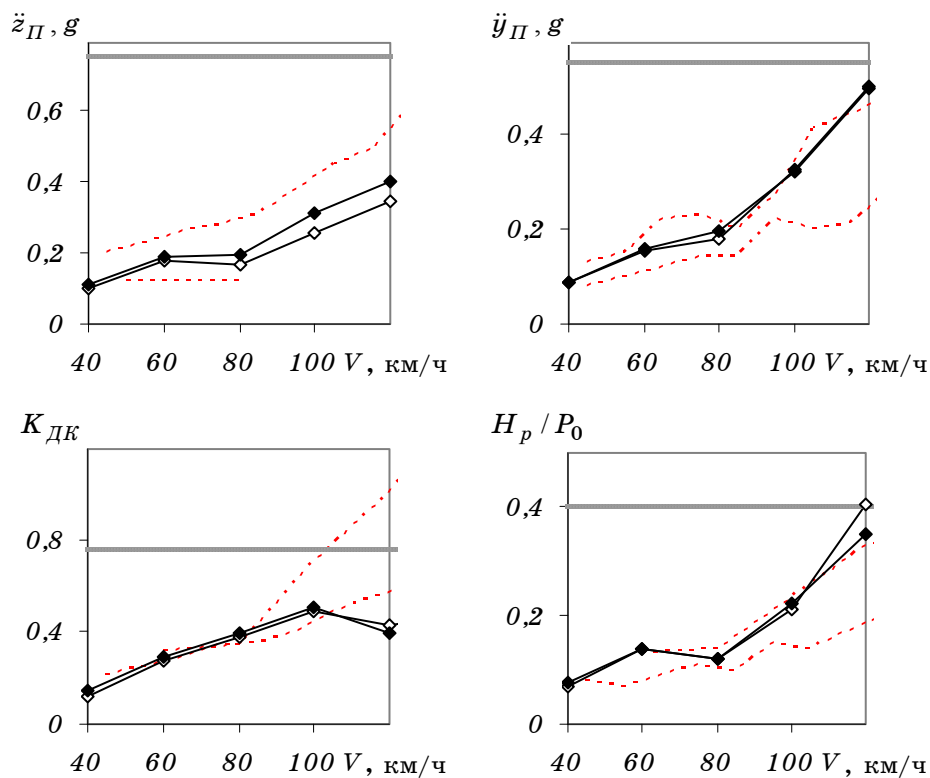


Рис. 3

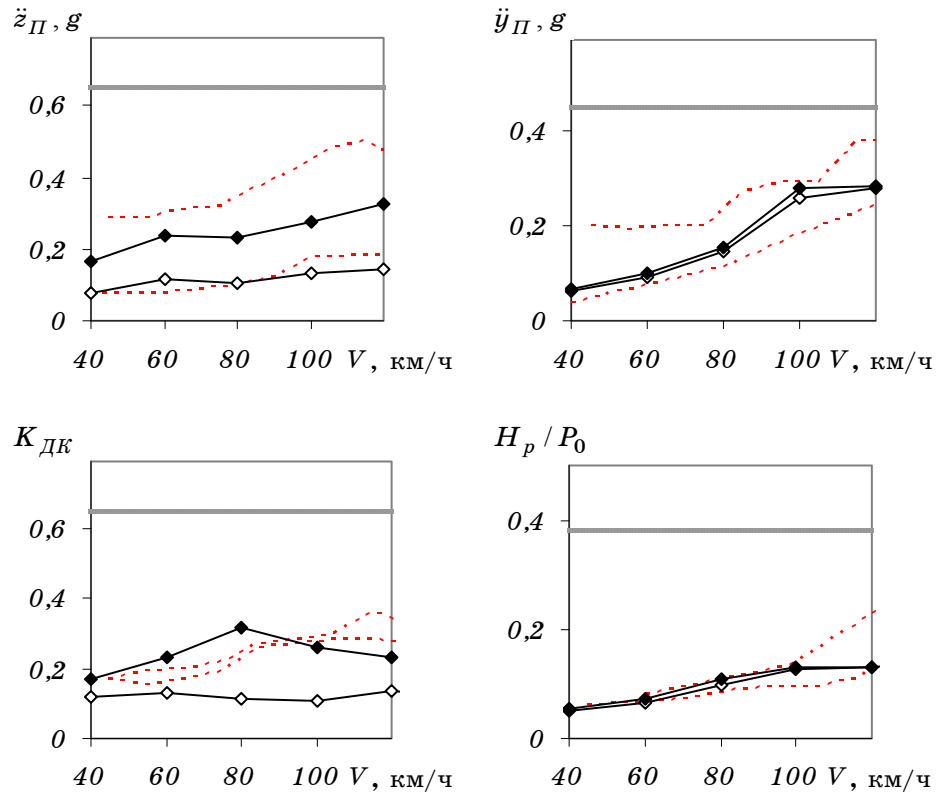


Рис. 4

Как видим, при откорректированных возмущениях (линии с маркерами  $\blacklozenge$ ) полученные значения динамических показателей порожнего и груженого полувагонов в вертикальной плоскости достаточно близки к средним значениям из области экспериментальных данных. При исходном возмущении  $U_0$  (линии с маркерами  $\diamond$ ), как уже отмечалось в п. 1, расчетные значения показателей в вертикальной плоскости ( $\ddot{z}_{\Pi}$  и  $K_{DK}$ ) порожнего полувагона лежат в нижней части области соответствующих экспериментальных данных (см. рис. 3), а груженого – расположены в основном ниже ее нижней границы (см. рис. 4). Что касается расчетных значений показателей в горизонтальной плоскости ( $\ddot{y}_{\Pi}$  и  $H_P/P_0$ ), то на рис. 3, 4 хорошо видно, что при задании исходного возмущения  $U_0$  они хорошо согласуются с результатами экспериментов как для порожнего, так и для груженого вагонов. Проведенная корректировка вертикальных составляющих возмущения на расчетные значения  $\ddot{y}_{\Pi}$  и  $H_P/P_0$  практически не повлияла.

Предлагаемый способ корректировки возмущений показал эффективность при расчетах и для других грузовых вагонов.

**Выводы.** Для исследований динамических качеств грузовых вагонов в качестве составляющих расчетных возмущений могут быть использованы обработанные записи показаний вагона-путеизмерителя, зарегистрированные на участке рельсового пути с достаточно высокой для заданного состояния пути балльностью. При этом симметричные вертикальные составляющие возмущения, полученные по записям просадок, следует откорректировать



путем умножения на зависящие от параметров рассматриваемого вагона коэффициенты, способ определения которых предлагается в настоящей статье. Горизонтальные составляющие возмущения в корректировке не нуждаются; для них могут быть непосредственно использованы обработанные записи отклонений по направлению в плане.

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. Филипеня Н. С. Разработка инерциальных методов и средств измерения параметров рельсового пути : автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук : спец. 05.11.16 – информационно-измерительные и управляющие системы (приборостроение) / Филипеня Наталья Сергеевна. – Санкт-Петербург, 2007. – 18 с.
3. Ушкалов В. Ф. Статистическая динамика рельсовых экипажей / В. Ф. Ушкалов, Л. М. Резников, С. Ф. Редько. – Киев : Наук. думка, 1982. – 360 с.
4. Королюк В. С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин. – Москва : Наука, 1985. – 640 с.
5. Нормы для расчета и проектирования вагонов железных дорог МПС колеи 1520 мм (несамоходных). – Москва : ГосНИИВ – ВНИИЖТ, 1996. – 319 с. Изменения и дополнения № 2. Введ. 01.03.2002.
6. Донченко А. В. Оптимальна 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. Заверталоук, А. В. Коваленко // Вестник ВНИИЖТ. – 2006. – № 1. – С. 21 – 26.

Институт технической механики  
НАН Украины и НКА Украины,  
Днепропетровск

Получено 01.12.10,  
в окончательном варианте 01.12.10