УДК 519.2:629.2

Л. Г. ЛАПИНА

ПОСТРОЕНИЕ ПОЛИГАРМОНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВХОДНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ГРУЗОВЫХ ВАГОНОВ

Целью работы является построение модели составляющих входных возмущений, действующих на железнодорожный экипаж со стороны пути, приемлемой для выполнения расчетов по прогнозированию динамических качеств грузовых вагонов в горизонтальной плоскости. При проведении исследований применялись методы математического моделирования.

Проведен амплитудно-частотный анализ горизонтальных неровностей железнодорожного пути, полученных по обработанным записям показаний вагона-путеизмерителя. С использованием результатов этого анализа сформирована модель составляющих входного расчетного возмущения в виде суммы гармоник. Показано, что использование построенной модели при проведении прогнозных расчетов позволяет получить оценки нормируемых показателей динамических качеств полувагона в горизонтальной плоскости, близкие к соответствующим экспериментальным данным.

Метою роботи є побудова моделі складових вхідних збурень, що діють на залізничний екіпаж з боку колії, придатної для виконання розрахунків з прогнозування динамічних якостей вантажних вагонів у горизонтальній площині. При проведенні досліджень застосовувалися методи математичного моделювання.

Проведено амплітудно-частотний аналіз горизонтальних нерівностей залізничної колії, отриманих за обробленими записами показань вагона-колієвимірювача. З використанням результатів цього аналізу сформовано модель складових вхідного розрахункового збурення у вигляді суми гармонік. Показано, що використання побудованої моделі при проведенні прогнозних розрахунків дозволяє отримати оцінки нормованих показників динамічних якостей піввагона в горизонтальній площині, близькі до відповідних експериментальних даних.

The work goal is to build a model of the components of the input disturbances acting on the railway vehicle from the track that is satisfactory for calculations when predicting the dynamic qualities of the freight cars in a horizontal plane. In the study the methods of mathematical modeling have been used.

An amplitude and frequency analysis of horizontal irregularities of the railway track has been conducted processing the records of the track-testing car. The model of the components of the predicted input disturbance in the form of the sum of harmonics has been formed using the results of this analysis. It was found that in the predicted calculations the model built enables the estimation of the standard indices of the dynamic qualities of a gondola car in a horizontal plane that is close to the corresponding experimental data.

Ключевые слова*: неровности железнодорожного пути, спектральный анализ, показатели динамических качеств.*

Одним из подходов к заданию внешних возмущений, поступающих на колеса рельсового экипажа и вызывающих его пространственные колебания, является построение математических моделей неровностей железнодорожного пути. Такие модели представляют собой набор составляющих, описывающих воздействия на экипаж со стороны пути в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При построении моделей этих составляющих естественно опираться на информацию о реальных неровностях пути. Вопросы построения моделей вертикальных составляющих возмущения достаточно подробно были рассмотрены в работах [1 – 3]. В частности, в этих работах приведены результаты построения и использования при расчетах полигармонических моделей вертикальных составляющих возмущения, основанных на результатах амплитудно-частотного анализа записей показаний вагона-путеизмерителя, зарегистрированных на участках магистрального пути. Аналогичным способом могут быть сформированы и модели горизонтальных составляющих входного возмущения. Критерием приемлемости построенных моделей должна быть близость значений показателей динамических качеств вагонов, полученных при расчетах с использованием данных моделей и в эксперименте.

Исходным материалом для проведения исследований, описанных в данной работе, служат записи показаний вагона-путеизмерителя ЦНИИ-2, зарегистрированные при плановой проверке состояния магистрального пути на участке Пятихатки – Чаплино Приднепровской железной дороги. Для построения модели горизонтальных составляющих возмущений выполнен анализ положения каждой рельсовой нити по направлению в плане на 10 прямолинейных участках пути длиной около 600 м каждый. Отступления от норм содержания рельсовой колеи на этих участках были не выше II степени [4], качественное состояние пути являлось типичным для магистрального пути и характеризовалось оценками «хорошо» или «отлично».

Как известно [4], записанное путеизмерителем положение рельсовых нитей по направлению в плане по форме и величине отличается от фактического геометрического положения рельсовых нитей. Это связано с особенностями применяемой двухточечной схемы измерений: путеизмерителем фиксируются записи стрел изгиба, измеренные от боковой рабочей грани головки рельса до хорды длиной 21,5 м в точке, расположенной на расстоянии 4,1 м от конца хорды. Для того, 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. Используемая при этом амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) записывается следующим образом [3]:

$$W^{г}(iF) = \frac{1}{1 - \frac{b}{a+b}(\exp(2\pi iFa) - \exp(-2\pi iFb)) - \exp(-2\pi iFb)}, \qquad (1)$$

где $W^{г}(iF)$ – комплексная АЧХ системы измерения горизонтальных неровностей рельсовых нитей; F – пространственная частота; l – база тележки (для путеизмерителя ЦНИИ-2 l =2,7 м); a =4,1 м и b =17,4 м – расстояния от концов хорды путеизмерительного вагона до точки на ней, в которой измеряются стрелы изгиба; i – мнимая единица.

Неровности рельсовых нитей представляют собой случайные процессы, в спектре которых присутствуют частоты в широком диапазоне. Особенности измерительной, регистрирующей и обрабатывающей систем путеизмерителя ЦНИИ-2 позволяют достаточно точно восстанавливать спектры горизонтальных неровностей с длиной L от 5 до 65 м [5] или, что то же самое, с частотой F ($F = 1/L$) от 0,015 до 0,2 кол/м. Здесь и далее в данной работе понятие «частота» подразумевает пространственную частоту, определяющую количество периодов колебаний на единицу длины и измеряемую в кол/м.

Для составляющих в горизонтальной плоскости обычно используется одна из двух комбинаций случайных возмущений, поступающих на колеса рельсового экипажа и вызывающих его колебания [6]:

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

- горизонтальные неровности, приведенные к оси пути (неровности пути в плане), $\eta_{о}^{г}$ и изменения полуширины колеи $\eta_{ш}^{г}$, вычисляемые как

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

Выбор той или иной комбинации определяется особенностями используемых расчетных схем и математических моделей, а также требованиями программного продукта, реализующего их. Для построения модели составляющих возмущения предпочтительным является второй вариант, поскольку в таком случае можно сформировать различные неровности на правой и левой рельсовых нитях, что соответствует реальному положению вещей и позволяет адекватно оценить параметры взаимодействия экипажа и пути, особенно при скоростях движения, близких к критической.

Амплитудно-частотный анализ горизонтальных неровностей железнодорожного пути. Исследование частотного состава неровностей пути в плане $\eta_{о}^{г}$ и изменения полуширины колеи $\eta_{ш}^{г}$ было выполнено с помощью спектрального анализа.

На рис. 1 в качестве примера приведены графики спектральных плотностей фактических неровностей пути в плане $S_{\eta_{о}^{г}}$ на выбранных десяти участках. Для удобства анализа параметров неровностей по оси абсцисс отложена не пространственная частота F, а длина волны неровности $L = 1/F$. Графики спектральной плотности изменения полуширины колеи $S_{\eta_{ш}^{г}}$ имеют аналогичный вид.

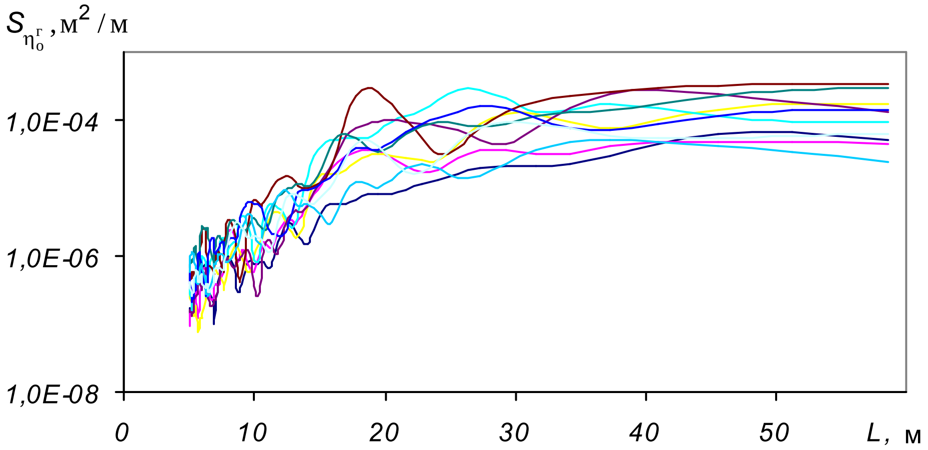

Рис. 1

Как видно из приведенных графиков, спектральные плотности горизонтальных неровностей пути (как неровностей в плане, так и изменения полуширины колеи) на всех участках имеют качественно одинаковый характер, в частности, не являются монотонными функциями. Пики на графике спектральной плотности говорят о значительной доле колебаний с данной длиной волны в общей энергии колебательного процесса. Значения длины неровности, при которых (или при близких к ним значениях) имеются пики в большей части рассмотренных спектральных плотностей, будем считать условно характерными длинами неровностей. Для анализируемых спектральных плотностей $S_{\eta_о^г}$ и $S_{\eta_ш^г}$ удалось выделить по 9 таких характерных длин неровностей, которые обозначим $L_{оj}^*$ и $L_{шj}^*$. Соответствующие им частоты обозначим $F_{оj}^*$ и $F_{шj}^*$, $j=\overline{1,9}$.

Для определения амплитуд гармонических компонент случайных процессов с заданными частотами F_j^*, $j=\overline{1,N}$ воспользуемся способом, основанным на применении алгоритма фильтрации.

Разобьем анализируемый частотный диапазон $[F_{нач}, F_{кон}]$ на N поддиапазонов с границами F_j, $j=\overline{0,N}$ таким образом, чтобы каждая из заданных частот F_j^*, $j=\overline{1,N}$ принадлежала интервалу $[F_{j-1}, F_j]$, $j=\overline{1,N}$. При этом $F_0=F_{нач}$, $F_N=F_{кон}$. К исходному процессу последовательно применим N полоснопропускающих фильтров, каждый из которых пропускает частоты только в диапазоне $[F_{j-1}, F_j]$, $j=\overline{1,N}$. В результате получим N процессов, содержащих совокупность гармонических компонент с частотами от F_{j-1} до F_j, $j=\overline{1,N}$. В качестве амплитуды A_j каждого из полученных процессов принимается наибольшее по модулю значение его ординаты.

С использованием описанного алгоритма были определены амплитуды гармонических составляющих неровностей пути в плане и процессов изменения полуширины колеи (соответственно $A_{оkj}$ и $A_{шkj}$, $k=\overline{1,10}$, $j=\overline{1,9}$) для каждого из десяти выбранных участков и каждого выделенного частотного диапазона. Параметры фильтрации во всех случаях полагались следующими: $N=9$; $F_0=F_{нач}=0{,}015$ кол/м; $F_N=F_{кон}=0{,}2$ кол/м.

Для каждого частотного диапазона определены максимальные значения амплитуды $A_{оj}=\max\limits_k A_{оkj}$ и $A_{шj}=\max\limits_k A_{шkj}$, $k=\overline{1,10}$, причем резко выделяющиеся значения были исключены с доверительной вероятностью $p=0{,}9$ [7]. Учитывая близость между собой значений амплитуды для некоторых значений длины неровности, они были усреднены. Полученные оценки характерных длин неровностей $L_{оj}^*$ и $L_{шj}^*$, а также соответствующих им амплитуд гармонических составляющих горизонтальных неровностей пути $A_{оj}$ и $A_{шj}$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Номер гармонической компоненты j	Значения характерных длин неровностей и амплитуд гармонических составляющих			
	$L_{оj}^*$, м	$A_{оj}$, мм	$L_{шj}^*$, м	$A_{шj}$, 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

Формирование горизонтальных составляющих модели возмущения. Горизонтальные составляющие расчетного возмущения предлагается сформировать в виде линейных комбинаций гармонических компонент. В качестве значений параметров данного выражения зададим оценки амплитуды и характерных длин неровностей, определенные по результатам амплитудно-частотного анализа неровностей выбранных участков пути и приведенные в табл. 1. Таким образом, составляющие сформированного расчетного возмущения $\text{Н}^{\text{г}} = \left(\text{Н}^{\text{г}}_{\text{о}}, \text{Н}^{\text{г}}_{\text{ш}}\right)$ запишутся следующим образом:

$$\text{Н}^{\text{г}}_{\text{о}}(x) = \sum_{j=1}^{9} A_{\text{о}j} \cdot \sin\left(2\pi x / L^{*}_{\text{о}j}\right), \qquad \text{Н}^{\text{г}}_{\text{ш}}(x) = \sum_{j=1}^{9} A_{\text{ш}j} \cdot \sin\left(2\pi x / L^{*}_{\text{ш}j}\right). \quad (3)$$

В тех случаях, когда используемые для расчетов математические модели и реализующее их программное обеспечение предполагают задание неровностей на правой и левой рельсовых нитях, горизонтальные составляющие возмущения $\text{Н}^{\text{г}} = \left(\text{Н}^{\text{г}}_{л}, \text{Н}^{\text{г}}_{\text{п}}\right)$ с учетом формулы (2) будут вычисляться так:

$$\text{Н}^{\text{г}}_{л}(x) = \text{Н}^{\text{г}}_{\text{о}}(x) + \text{Н}^{\text{г}}_{\text{ш}}(x), \qquad \text{Н}^{\text{г}}_{\text{п}}(x) = \text{Н}^{\text{г}}_{\text{о}}(x) - \text{Н}^{\text{г}}_{\text{ш}}(x), \quad (4)$$

где значения $\text{Н}^{\text{г}}_{\text{о}}(x)$ и $\text{Н}^{\text{г}}_{\text{ш}}(x)$ определяются по формулам (3).

Применение полигармонических моделей горизонтальных составляющих расчетных возмущений при исследовании динамических качеств полувагонов. Построенная модель $\text{Н}^{\text{г}} = \left(\text{Н}^{\text{г}}_{л}, \text{Н}^{\text{г}}_{\text{п}}\right)$ применена в качестве горизонтальных составляющих входного возмущения при динамических расчетах порожнего и груженого полувагонов, движущихся с постоянной скоростью. В качестве вертикальных составляющих были взяты симметричная и кососимметричная составляющие возмущения, сформированного по записям просадок на реальном участке пути и позволяющего получить приемлемые с точки зрения близости к результатам эксперимента значения нормируемых динамических показателей полувагона в вертикальной плоскости [3]. Оценивались максимальные значения таких нормируемых показателей динамических качеств экипажа в горизонтальной плоскости, как горизонтальные поперечные ускорения пятников кузова $\ddot{y}_{\text{П}}$ в долях ускорения свободного падения g и рамные силы H_P в долях осевой нагрузки P_0. Расчеты проводились для случаев движения полувагона по прямому участку пути со скоростями V от 60 до 120 км/ч. Полученные максимальные значения показателей $\ddot{y}_{\text{П}}$ и H_P / P_0 порожнего полувагона приведены на рис. 2, груженого – на рис. 3. На этих рисунках также показаны (сплошные линии без маркеров) граничные значения соответствующих показателей динамики, собранных в ходе экспериментов на железных дорогах Украины и России [8 – 9], и предельные значения показателей для допустимого хода вагона (штриховые линии).

Как видно из приведенных графиков, использование предложенной полигармонической модели горизонтальных составляющих возмущения позволяет получить максимальные значения показателей динамических качеств полувагонов в горизонтальной плоскости, лежащие в области соответствующих экспериментальных данных либо незначительно выходящие за её верхнюю границу. Такие результаты являются приемлемыми при проведении прогнозных расчетов, а значит, модель $\text{Н}^{\text{г}} = \left(\text{Н}_{\text{л}}^{\text{г}}, \text{Н}_{\text{п}}^{\text{г}}\right)$ может быть рекомендована в качестве горизонтальных составляющих расчетного возмущения.

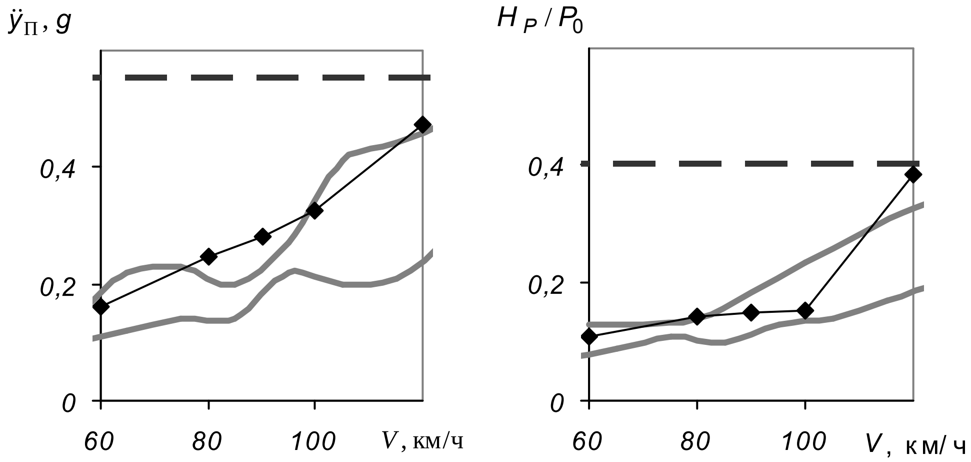

Рис. 2

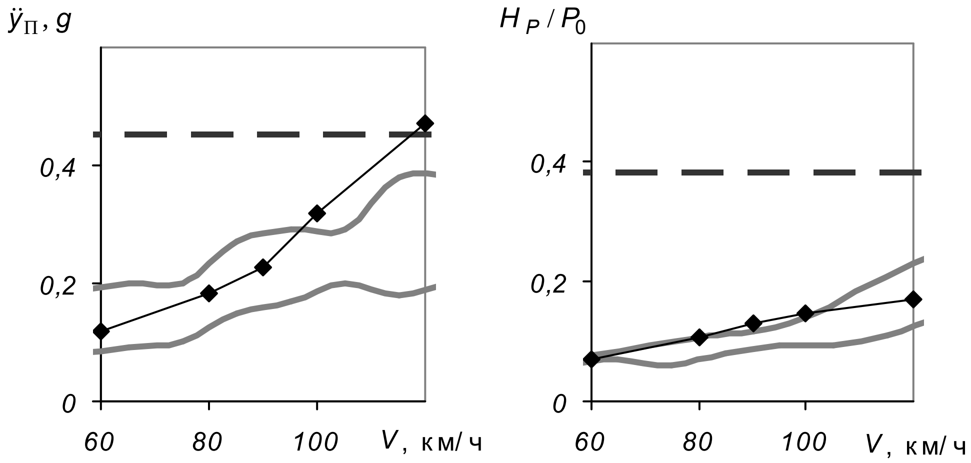

Рис. 3

Выводы. 1. Проведен анализ частотного состава неровностей пути в плане и изменения полуширины колеи, вычисленных с использованием записей показаний вагона-путеизмерителя на типичных участках магистрального пути Приднепровской железной дороги. Определены длины неровностей, которые можно считать характерными для такого пути, а также значения амплитуд неровностей пути с характерными длинами.

2. Сформирована модель горизонтальных составляющих расчетного возмущения в виде конечных сумм гармоник с параметрами, полученными по результатам амплитудно-частотного анализа реальных неровностей пути. Показано, что предложенная модель является приемлемой (с точки зрения близости результатов расчетов и экспериментальных данных) для проведения прогнозных расчетов по оценке максимальных значений динамических показателей порожних и груженых полувагонов.

1. *Лапина Л. Г.* Амплитудно-частотный анализ вертикальных неровностей железнодорожного пути / *Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко* // Техническая механика. – 2012. – № 3. – С. 9 – 15.
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. – 2013. – Вып. 4 (46). – С. 135 – 144.
3. *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.
4. 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., О. М. Патласов* – К. : Поліграфсервіс, 2012. – 46 с.
5. 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.
6. 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.
7. *Львовский Е. Н.* Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для втузов / *Е. Н. Львовский*. – М. : Высш. шк., 1988. – 293 с.
8. *Донченко А. В.* Оптимальна динаміка вантажних вагонів / *А. В. Донченко, В. В. Ільчишин* // Залізничний транспорт України. – 2007. – №1. – С. 67 – 70.
9. *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 07.04.2016,
в окончательном варианте 16.06.2016