

АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫЙ АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОТ ВЕРТИКАЛЬНЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Приведены результаты амплитудно-частотного анализа вертикальных неровностей железнодорожного пути, полученных по обработанным записям вагона-путеизмерителя.

Наведено результати амплітудно-частотного аналізу вертикальних нерівностей залізничної колії, отриманих за обробленими записами вагона-колівимірювача.

The results of the amplitude-frequency analysis of the vertical irregularities of the railway line obtained from the processed records of the track-measuring car are reported.

Неровности железнодорожного пути, вызванные различными по природе и характеру факторами, носят, как известно, случайный характер и, следовательно, имеют весьма многообразный частотный состав. Однако вклад разных частот может быть неодинаков, поэтому представляет интерес исследование частотного состава неровностей и соответствующих амплитудных значений.

Ниже приведены результаты анализа вертикальных неровностей пути, от которых зависит уровень показателей динамических качеств экипажа в вертикальной плоскости.

1. Определение характерных частот и амплитуд неровностей железнодорожного пути. Исследование частотного состава неровностей на различных участках пути можно проводить путем анализа их спектральных плотностей. Поскольку физический смысл спектральной плотности заключается в том, что она характеризует амплитуды гармоник с различными частотами, а доля энергии гармонических колебаний с частотами, при которых имеются значительные пики на графике спектральной плотности, велика, то можно считать, что для анализируемого процесса такие частоты $F^{\text{хар}}$ являются характерными.

При определении амплитуд гармонических компонент неровностей с найденными характерными частотами предлагается воспользоваться одним из описанных ниже способов.

Первый способ основан на вычислении значений дисперсии исследуемого процесса в выделенных частотных диапазонах. Для его реализации анализируемый частотный диапазон $[F_0, F_N]$ разбивается на N поддиапазонов с границами F_j , $j = \overline{0, N}$ таким образом, чтобы каждая из характерных частот процесса $F_j^{\text{хар}}$ принадлежала интервалу $[F_{j-1}, F_j]$, $j = \overline{1, N}$. Для каждого из них вычисляется дисперсия процесса σ_j^2 , $j = \overline{1, N}$ [1]:

$$\sigma_j^2 = \int_{F_{j-1}}^{F_j} S(F) dF,$$

где $S(F)$ – спектральная плотность анализируемого процесса.

Амплитуда гармонического процесса, имеющего дисперсию σ_j^2 , определяется согласно [2]:

$$A_j = \sqrt{2\sigma_j^2}.$$

Полученное значение A_j принимается в качестве амплитуды гармонической компоненты исходного процесса с частотой $F_j^{\text{хар}}$. Процесс, полученный суммированием гармонических компонент с определенными таким образом амплитудами, имеет такую же дисперсию, как и исходный.

Второй способ определения амплитуд гармонических компонент неровностей предполагает применение алгоритма цифровой фильтрации. Анализируемый частотный диапазон $[F_0, F_N]$ разбивается на N поддиапазонов таким же образом, как и в первом способе. К исходному процессу, т. е. к неровностям пути, применяется N полоснопропускающих фильтров, каждый из которых пропускает частоты только в диапазоне от F_{j-1} до F_j , $j = \overline{1, N}$. В результате таких вычислений формируется N процессов, которые можно считать квазигармоническими с основными частотами $F_j^{\text{хар}}$, $j = \overline{1, N}$. В качестве амплитуды $A_j^{\text{фильтр}}$, $j = \overline{1, N}$ каждого из полученных процессов принимается наибольшее значение его ординаты, однако, может оказаться целесообразным исключение резко выделяющихся значений с определенной доверительной вероятностью p [3].

2. Анализ вертикальных составляющих возмущений. В данной работе входное возмущение для динамических расчетов рельсовых экипажей рассматривалось как набор четырех составляющих: симметричной вертикальной неровности, характеризующей неровности профиля пути, кососимметричной вертикальной неровности, характеризующих превышение одной рельсовой нити над другой, а также горизонтальных неровностей правой и левой рельсовых нитей.

С использованием описанного в п. 1 подхода выполнен анализ частотного состава и амплитуд симметричной и кососимметричной вертикальных неровностей разных участков пути. В качестве исходного материала взяты записи показаний вагона-путеизмерителя ЦНИИ-2, полученные при плановой проверке состояния пути на Приднепровской железной дороге, причем выбраны участки пути, имеющие различную балльность [4]. Особенности измерительной, регистрирующей и обрабатывающей систем путеизмерителя ЦНИИ-2 позволяют достаточно точно восстанавливать спектры вертикальных неровностей для частот F от 0,0185 до 1,09 кол/м (или, что то же самое, для неровностей с длиной волны L от 0,9 до 54 м) [5, 6], поэтому именно в таком диапазоне и проводились исследования.

Анализ спектральных плотностей симметричных неровностей различных участков пути показал, что они имеют качественно одинаковый характер, в частности, не являются монотонными функциями. Несмотря на многообразие факторов, от которых зависят неровности пути, и случайный характер самих неровностей, в спектрах, соответствующих различным участкам пути, присутствуют одинаковые или достаточно близкие характерные частоты $F^{\text{хар}}$. Это позволяет сделать вывод, что такие частоты являются характерными для

неровностей профиля железнодорожного пути в целом. Такая же картина имеет место и для кососимметричных неровностей пути. При исследованиях неровностей пути во многих случаях удобнее оперировать понятиями, связанными не с частотой F , а с длиной волны неровности $L = 1/F$, поэтому в дальнейшем речь будет идти о характерной длине неровности.

Все неровности, присутствующие в спектре симметричных вертикальных неровностей пути разбиты на три группы: длинные (со значениями длины волны L от 20 до 54 м), средние (L от 6 до 20 м) и короткие (L от 0,9 до 6 м). Следует отметить, что вертикальные неровности каждой рельсовой нити длиной менее 12 м принимаются во внимание при определении балльной оценки состояния пути [4].

Принимая во внимание большое количество характерных частот в группе коротких неровностей, а также существенное влияние таких неровностей на динамические показатели экипажей, этот диапазон разбит на более мелкие. В каждом из выделенных диапазонов взято по одному значению L , равному среднему из характерных длин неровностей в данном диапазоне, полученных на различных участках пути.

Для определения амплитуд гармонических компонент симметричной вертикальной неровности выбран один из участков пути, который имеет наибольшую среди рассмотренных участков сумму баллов за вертикальные неровности (56 баллов) и самый высокий уровень спектральной плотности вертикальных неровностей практически во всем частотном диапазоне. Кроме того, использование возмущения U_0 , построенного по записям путеизмерителя на этом участке, позволяет при расчетах порожних полувагонов получить оценки динамических показателей, близкие к экспериментальным данным [7].

Результаты определения характерных длин симметричных вертикальных неровностей и соответствующих им амплитуд гармонических компонент приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, максимальные значения амплитуд гармонических компонент симметричной неровности пути, полученные с помощью алгоритма фильтрации, существенно превосходят значения, полученные по значениям дисперсий. Отсев резко выделяющихся значений уменьшает различие между результатами.

Для анализа кососимметричной вертикальной неровности пути выделены группы длинных (со значениями L от 20 до 54 м), средних (L от 10 до 20 м) и коротких (L от 0,9 до 10 м) неровностей. Такое разбиение на группы связано с тем, что при определении балльной оценки состояния пути принимается во внимание перекося рельсовых нитей длиной менее 20 м (т. е. учитываются средние и короткие неровности), при этом перекося длиной менее 10 м (короткие неровности) оценивается более строго [4]. Диапазон коротких неровностей разбит на более мелкие поддиапазоны. В каждом из выделенных диапазонов взято по одному значению L , равному среднему из характерных длин неровностей в данном диапазоне, полученных на различных участках пути. Для определения амплитуд гармонических компонент кососимметричной вертикальной неровности выбран тот же участок пути, который имеет наибольшую среди рассмотренных участков сумму баллов, начисленных за вертикальные неровности.

Результаты определения характерных длин неровностей и амплитуд гармонических компонент кососимметричной вертикальной неровности приведены в табл. 2.

Таблица 1

Группа и диапазон длин неровностей	Характерная длина неровности L , м	Амплитуда $a \cdot 10^{-4}$ м гармонических компонент симметричной вертикальной неровности пути, определенная			
		по значениям дисперсий	с помощью фильтрации		
			максимальная	отсев при $p=0,99$	отсев при $p=0,95$
Длинные (20 – 54 м)	39,7	32,4	69,6	48,5	36,9
Средние (6,2 – 20 м)	17,0	9,36	18,5	14,6	10,9
Короткие:					
5,1 – 6,2 м	6,0	1,85	6,22	2,99	2,24
4,2 – 5,1 м	5,0	1,83	5,84	2,85	2,12
3,6 – 4,2 м	4,1	1,56	4,39	2,29	1,74
2,5 – 3,6 м	3,3	2,64	4,97	4,27	3,12
1,5 – 2,5 м	2,3	1,37	9,54	1,89	1,39
0,9 – 1,5 м	1,1	0,52	2,68	0,71	0,54

Таблица 2

Группа и диапазон длин неровностей	Характерная длина неровности L , м	Амплитуда $a \cdot 10^{-4}$ м гармонических компонент кососимметричной вертикальной неровности пути, определенная			
		по значениям дисперсий	с помощью фильтрации		
			максимальная	отсев при $p=0,99$	отсев при $p=0,95$
Длинные (20 – 54 м)	33,0	12,6	30,1	27,6	20,9
Средние (10 – 20 м)	17,0	7,44	15,1	12,3	9,29
Короткие:					
8 – 10 м	8,2	6,05	10,7	8,28	6,24
6 – 8 м	6,2	4,65	12,9	6,99	5,33
4 – 6 м	4,9	2,33	5,88	3,83	2,90
3 – 4 м	3,7	1,56	6,63	2,70	2,12
1,8 – 3 м	1,9	3,40	11,6	5,52	4,13
0,9 – 1,8 м	1,1	0,69	5,04	1,01	0,76

Результаты выполненного амплитудно-частотного анализа неровностей железнодорожного пути позволяют проводить более глубокий анализ реакций движущихся по этим неровностям экипажей, а также строить полигармонические модели расчетного возмущения.

3. Построение полигармонической модели расчетного возмущения.

Основываясь на результатах амплитудно-частотного анализа вертикальных неровностей пути, можно построить достаточно простую модель входного возмущения, сформировав ее вертикальные составляющие (симметричную и кососимметричную) в виде линейной комбинации гармонических компонент:

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

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

Поскольку амплитуды каждой из гармоник (см. табл. 1, 2) изменяются в довольно широких пределах, очевидно, что можно построить не одну модель расчетного возмущения.

Чтобы лучше понять механизм действия такой модели возмущения на динамику экипажа, оценено влияние разных гармоник вертикальной симметричной составляющей возмущения на показатели динамических качеств полувагона в вертикальной плоскости (вертикальные ускорения пятников $\ddot{z}_П$ и коэффициенты вертикальной динамики кузова $K_{ДК}$). С этой целью выбран вариант вертикальной симметричной составляющей расчетного возмущения В0 (при $N=8$), в котором амплитуды всех коротких неровностей одинаковы и примерно равны среднему значению, определенному по дисперсиям (см. табл. 1). Вертикальная кососимметричная и обе горизонтальные составляющие такого возмущения приняты равными нулю.

Результаты расчетов для порожнего полувагона при возмущениях В0(39), В0(39, 17), В0(6-1), В0(2, 1) (в скобках указаны учитываемые длины неровностей) и В0 показаны на рис. 1. Как видно из рисунка, учет в возмущениях только длинных неровностей (возмущение В0(39)) или длинных и средних неровностей (возмущение В0(39, 17)) не позволяет рассматриваемым показателям хоть как-то приблизиться к результатам, полученным при расчетах с возмущением, соответствующим реальному участку пути (а именно, при задании симметричной составляющей возмущения U0 [7]). Учет всех коротких неровностей (возмущение В0(6-1)) дает результаты, близкие к результатам на реальном участке только при низких скоростях движения. При этом основной вклад в расчетные значения показателей приходится на неровности длиной 1 и 2 м (возмущение В0(2, 1)).

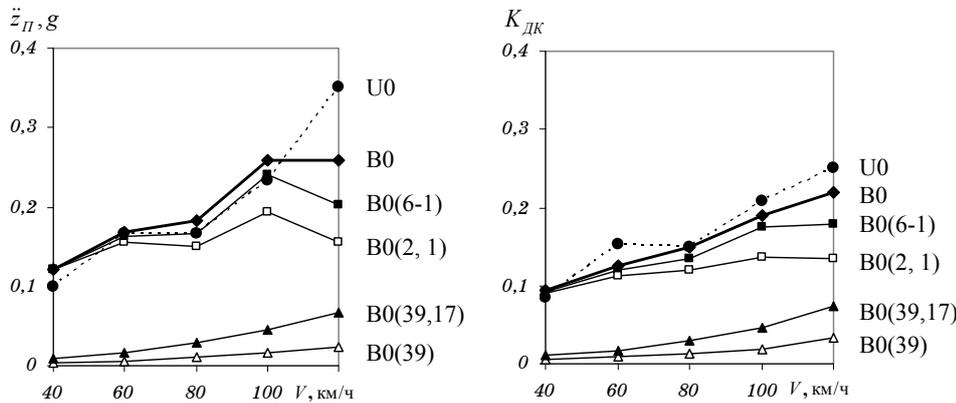


Рис. 1

Для оценки возможности использования построенных предложенным способом полигармонических моделей возмущения проведены расчеты по

определению показателей динамических качеств полувагонов. В качестве примера на рис. 2, 3 приведены зависимости от скорости движения максимальных значений вертикальных ускорений пятников \ddot{z}_{II} и коэффициентов вертикальной динамики K_{DK} кузова соответственно порожнего и груженого полувагонов, полученные при расчете с использованием одной из таких моделей (значения амплитуды a_i и длины неровности L_i , $i = 1, 8$ взяты из табл. 1, 2 для $p=0,99$). Серым цветом на рисунках показаны области экспериментальных значений показателей; горизонтальными штриховыми линиями нанесены уровни значений для «допустимого» хода вагона. Корректирующие коэффициенты, на которые нужно умножать вертикальные симметричные составляющие возмущения, приняты согласно [7].

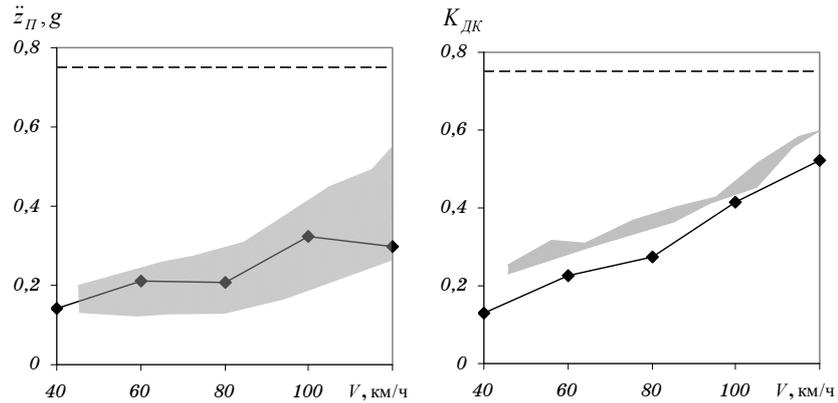


Рис. 2

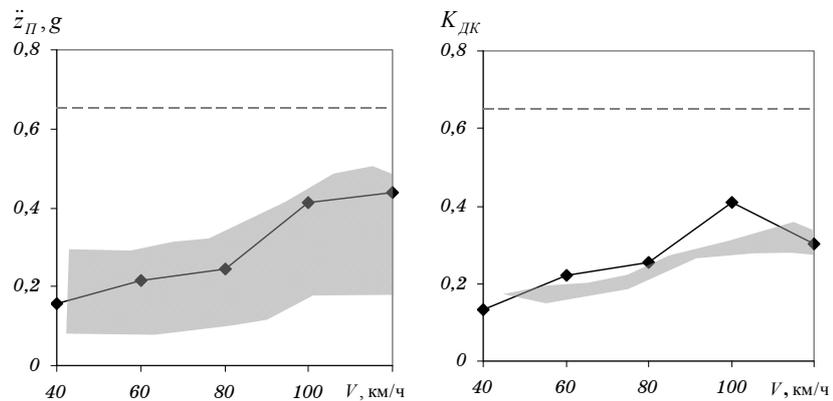


Рис. 3

Как видно из рисунков, расчетные значения \ddot{z}_{II} лежат в области экспериментальных данных. Уровень коэффициентов вертикальной динамики кузова K_{DK} несколько занижен по сравнению с нижней границей области экспериментальных данных для порожнего полувагона и завышен по сравнению с верхней границей для груженого полувагона (отличия находятся в пределах 20 %). Учитывая малый разброс экспериментальных данных для этого показателя, а также тот факт, что расчетная зависимость значений K_{DK} от скоро-

сти движения близка к экспериментальной, а сами значения не превышают предельно допустимые, полученные результаты можно считать приемлемыми.

Выводы.

1. Результаты анализа симметричной и кососимметричной вертикальных неровностей пути, построенных по записям вагона-путеизмерителя на разных участках Приднепровской железной дороги, показали, что в их спектрах присутствуют одинаковые или достаточно близкие характерные частоты. Можно считать, что такие частоты (и соответствующие им длины неровностей) являются характерными для железнодорожного пути в целом.

2. Определены возможные значения амплитуд неровностей железнодорожного пути с наиболее характерными длинами.

3. Результаты выполненного амплитудно-частотного анализа неровностей железнодорожного пути позволяют проводить более глубокий анализ реакций движущихся по этим неровностям экипажей.

4. Расчетные возмущения, построенные на базе модели, сформированной в виде конечных сумм гармоник, отражая в достаточной степени спектр неровностей железнодорожного пути, с учетом соответствующих корректирующих коэффициентов при вертикальной симметричной составляющей могут быть использованы при расчетах по оценке максимальных значений динамических показателей порожних и груженых полувагонов.

1. Бендат Дж. Применения корреляционного и спектрального анализа / Дж. Бендат, А. Пирсол. – Москва : Мир, 1983. – 312 с.
2. Отнес Р. Прикладной анализ временных рядов. Основные методы / Р. Отнес, Л. Энксон. – Москва : Мир, 1982. – 428 с.
3. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул : учеб. пособие для вузов / Е. Н. Львовский. – М. : Высш. шк., 1988. – 293 с.
4. Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колісвимірювальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії. – Київ, 2005. – 48 с.
5. 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.
6. Лапина Л. Г. Формирование расчетных входных возмущений по результатам спектрального анализа неровностей реальных участков железнодорожного пути / Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко // Техническая механика. – 2010. – № 2. – С. 10 – 18.
7. Лапина Л. Г. Особенности использования записей вагона-путеизмерителя при построении возмущений для динамических расчетов грузовых вагонов / Л. Г. Лапина, И. А. Мащенко // Техническая механика. – 2011. – № 1. – С. 3 – 11.

Институт технической механики
НАН Украины и НКА Украины,
Днепропетровск

Получено 20.03.12,
в окончательном варианте 20.03.12