

Выбор параметров горизонтальных связей рессорного подвешивания моторного вагона на четырех одноосных тележках в высокоскоростном электропоезде



А. Н. Савоскин,
д-р техн. наук, профессор
кафедры «Электропоезда
и локомотивы»
Института транспортной
техники и систем
управления Московского
государственного
университета путей
связи (ИТТСУ МИИТ)



А. А. Акишин,
аспирант кафедры
«Электропоезда
и локомотивы»
ИТТСУ МИИТ

В России планируется дальнейшее развитие высокоскоростного движения, которое невозможно без подвижного состава с улучшенными характеристиками. На кафедре «Электропоезда и локомотивы» Московского государственного университета путей сообщения (МИИТ) спроектирован рельсовый экипаж, который может успешно эксплуатироваться при скорости до 432 км/ч.

Разработка специалистами МИИТ – двухосная тележка, состоящая из двух сочлененных одноосных тележек с радиальной установкой колесных пар в кривой (рис. 1). В схеме предусмотрено непосредственное опирание кузова тележки на буксы, что создает третью ступень рессорного подвешивания. При этом соответствующим подбором упругих и диссипативных характеристик связей кузова с буксой, кузова с рамой тележки, а также рамы тележки с буксой мож-

но обеспечить работу рамы тележки в режиме динамического гасителя колебаний, что значительно улучшает показатели динамических качеств (ПДК) рельсовых экипажей.

В разработанной конструкции связь кузова с колесными парами выполнена с помощью двух пневморессор 1 диафрагменного типа. Рессоры установлены так, что их юбки расположены соосно и встречно направлены. При использовании указанной схемы рессорного подвешивания кузовов может совершать

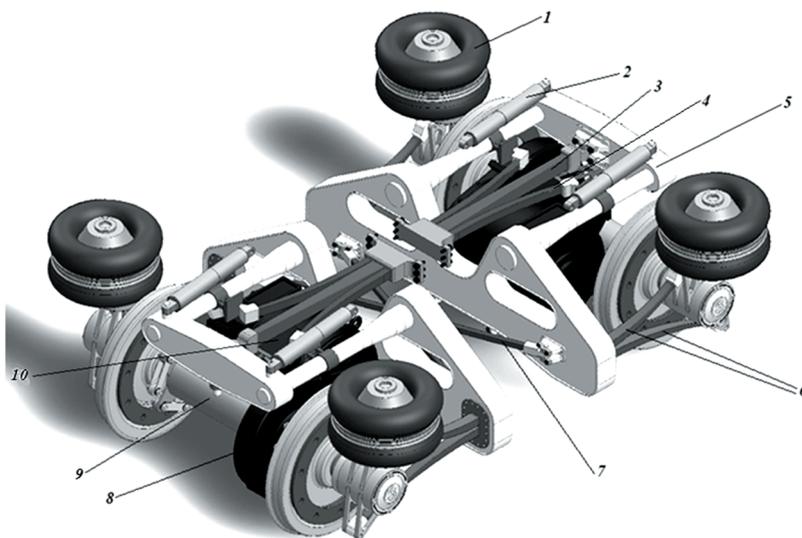


Рис. 1. Тележка с осевой формулой 10+10 с пневмоподвешиванием: 1 – пневморессора; 2 – гаситель колебаний; 3 – продольная тяга; 4 – возвращающее устройство; 5 – рама тележки; 6 – листовые композитные рессоры; 7 – диагональная тяга; 8 – редуктор; 9 – полый вал; 10 – тяговый электродвигатель

поперечные перемещения относительно колесных пар более 200 мм. Горизонтальная связь кузова с тележкой осуществляется при помощи возвращающего устройства на основе рессорных листов 4 из композитного материала, прилегающих к продольной тяге 3. Эта тяга передает продольные силы, действующие между кузовом и тележками и играет роль упругого элемента, подвешивающего наружный конец тележки к кузову.

В возвращающем устройстве имеется зазор между концами листовых рессор и ограничителем, расположенным на раме тележки 5, поэтому при небольших перемещениях кузова возвращающая сила не возникает. После выборки этого зазора листовая рессора начинает деформироваться, плечо приложения поперечной силы уменьшается и жесткость между кузовом и тележкой увеличивается по кубической параболе в зависимости от перемещений кузова относительно рамы тележки. Тем самым ограничиваются боковая качка кузова и его поперечные перемещения.

Внутренние концы одноосных тележек соединены между собой диагональными тягами 7 для синхронизации радиальной установки колесных пар в кривых участках пути и повышения критической скорости движения в прямых участках.

На раме установлен электродвигатель 10 с тяговой передачей III класса 8 и 9. Первая ступень рессорного подвешивания состоит из двух однолистных композитных рессор 6 для передачи вертикальных, продольных и поперечных сил от колесной пары к раме тележки. С одной стороны рессоры шарнирно прикреплены к корпусам букс в разных точках, а с другой соединены между собой хомутом, установленным в гнезде поперечной балки рамы тележки. Демпфирование горизонтальных колебаний виляния выполнено отдельными гасителями 2 на каждой тележке.

На первом этапе решалась задача выбора параметров рессорного подвешивания, обеспечивающих выполнение требований к боковым колебаниям, и исследовался этот вид колебаний. Для выбора параметров рессорного подвешивания применялся метод оптимизации с использованием в качестве целевой функции суммарной интенсивности выбросов случайных процессов ПДК $u_i(t)$ за допустимую область качества, образованную значениями $[u_i]$:

$$\Psi = \sum_{i=1}^m f_c(u_i) \exp\left\{-\frac{[u_i]}{2S(u_i)}\right\}. \quad (1)$$

При определении оптимальных параметров рессорного подвешивания исследуемого вагона было принято четыре показателя качества $m = 4$ и рассматривалась интенсивность выбросов в четырехмерном пространстве, образованными такими ПДК, как ускорение кузова в точке крепления тележек $\ddot{y}_{\Sigma k}$ и коэффициентов динамики в связях тележки с буксой $k^{T-кп}$, кузова с тележкой $k^{К-т}$ и кузова с буксой $k^{К-кп}$. Коэффициент плавности хода S определялся на основе результатов исследования колебаний экипажа с оптимальными параметрами рессорного подвешивания. Эта задача решалась при скорости движения 110 м/с (396 км/ч).

На рис. 2 показано некоторое множество промежуточных значений целевой функции и ПДК на различных этапах процедуры оптимизации в пятимерном пространстве. В этом пространстве каждый кружок соответствует совокупности нормированных значений ПДК U_1, U_2 и U_4 , диаметр кружка – величине U_3 , а цвет – значению целевой функции Ψ для каждого из выбранных номеров расчета. Нормированным значениям ПДК, равным единице, соответствуют:

1) U_1 – нормированный коэффициент динамики в связях тележки с буксой:

$$U_1 = \frac{k_{\Delta}^{T-кп}}{[k_{\Delta}^{T-кп}]}; \quad (2)$$

2) U_2 – нормированный коэффициент динамики в связях кузова с тележкой:

$$U_2 = \frac{k_{\Delta}^{К-т}}{[k_{\Delta}^{К-т}]}; \quad (3)$$

3) U_3 – нормированный коэффициент динамики в связях кузова с буксой:

$$U_3 = \frac{k_{\Delta}^{К-кп}}{[k_{\Delta}^{К-кп}]}; \quad (4)$$

4) U_4 – нормированное ускорение кузова в точке крепления тележек:

$$U_4 = \frac{\ddot{y}_{\Sigma k1}}{[\ddot{y}_{\Sigma k1}]}. \quad (5)$$

В знаменателях этих выражений приведены нормативные значения соответствующих ПДК.

Границы допустимых значений нормированных ПДК U_1, U_2 и U_4 изображены черной сеткой в виде единичного куба,

граница допустимого значения показателя U_3 изображена кружками по углам единичного куба, диаметр кружков соответствует значению $U_3=1$.

Видно, что после проведения 50 000 расчетов были получены совокупности параметров рессорного подвешивания, при которых все ПДК не выходят за допустимые пределы (рис. 2). Однако целевая функция еще не минимизирована и расчеты необходимо продолжать до получения точки, соответствующей расчету $N = 56198$ (точка 1 на рис. 2). При данной совокупности параметров рессорного подвешивания все ПДК находятся в допустимых пределах и суммарная интенсивность их выбросов за допустимые пределы минимальна.

Для определения зависимости ПДК системы от скорости движения был проведен расчет вынужденных боковых колебаний экипажа на четырех одноосных тележках с оптимальными параметрами при различных значениях скорости движения (от 10 до 120 м/с с шагом 10 м/с). Рессорное подвешивание предложенной тележки имеет нелинейные характеристики, поэтому при действии стационарного случайного возмущения колебания такого экипажа в общем случае будут не гауссовскими и не стационарными. К нестационарным системам не применима эргодическая теорема, и для получения вероятностных характеристик необходимо выполнять усреднение по множеству реализаций. В связи с этим для каждого значения скорости движения генерировались 4096 многомерных возмущений длительностью 38,1 с по 12 288 точек в каждом. Для каждой из $\sim 52 \cdot 10^6$ точек возмущения решалась система дифференциальных уравнений, описывающих боковые колебания моторного вагона электропоезда на четырех одноосных тележках, и вычислялись значения показателей его динамических качеств.

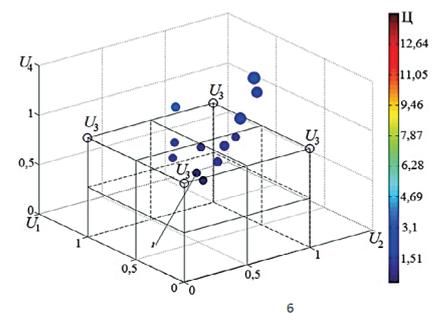


Рис. 2. Множество решений задачи оптимизации в пятимерном пространстве качества для некоторых номеров расчета из совокупностей 37000 – 56250

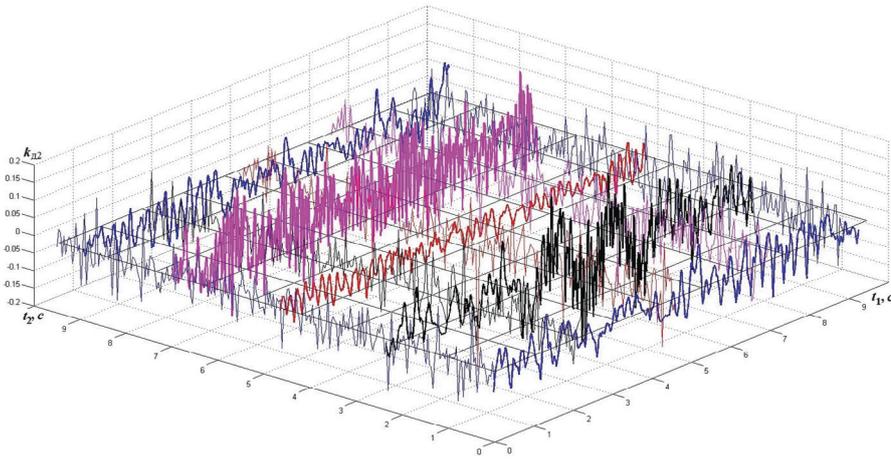


Рис. 3. Реализации случайного процесса коэффициента динамики в связи кузова с тележкой при скорости $v = 120$ м/с

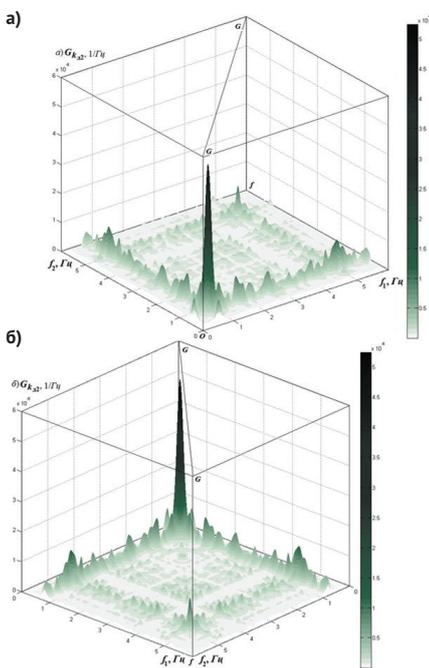


Рис. 4. Спектральная плотность реализации коэффициента динамики в связи кузова с тележкой при $v = 120$ м/с:

- а) вид из начала оси координат f_1, f_2 ;
- б) вид из конца оси координат f_1, f_2

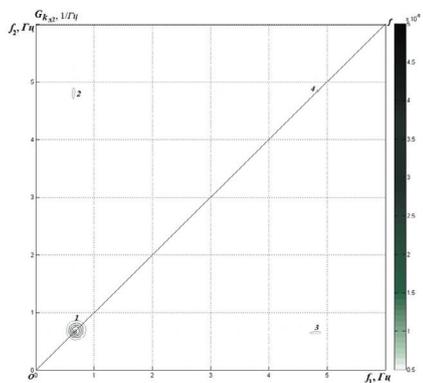


Рис. 5. Спектральная плотность реализации коэффициента динамики в связи кузова с тележкой при $v = 120$ м/с (вид сверху, 1–4 – максимумы спектральной плотности)

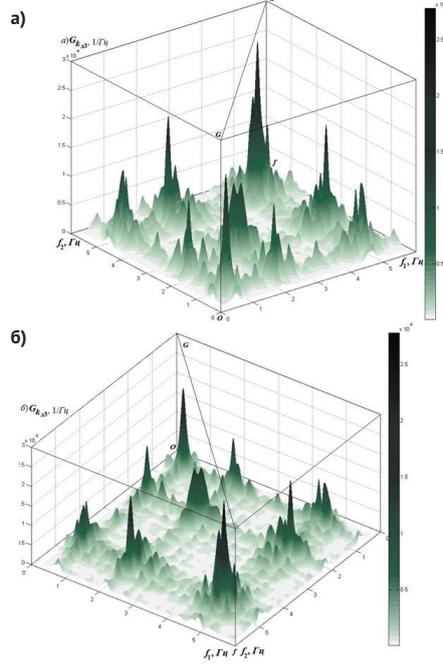


Рис. 6. Спектральная плотность реализации коэффициента динамики в связи кузова с колесной парой при $v = 120$ м/с:

- а) вид из начала оси координат f_1, f_2 ;
- б) вид из конца оси координат f_1, f_2

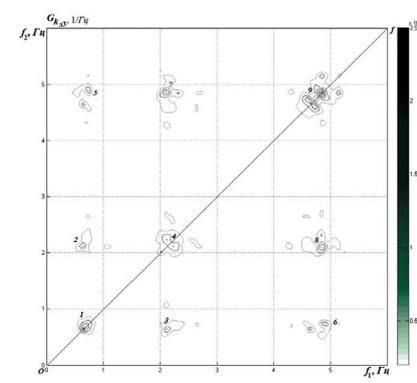


Рис. 7. Спектральная плотность реализации коэффициента динамики в связи кузова с колесной парой при $v = 120$ м/с (вид сверху, 1–9 – максимумы спектральной плотности)

Для примера приведем реализации случайных процессов коэффициента динамики во второй ступени рессорного подвешивания при скорости 120 м/с (рис. 3). Видно, что графики различных реализаций значительно различаются как по частотному составу, так и по амплитудам колебаний и при наложении не совпадают. Это свидетельствует о нестационарности исследуемых процессов. Аналогичный вид имели реализации процессов колебаний и других показателей динамических качеств.

При вероятностном анализе полученных случайных процессов вначале исследовались их двумерные плотности вероятностей $f[y(t_1), y(t_2)]$. Несмотря на нестационарность колебательных процессов эти плотности вероятностей могут быть сглажены двумерным законом распределения Гаусса, что можно объяснить большим количеством нелинейностей в составе системы.

По найденным плотностям вероятностей были выполнены расчеты автокорреляционных функций

$$R_y(t_1, t_2) = \int_0^\infty \int_0^\infty y(t_1)y(t_2) \times f[y(t_1), y(t_2), t_1, t_2] dy(t_1), dy(t_2) \quad (6)$$

и спектральных плотностей

$$G_y(f_1, f_2) = \int_0^{t_2} \int_0^{t_1} R_y(t_1, t_2) \times (\cos 2\pi f_1 t_1) (\cos 2\pi f_2 t_2) dt_1 dt_2 \quad (7)$$

Спектральная плотность $G(f_1, f_2)$ процесса коэффициента динамики в связи кузова с тележкой (рис. 4) имеет вид неотрицательной поверхности, симметричной относительно плоскости $OGGf$. На этом рисунке приведен вид на поверхность $G_y(f_1, f_2)$ со стороны начала координат $f_1 = f_2 = 0$ (рис. 4а) и со стороны $f_1 = f_2 = \infty$ (рис. 4б). Видно, что поверхность имеет ряд максимумов. Чтобы получить более наглядное представление о количестве максимумов спектральной плотности процесса коэффициента динамики в связи кузова с тележкой G_{kl}^{max} и их координатах f_{16i} и f_{26i} , рассмотрим рис. 5, на котором изображен вид $G_y(f_1, f_2)$ сверху.

Расположение максимумов симметрично относительно биссектрисы Of , проходящей через начало координат. На биссектрисе находится один основной максимум на частоте 0,75 Гц. Кроме того, на рис. 5 видны и все бо-

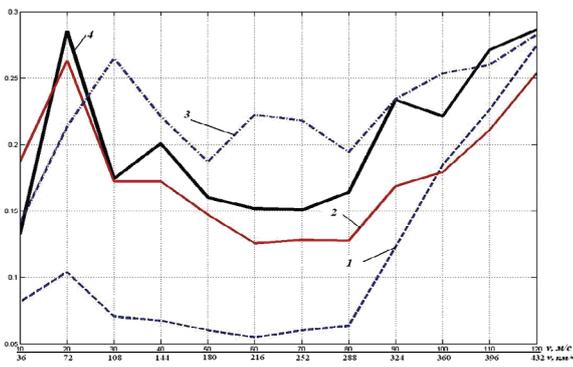


Рис. 8. Зависимость ПДК от скорости: коэффициенты динамики в связях:
 1 – тележки с буквой $k_{д1}$; 2 – кузова с тележкой $k_{д2}$; 3 – кузова с буквой k_3 ;
 4 – максимальное ускорение кузова в точке крепления тележек $\ddot{y}_{зк}$

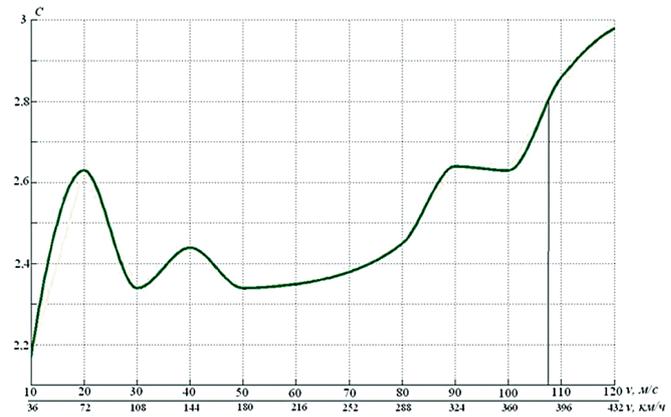


Рис. 9. График зависимости коэффициента плавности хода C от скорости движения v

ковые максимумы. Более сложный вид с большим количеством максимумов имеют спектральные плотности коэффициента динамики в связи кузова с колесной парой (рис. 6). Частоты максимумов, лежащих в плоскости $OGGf$, близки частотам максимумов спектральных плотностей боковых колебаний линеаризованных систем (рис. 7). Боковые максимумы на графиках $G_y(f_1, f_2)$ – следствие нелинейности характеристик рессорного подвешивания – соответствуют ультрагармоническим колебаниям нелинейных систем, проходящим с частотами, которые в два, три и более раз превышают частоту основных колебаний, соответствующих линеаризованной системе.

По графикам $G(f_1, f_2)$ были найдены дисперсии, эффективные частоты колебаний, средние значения абсолютных максимумов [1] – величины ПДК, и построены графики их зависимости от скорости движения (рис. 8). Видно, что ни одно из значений ПДК не выходит за свой допустимый уровень. Вместе с тем один из максимумов ПДК находится на скорости 20 м/с. Это объясняется следующим: при указанной скорости значения частоты основной гармоники возмущения и колебаний относительного кузова совпадают и возникает резонанс. При скорости выше 80 м/с ПДК увеличиваются и при скорости 120 м/с приближаются к своим допустимым значениям.

Коэффициент горизонтальной плавности хода C вычислялся по трехмерной спектральной плотности ускорений кузова по формуле

$$C = \alpha \sqrt[6,67]{2 \int_{f_n}^{f_k} \int_{f_n}^{f_k} a_n^2(f) G_{y_m}(f) df_1 df_2} \quad (8)$$

Из зависимости коэффициента горизонтальной плавности хода C от скорости видно, что он не превышает своего допустимого значения (рис. 9). При скорости до 108 м/с у экипажа отличное качество плавности хода, а при скорости более 108 м/с – хорошее.

Максимумы на рис. 9 находятся на тех же значениях скорости, что и максимумы ускорений кузова в шкворневых точках, и обосновываются теми же явлениями. Однако рост графика зависимости коэффициента плавности хода C более крутой, чем графика зависимости ускорения кузова в точке крепления тележек $\ddot{y}_{зк}$. Это объясняется следующим. При увеличении скорости движения основная гармоника возмущения приближается к частоте 5 Гц и возбуждает на ней колебания. На этой же частоте находится максимум характеристики физиологического фильтра человека, что и вызывает более крутой рост коэффициента плавности хода.

По приведенным зависимостям ПДК можно заключить, что спроектированный рельсовый экипаж может эксплуатироваться при скорости до 120 м/с, или 432 км/ч.

Таким образом, оптимизация параметров рессорного подвешивания предложенного высокоскоростного экипажа по критерию минимума суммарной интенсивности выбросов случайного процесса за допустимую четырехмерную область позволила выбрать значения этих параметров, обеспечивающие устойчивость боковых колебаний и выполнение требований к показателям динамических качеств при скорости движения до 432 км/ч (120 м/с). В результате исследования многомерных спектральных плотностей колебаний установлено, что в со-

ставе спектральных плотностей помимо основных максимумов на главной диагонали находятся боковые максимумы, расположенные на частотах f_1 и f_2 с соотношением $f_1/f_2 = 1/n$, где $n=1, 2, 3, \dots$

На основании зависимости показателей динамических качеств рассматриваемого экипажа от скорости движения установлено, что полученные значения не превышают нормативных при скорости движения до 120 м/с (432 км/ч). По графику зависимости коэффициента плавности хода от скорости движения высокоскоростного моторного вагона при скорости движения до 108 м/с у экипажа отличное качество плавности хода, а при скорости более 108 м/с – хорошее. Можно утверждать, что эксплуатация моторного вагона на одноосных тележках с оптимизированными параметрами рессорного подвешивания возможна в диапазоне скорости до 120 м/с (432 км/ч). ■

Литература

1. ГОСТ Р 55513-2013 Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2014. 77 с.
2. Акишин А.А. Боковые колебания экипажа с осевой формулой 1о+1о-1о+1о // Тр. конф. «Неделя науки 2012». СПб., 2012. С. II-87–III-88.
3. Савоськин А. Н., Васильев А.П., Ершов А.О., Акишин А.А. Исследование извилистого движения моторного вагона на одноосных тележках с пневмоподвешиванием // Безопасность движения поездов: тр. 13-й междунар. конф. М., 2012. С. VI-7–VI-8.