УДК 629.45.015

Ю. М. ФЕДЮШИН (Укрзализныця), А. Н. ПШИНЬКО, С. В. МЯМЛИН (ДИИТ),
А. В. ДОНЧЕНКО (Украинский научно-исследовательский институт вагоностроения),
Л. М. ЛОБОЙКО (Укрзализныця)

ОСНОВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПАССАЖИРСКОГО ВАГОНА

Запропоновано наводиться опис основних динамічних показників якостей пасажирського вагона його і впливу на колію. А також описано алгоритм оцінки стійкості руху за Ляпуновим.

Предложено описание основных динамических показателей качества пассажирского вагона и его воздействия на путь. А также описан алгоритм оценки устойчивости движения по Ляпунову.

In article the description of the basic dynamic parameters of quality of the carriage and its influence on a way is resulted. And also the algorithm of an estimation of stability of movement on Lyapunov is described.

Для оценки динамических качеств вагона и воздействия его на путь при движении по прямолинейным участкам пути определяются следующие динамические показатели (здесь использованы обозначения для математической модели в обычной постановке):

- в вертикальной плоскости:

1) коэффициент вертикальной динамики обрессоренной части вагона по силам в центральном рессорном подвешивании определяется как отношение динамической добавки вертикальной силы в одном центральном рессорном комплекте к статической нагрузке, приходящейся на один комплект:

$$k^{\text{о}}_{\text{дв}ij} = \frac{S_{\text{ц}zij}}{mg/4};$$

2) коэффициент вертикальной динамики необрессоренной части вагона по силам в буксовом подвешивании определяется как отношение динамической добавки вертикальной силы в одном буксовом рессорном подвешивании к статическому давлению колеса на рельс $P_{\text{ст}}$

$$k^{\text{н}}_{\text{дв}imj} = \frac{S_{\text{б}zimj}}{P_{\text{ст}}};$$

3) коэффициент вертикальной динамики пути по силам взаимодействия колес и рельсов определяется как отношение вертикальной силы взаимодействия колеса и рельса к статическому давлению колеса на рельс:

$$k^{\text{п}}_{\text{дв}imj} = \frac{S_{\text{в}zimj}}{P_{\text{ст}}};$$

4) ускорения пятников кузова вагона в долях g:

$$\frac{\ddot{z}_{ni}}{g} = \frac{\ddot{z} + (-1)^i l\ddot{\varphi}}{g};$$

5) перевалка кузова относительно тележек $\Delta\theta_i$;

6) соответствующие линейные и угловые перемещения элементов рельсового экипажа в вертикальной плоскости;

- в горизонтальной плоскости:

1) коэффициент горизонтальной динамики обрессоренной части вагона по силам в центральном рессорном подвешивании определяется как отношение горизонтальной поперечной силы в одном центральном рессорном комплекте к статической нагрузке, приходящейся на один комплект:

$$k^{\text{о}}_{\text{дг}ij} = \frac{S_{\text{ц}yij}}{mg/4};$$

2) коэффициент горизонтальной динамики необрессоренной части вагона по силам в буксовом подвешивании определяется как отношение суммы горизонтальных поперечных сил в буксовых рессорных комплектах одной колесной пары (рамная сила $H_{\text{р}im}$) к статической осевой нагрузке $P_{\text{ос}} = P_{\text{ст}}$:

$$k^{\text{н}}_{\text{дг}im} = \frac{\sum_{j=1}^{2} S_{\text{б}yimj}}{2P_{\text{ст}}} = \frac{H_{\text{р}im}}{P_{\text{ос}}};$$

3) коэффициент горизонтальной динамики пути по горизонтальным силам взаимодействия колес и рельсов определяется как отношение горизонтальных поперечных сил взаимодействия колеса и рельса к статическому давлению колеса на рельс:

$$k^{\text{п}}_{\text{гв}imj} = \frac{S_{\text{ву}imj}}{P_{\text{ст}}};$$

4) ускорения пятников кузова вагона в долях g:

$$\frac{\ddot{y}_{\text{п}i}}{g} = \frac{\ddot{y} + (-1)^i l\ddot{\psi} - h\ddot{\theta}}{g};$$

5) отжатия рельсов $y_{\text{р}imj}$ и боковые силы, равные

$$H_{\text{б}imj} = y_{\text{р}imj}\kappa_{\text{р}},$$

где $\kappa_{\text{р}}$ – жесткость рельсов в горизонтальном поперечном направлении;

6) боковой относ колесных пар $y_{\text{к}im}$;

7) забегание боковин $x_{\text{б}i1} - x_{\text{б}i2}$;

8) виляние колесной пары $\psi_{\text{к}im}$;

9) виляние тележки относительно кузова $\Delta\psi_i$.

По криволинейным участкам пути определяются следующие динамические показатели:

1) направляющие силы определяются как произведение полной вертикальной силы взаимодействия колеса и рельса на тангенс угла наклона поверхности катания колеса к плоскости пути:

$$H_{\text{н}imj} = \left(S_{\text{в}zimj} + P_{\text{ст}}\right)tg\alpha_{imj};$$

2) коэффициент устойчивости колесной пары против схода с рельса

$$K_{\text{у}} = \frac{tg\beta - \mu}{1 + \mu tg\beta}\ \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{б}}} \geq \left[K_{\text{у}}\right],$$

где β – угол наклона образующей конусообразной поверхности гребня колеса с горизонталью, для колес со стандартным профилем $\beta = 600$; μ – коэффициент трения поверхностей колес и рельсов, принимается μ=0,25; $P_{\text{в}}$ – вертикальная нагрузка от набегающего колеса на рельс; $P_{\text{б}}$ – боковое усилие взаимодействия гребня набегающего колеса и головки рельса; [$K_{\text{у}}$] – допускаемое значение коэффициента запаса устойчивости;

3) фактор износа (по направляющим силам) определяется как произведение направляющей силы на угол набегания колесной пары (при положительной кривизне кривой рассматривается фактор износа на левом рельсе, т. е. при $\psi_{\text{к}im} < 0$):

$$\Phi_{im1} = H_{\text{н}im1}\left|\psi_{\text{к}im}\right|.$$

Для каждого из динамических показателей определяются минимальное значение ($F_{\min}$), абсцисса пути, при которой оно было достигнуто ($X_{\min}$), максимальное значение ($F_{\max}$), соответствующая абсцисса пути ($X_{\max}$), среднее значение на участке (*M*), дисперсия (*D*), среднее квадратичное значение (S) и максимально вероятное значение $\left(M + 2{,}5|S|\right)$ при доверительной вероятности $P_{\text{д}} = 0{,}95$.

Одним из важных динамических показателей является плавность хода.

Согласно ОСТ 24.050.16-85 [1] оценка плавности хода W производится по формуле

$$W = \left(q_{\text{m}}\sigma_H\right)^{0{,}3}, \tag{1}$$

где $q_m = 1{,}34$ или 1,71 для вертикальных или горизонтальных колебаний соответственно; σ_H – среднее квадратичное значение процесса ускорения, откорректированного «физиологическим» фильтром с нормированной частотной характеристикой $q_H(f)$.

Нормированная частотная характеристика «физиологического» фильтра имеет вид

$$q_H(f) = A\frac{2\pi f T_4}{\sqrt{v_1 + \left(2\pi f T_4\right)^2}}\ \sqrt{\frac{v_1 + \left(2\pi f T_3\right)^2}{\left(1 - \frac{f^2}{f_0^2}\right) + \left(2\pi f T_1\right)^2}}, \tag{2}$$

где f – частота, Гц; резонансная частота

$$f_0 = \frac{1}{2\pi v T_1 T_2}.$$

Передаточная функция такого фильтра выражается формулой

$$Q(p) = A\frac{pT_4}{1 + pT_4}\cdot\frac{1 + pT_3}{1 + pT_1 + p^2T_1T_2}. \tag{3}$$

Вычислять частотную характеристику (2) непосредственно по приведенной формуле возможно при проведении исследований в частотной области. Поскольку в данной работе проводится интегрирование системы дифференциальных уравнений, то есть расчеты выполняются во временной области, то необходимо моделировать указанную частотную характеристику системой дифференциальных уравнений. Этот переход осуществлен в работе [2].

Если принять, что $x(t)$ – сигнал, поступающий на вход фильтра, а $Z(t)$ – сигнал, снимаемый с его выхода, то, обозначив их преобразование Лапласа в виде $\bar{x}$ и $\bar{z}$, получим

$$\left(p+\frac{1}{T_4}\right)\left(p^2+\frac{1}{T_2}p+\frac{1}{T_1T_2}\right)\bar{z}=A\frac{T_3}{T_1T_2}\left(p^2+\frac{1}{T_3}p\right)\bar{x}\,. \quad (4)$$

Допустим, что дифференциальные уравнения системы, имеющей передаточную функцию (3), можно записать в виде:

$$\left.\begin{aligned}\dot{z}&=a_1y-b_1z+c_1x;\\ \dot{y}&=-a_2y+c_2x+d_2u;\\ \dot{u}&=-a_3y-d_3u.\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

Уравнения (5) в операторной форме преобразуются так

$$\left(p+b_1\right)\left[p^2+\left(a_2+d_3\right)p+\left(a_2d_3+a_3d_2\right)\right]\bar{z}=$$

$$=c_1\left[\left(p^2+a_2+d_3+\frac{c_3}{c_1}a_1\right)p+\right.$$

$$\left.+\left(a_2d_3+a_3d_2+\frac{c_2}{c_1}a_1d_3\right)\right]\bar{x}. \quad (6)$$

Из сопоставления выражений (4) и (6) следует:

$$\left.\begin{aligned}&a_1=\frac{T_2-T_1}{T_2T_3};\ a_2=\frac{T_1T_3-T_1T_2-T_2T_3}{T_1T_2\left(T_3-T_2\right)};\ a_3=\frac{T_1T_2-T_1T_3-T_3^2}{T_1\left(T_3-T_2\right)^2};\\ &b_1=\frac{1}{T_4};\ c_1=c_2=A\frac{T_3}{T_1T_2};\ d_2=1;\ d_3=\frac{T_3}{T_1\left(T_3-T_2\right)}.\end{aligned}\right\} \quad (7)$$

Дополнив систему (5) уравнением для вычисления дисперсии D сигнала z на интервале времени T и подставив численные значения T_1, T_2, T_3 и T_4, взятые из ОСТ 24.050.16, получим:

$$\left.\begin{aligned}\dot{z}&=-16,75y-3,12z-\frac{31,2}{m}x;\\ \dot{y}&=28,1y+\frac{31,2}{m}x+u;\\ \dot{u}&=-2875y-64,7u;\\ \dot{D}&=\frac{1}{T-\tau}z^2\sigma_0\left(t-\tau\right),\end{aligned}\right\} \quad (8)$$

где m – масштаб x измеренного процесса; D – дисперсия процессов на выходе «физиологического» фильтра, среднее квадратичное значение которой подставляем в формулу (1); T – время решения; τ – период затухания переходного процесса в фильтре,

$$\sigma_0(t-\tau)=\begin{cases}0, & t<\tau;\\ 1, & t\ge\tau.\end{cases}$$

Система уравнений (8) может решаться численно с помощью любой ЭВМ с постоянным шагом интегрирования, равным шагу квантования исследуемого процесса. В системе (8) последнее уравнение может быть исключено, а текущее значение дисперсии D вычисляется обычными методами. По этому алгоритму можно оценить плавность хода экипажа при теоретических исследованиях.

Таким образом, описанная процедура моделирует «физиологический» фильтр системой трех дифференциальных уравнений первого порядка. Двумя такими системами и дополнены разработанная математическая модель и программа вычислений (одна для вертикальных ускорений, другая - для горизонтальных поперечных ускорений). В результатах расчетов приводятся значения показателей вертикальной ($W_\text{в}$) и горизонтальной поперечной ($W_\text{г}$) плавности хода.

В тех случаях, когда движение рельсовых экипажей является устойчивым по Ляпунову, обычно силы взаимодействия экипажа и пути в горизонтальной плоскости и его перемещения невелики. Поэтому исследования устойчивости движения рельсовых экипажей предваряют исследования взаимодействия экипажа и пути. В данной работе также предварительно выполнено исследование устойчивости движения рельсовых экипажей с различными характеристиками рессорного подвешивания и конструктивными особенностями тележек.

Исследование устойчивости движения рельсового экипажа производится по первому приближению Ляпунова [3], для чего необходимо предварительно выполнить линеаризацию нелинейной системы дифференциальных уравнений движения.

При линеаризации вводятся дополнительные допущения: сухое трение заменяется эквивалентным вязким; пята кузова является шарнирной с упругой связью; зазоры между скользунами отсутствуют, а сами скользуны имеют упругую характеристику; профиль поверхности катания колеса предполагается линейным; зазор в рельсовой колее не рассматривается; силы псевдоскольжения определяются по теории Картера, т. е. линейно зависят от проскальзывания колес и не зависят от вертикального давления колеса на рельс (коэффициент псевдоскольжения принят постоянным); путь в вертикальном направлении принимается жестким, а в горизонтальном поперечном направлении – упругим; неровности пути отсутствуют.

Система дифференциальных уравнений после линеаризации принимает следующий вид:

$$A\ddot{\vec{q}} + B\dot{\vec{q}} + C\vec{q} = 0, \qquad (9)$$

где A, B, C – матрицы соответственно инерционных, диссипативных и квазиупругих коэффициентов, причем в матрицы B и C включены соответствующие слагаемые сил псевдоскольжения; $\vec{q}$ – вектор обобщенных координат.

После приведения системы линейных дифференциальных уравнений (9) к нормальной форме Коши получим:

$$\dot{\vec{x}} = D\vec{x}, \qquad (10)$$

где D – матрица коэффициентов уравнений, имеющая следующий вид:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & E \\ -A^{-1}C & -A^{-1}B \end{bmatrix}, \qquad (11)$$

где E – единичная матриц; A^{-1} – обратная матрица; $\vec{x}$ – вектор фазовых координат.

Для исследования устойчивости движения определяются собственные числа λ_i матрицы D, которые затем располагаются в порядке убывания вещественных частей $h_i = \operatorname{Re}\lambda_i$. По величине наибольшей вещественной части $h_{\max}$ судят об устойчивости движения рельсового экипажа: если $h_{\max} < 0$ – движение экипажа асимптотически устойчиво, если $h_{\max} > 0$ – движение экипажа неустойчиво. Величина $h_{\max}$ зависит от скорости движения. Строится график этой зависимости $h_{\max}(V)$. Скорость, при которой величина наибольшей вещественной части $h_{\max}$ собственных чисел матрицы D меняет свой знак, называется критической скоростью движения $V_{\text{кр}}$. Для определения этой скорости находятся величины скорости движения V^-, при которой наибольшая вещественная часть собственных чисел еще отрицательна ($h^-_{\max}$), а затем величина скорости движения V^+, при которой наибольшая вещественная часть уже положительна. После этого критическая скорость движения определяется по формуле

$$V_{\text{кр}} = \frac{h^+_{\max} \cdot V^+ - h^-_{\max} \cdot V^-}{h^+_{\max} - h^-_{\max}}. \qquad (12)$$

При проведении теоретических исследований динамической нагруженности пассажирских вагонов конструкции Крюковского вагоностроительного завода на тележках различных моделей расчеты по определению устойчивости движения предшествовали определению динамических показателей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вагоны пассажирские. Методика определения плавности хода. ОСТ 24.050.16-85. – 16 с.
2. Манашкин Л. А. Оценка плавности хода железнодорожных экипажей с помощью ЭВМ / Л. А. Манашкин, Р. Б. Грановский, А. Р. Поплавская // Исследование колебаний подвижного состава. – Д.: ДИИТ. – Вып. 158. – 1975. – С. 103–106.
3. Лазарян В. А. Устойчивость движения рельсовых экипажей / В. А. Лазарян, Л. А. Длугач, М. Л. Коротенко. – К.: Наук. думка, 1972. – 193 с.

Поступила в редколлегию 05.03.2005.