



УДК 630*377

Э.М. Гусейнов, Р.Э. Гусейнов

Гусейнов Эльдар Муса оглы родился в 1949 г., окончил в 1972 г. Ленинградскую лесотехническую академию, доктор технических наук, профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств С.-Петербургской государственной лесотехнической академии. Имеет более 60 печатных трудов в области механизации лесохозяйственных работ.



ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНОГО СОРТИМЕНТОВОЗА С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ ПОДВЕСОМ

Изложены графоаналитическое моделирование двухступенчатого подвеса СВ, интегральная вибронагруженность по ступеням подвеса и параметрическая оптимизация упруго-диссипативных связей, в том числе нелинейных.

Ключевые слова: уравнения состояния, дисперсии реакций, параметры связей, минимизация, оптимальные параметры.

Вибронагруженность ходовой части сортиментовоза (СВ) зависит от взаимодействия шин и пути, надежности и долговечности подвеса, плавности хода машины. Параметрическая оптимизация упруго-диссипативных связей подвеса – основной путь снижения его вибронагруженности и, как следствие, повышения плавности хода машины.

На рис. 1 приведена расчетная схема трехосного СВ в продольно-вертикальной плоскости симметрии базой рамного блока $l = l_1 + l_2$ и тележки l_T , где обозначены:

m, J – масса и момент инерции рамного блока;

m_1, m_2 – массы колесной пары с мостом и двухосной тележки;

$c_{к1}, c_{к2}, c_{р1}, c_{р2}$ – жесткости шин и рессор переднего/заднего подвеса;

$\beta_{к1}, \beta_{к2}, \beta_{р1}, \beta_{р2}$ – линеаризованные параметры демпфирования;

$x_{1,2}, x_{к1,2}$ – вертикальные деформации рессор и шин:

$$x_{1,2} = z \pm l_{1,2}\varphi - z_{1,2}; \quad x_{к1,2} = z_{1,2} - z_{к1,2}; \quad h_0 = h_c h_{ш} / r.$$

Уравнения Лагранжа для модели рис. 1 с квазисимметрией $J = (1 \pm 0,2) m l_1 l_2$ в операторно-матричной форме $d / dt = p$ имеют вид

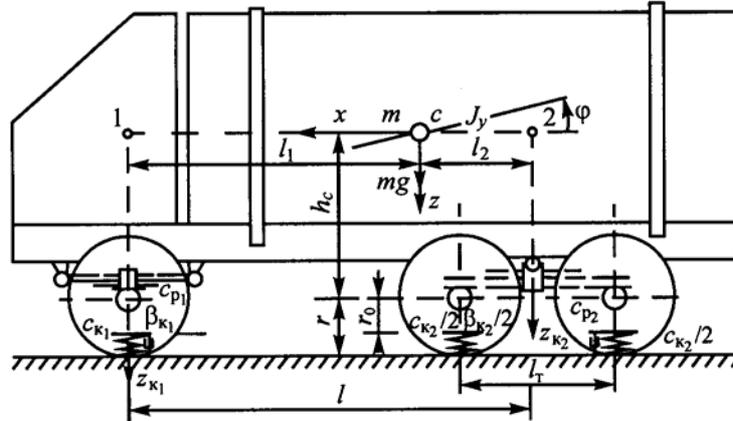


Рис. 1. Расчетная схема двухступенчатого подвеса сортировоза в продольно-вертикальной плоскости симметрии

$$\begin{pmatrix} m_{\text{п}} p^2 + \beta_{\text{п}} p + c_{\text{п}} & m_{\text{п}} p^2 & -m_{\text{п}} p^2 z_{\text{к}}(p) \\ -(\beta_{\text{п}} p + c_{\text{п}}) & m_{\text{к}} p^2 + \beta_{\text{к}} p + c_{\text{к}} & -m_{\text{к}} p^2 z_{\text{к}}(p) \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Определитель системы

$$\Delta(p) = p^4 \mu_0 m_{\text{п}}^2 + p^3 m_{\text{п}} (\beta_{\text{п}} \mu_0 + \beta_{\text{к}}) + p^2 [m_{\text{п}} (c_{\text{п}} \mu_0 + c_{\text{к}}) + \beta_{\text{п}} \beta_{\text{к}}] + p (\beta_{\text{п}} c_{\text{к}} + \beta_{\text{к}} c_{\text{п}}) + c_{\text{к}} c_{\text{п}}, \quad \mu_0 = 1 + \mu. \quad (2)$$

Малая и даже ограниченная диссипация ($\nu \leq 0,32$) весьма слабо влияет на частоты системы. Поэтому их обычно вычисляют из частотного уравнения $\Delta(\lambda^2) = 0$ при $\beta_{\text{к}} = \beta_{\text{п}} = 0$, $p = i\lambda$, $i = \sqrt{-1}$, а при ограничениях $\mu \leq 0,2$, $c_{\text{п}} / c_{\text{к}} \leq 0,3$ получают методом итераций:

$$\lambda_1^2 \approx \nu_{\text{п}}^2 \delta; \quad \delta = f_{\text{п}} / f_{\Sigma}; \quad \nu_{\text{п}}^2 = \frac{c_{\text{п}}}{m_{\text{п}}} = \frac{g}{f}; \quad \lambda_2^2 \approx \frac{\mu_0}{\mu} = \frac{\lambda_1^2}{\delta(1-\delta)}, \quad (3)$$

где δ – доля прогиба рессор $f_{\text{п}}$ от суммарного $f_{\Sigma} = f_{\text{п}} + f_{\text{к}}$.

Передаточные функции деформаций связей (рессор x и шин $x_{\text{к}}$ заднего подвеса) по матрице (1) и Крамеру равны:

$$\begin{aligned} \eta_x(p) &= \Delta_x(p) / \Delta(p) z_{\text{к}}(p) = k_0 m \omega^2 (c_{\text{к}} + \beta_{\text{к}} p) / \Delta(p); \\ \eta_{x_{\text{к}}}(p) &= \Delta_{x_{\text{к}}}(p) / \Delta(p) \quad z_{\text{к}}(p) = k_0 m \omega^2 [\mu m_{\text{п}} p^2 + \mu_0 \beta_{\text{п}} p + \mu_0 c_{\text{п}}] / \Delta(p), \end{aligned} \quad (4)$$

где k_0 – усредненный по теореме Лагранжа о среднем коэффициент осности тележки.

В задачах параметрической оптимизации с использованием стандартных интегралов дисперсий реакций подвеса СВ и получением инженер-

ных расчетных формул весьма важны простейшие аппроксимации* спектра неровности пути, отражающие доминирующую кривую спектральной плотности.

Дисперсии деформации x_k , x реакции $R_k = c_k x_k$, $P_p = c_p x + \beta_p \dot{x}$ и скорости деформации \dot{x} при $p = i\omega$, $\beta_k \approx 0$ и простейшей аппроксимации спектра неровности пути $S_k = \zeta v / \omega^2$:

$$\begin{aligned} D_{r_k} &= c_k^2 D_{x_k} = \frac{c_k^2}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\eta_{x_k}(i\omega)|^2 S_k(\omega) d\omega = \\ &= \zeta v \frac{c_p c_k}{8\vartheta_p v_T} \mu_0 \left[\mu_0 \delta_k - 2\mu + \frac{\mu}{\delta_k} + 4\vartheta_p \mu_0 \right]; \quad (5) \\ \delta_k &= f_k / f_p; \quad \vartheta_p = \beta_p / 2\sqrt{c_p m_n}; \end{aligned}$$

$$D_{\dot{x}} = \zeta v c_k / (4\beta_p); \quad D_x = \zeta v m_n \mu_0 / (4\beta_p); \quad R_p = \beta_p \dot{x} + c_p x; \quad (6)$$

$$D_p = \beta_p^2 D_{\dot{x}} + c_p^2 D_x = \frac{\zeta v}{4} (c_k \beta_p + \mu_0 m c_p^2 / \beta_p).$$

Функционал $D_{r_k}(\alpha_i)$ пропорционален воздействию пути ζv , жесткостям подвеса c_p , c_k и имеет минимум по соотношениям $\delta_k = f_k / f_p$ и $\vartheta_p = \beta_p / \beta_{p_{кр}}$; $\beta_{p_{кр}} = 2\sqrt{c_p m_n}$. Минимизация дисперсии $D_{r_k}(\delta_k, \vartheta_p)$ дает оптимальные расчетные соотношения:

$$\begin{aligned} \partial D_{r_k} / \partial \alpha_i &= 0; \quad \delta_k^0 = f_k / f_p = \sqrt{\mu / \mu_0}; \quad \delta^0 = f / f_{\Sigma} = (1 + \delta_k)^{-1}; \quad (7) \\ \vartheta_p^0 &= [\delta_k \mu_0 + \mu(\delta_k^{-1} - 2)] / (4\mu_0); \quad \beta_p^0 = 2\vartheta_p^0 \sqrt{c_p m_n}. \end{aligned}$$

Для $\mu = 0,2$, $\mu_0 = 1,2$ имеем $\delta_k^0 = 0,41$; $\delta^0 = 0,71$; $\vartheta_p^0 = 0,35$.

Функционал $D_p(\alpha_i)$ пропорционален возмущению пути ζv , жесткостям c_k , c_p^2 и имеет минимум по параметру диссипации $\beta_p = 2\vartheta_p \sqrt{c_p m_n}$:

$$\frac{\partial D_p}{\partial \beta_p} = 0; \quad \beta_p^{0,2} = \frac{\mu_0 m c_p^2}{c_k}; \quad \vartheta_p^0 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\mu_0 c_p}{c_k}} = \frac{\sqrt{\delta_k}}{2}; \quad \delta_k = \frac{f_k}{f_p}. \quad (8)$$

При $\mu = 0,2$ $\delta_k = 0,41$; $\vartheta_p^0 = 0,32$. Результаты оптимизации (7), (8) по критериям вибронгруженности и плавности хода отличаются незначительно. Более того, при $\mu \leq 0,2$ $\delta \geq 0,75$ в первой ступени подвеса (шинах) не требуется автономного демпфирования. Этим достигаются высокие виброзащитные качества подвеса.

* Варова, В.И. Снижение нагруженности колесных лесохозяйственных машин и лесной почвы [Текст]: науч. изд. / В.И. Варова, Э.М. Гусейнов. – СПб.: Изд-во СПГУ, 2005. – 324 с.

При наличии диссипации (β_p, β_k) в двух ступенях подвеса минимизация функционала $D_p(\beta_p, \beta_k)$ дает их оптимальные значения:

$$\partial D_p / \partial \beta_i = 0; \quad \beta_p^0 = mc_p^2 / c_k = \varepsilon mc_p; \quad \beta_k \approx \beta_p \left(\sqrt{1 + (\mu/\varepsilon)^2 / \mu_0} - 1 \right). \quad (9)$$

Минимизируя функционал $D_p(\beta_k)$ при расчетном значении β_p^0 (7), (8), получаем

$$\partial D_p / \partial \beta_i = 0; \quad \beta_k \approx \beta_p \mu^2 (8\vartheta_p^2 \delta_k)^{-1} \approx \frac{\beta_p \mu^2}{2\delta_k^2} \approx 0,15\beta_p. \quad (10)$$

Для оптимальных параметров жесткости и диссипации вибронгруженность подвеса и пути (почвы) минимальны. В частности, для $\beta_p = c_p \sqrt{\mu_0 m / c_k}$ (формула (8) при $\beta_k \approx 0$ дисперсия реакции подвеса равна:

$$D_p = \frac{\zeta v}{4} (c_k \beta_k + \mu_0 + m_n c_p / \beta_p) = 0,5 \zeta v c_p \sqrt{\mu_0 m_n c_k}. \quad (11)$$

Для листовых рессор в рамной ступени подвеса с релейным трением $F = F_0 \operatorname{sign} \dot{x}$ заменим в (11) линеаризованный параметр диссипации $\beta_p = \sqrt{2/\pi} F_0 / \sigma_{\dot{x}}$ для $\sigma_{\dot{x}} = \zeta v c_k / (4\beta_p)$ (6):

$$\beta_p = 2,5 F_0^2 (\zeta v c_k)^{-1}; \quad D_p^0 = 0,1 (6F_0^2 + \mu_0 m_n c_k c_p^2 \zeta^2 v^2 / F_0^2). \quad (12)$$

Минимизируя функцию $D_p(F_0^2)$, определяем расчетное трение:

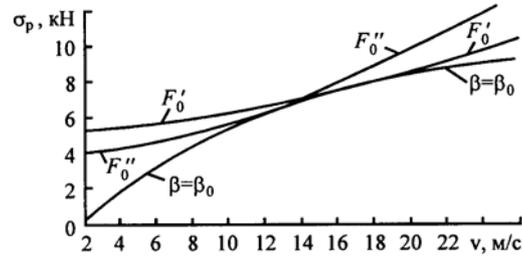
$$F_0^4 = 0,17 \mu_0 m_n c_k c_p^2 v^2. \quad (13)$$

Этот же результат получаем подстановкой $\beta_p = \beta_p^0$ (8) в условие статистической эквивалентности (12).

Поскольку $F_0 = F_0(\zeta v)$, то расчетное трение (13) не может быть оптимальным для различных скоростей движения (v) и состояний пути (почвы ζ). Поэтому его следует принимать для доминирующей скорости установившегося движения СВ ($v = v_y$) и среднего состояния различных дорог. Отсюда также следует, что квазилинейная характеристика диссипации является наилучшей. Более того, гидrogасители обладают большой энергоемкостью. Однако они малонадежны, конструктивно сложны и требуют регулярного контроля и обслуживания. Поэтому возможно фрикционное демпфирование с улучшенной характеристикой.

Введем параметры подвеса СВ: $c_k = 32$ кН/см; $\beta_k = 0,5$ кН·с/м; $m_n = 9,4 \cdot 10^3$ кг; $m_k = \mu m_n = 1,8 \cdot 10^3$ кг. Тогда прогиб шин $f_k = 3,5$ см, а рессор, при $\delta_k^0 = f_k / f_p = 0,4$; $f_p = 8,5$ см; $f_{\Sigma} = f_p + f_k = 12$ см; $c_p = m_n g / f_p = 11$ кН/см. Линеаризованные параметры диссипации в рессорах, рассчитанные по формуле (7), $\beta_p^0 = 70$ кН·с/м; по формуле (8) $\beta_p^0 = 65$ кН·с/м, а расчетное фрикци-

Рис. 2. Графики функций $\sigma_p(v)$ при различном демпфировании: F_0', F_0'' – силы фрикционного трения 7,2 и 5,1 кН, эквивалентные линейному сопротивлению при $v = 14$ м/с; $\beta = \beta_0$ – оптимальное значение параметра линейной диссипации, равное 70 кН · с/м



онное трение (13) для $v_y = 15,0$ и $7,5$ м/с при $\zeta = 4 \cdot 10^{-5}$ м – $F_0 = 7,2; 5,1$ кН. Для введенных и расчетных параметров (12) дисперсии (11) равны:

$$D_p^0 = 30 + 0,134v^2; D_p' = 15 + 0,27v^2; \sigma_p = 2\sqrt{v}. \quad (14)$$

На рис. 2 приведены кривые, построенные по формуле (14) при различном демпфировании. Кривая $\beta = \beta_0$ является оптимальной для заданного прогиба $f_k = 3,2$ см ввиду независимости орт β от внешнего воздействия. Фрикционное трение завышено при малых скоростях $v < v_y$ и занижено при высоких $v > v_y$. При одинаковом эквивалентном трении ($\beta \approx \beta_y$) реакции одинаковы для обеих характеристик диссипации. Максимум реакции по закону двух сигм нормального распределения вдвое выше среднего квадратичного значения с вероятностью $P = 0,95$.

Выводы

Квазисимметрия блоков и квазилинейность связей допускает декомпозицию большой размерности в одно- и двумерные модели. Естественными интегральными критериями вибронгруженности подвеса при случайной неровности пути служат дисперсии реакций шин и рессор. Их минимизация дает расчетные выражения и числовые значения оптимальных параметров жесткости и диссипации для всего спектра частот. Нелинейное трение в рессорах эффективно выявляется по условию статистической эквивалентности. Линейная характеристика диссипации наилучшая ввиду независимости ее оптимума от внешнего воздействия. Расчетное трение в листовых рессорах следует задавать по средней балльности дорог и доминирующей скорости установившегося движения.

С.-Петербургская государственная
лесотехническая академия

Поступила 28.12.06

E.M. Guseinov, R. E. Guseinov
Saint-Petersburg State Forest-Technical Academy

Efficiency of Operation of Log Truck with Double-step Suspension

Graphic-analytical modeling of a two-stage suspension, integral vibro-loading according to suspension steps and parametric optimization of elastic dissipative links, including nonlinear ones are stated.

Keywords: state equation, reaction dispersion, coupling parameters, minimization, optimal parameters.