



УДК 621.318.001.2

© 2007

Член-корреспондент НАН України А. Е. Божко, З. А. Иванова

Об уменьшении динамического действия испытываемого объекта на виброиспытательный стенд

The mathematical substantiation of decreasing the influence of vibrations of a tested object on electrodynamic and electromagnetic benches is given. The structural schemes of benches with compensating feedbacks are shown.

В данной работе рассматриваются электродинамический (ЭДВС) и электромагнитный (ЭМВС) виброиспытательные стенды. Подвижные части (платформы) этих стендов крепятся к корпусам через пружины и представляют собой колебательные системы, вибрирующие под действием тяговых сил, вызванных электромагнитным возбуждением [1]. Для сохранения и облегчения работоспособности стендов при большом весе испытываемых объектов (ИО) последние подвешивают на специальные конструкции. Однако и в этом случае стенды со стороны испытываемых объектов, кроме весовых нагрузок, подвергаются действию их вибраций, что не только затрудняет работу стендов, но и искажает их функционирование, особенно если ИО представляет собой нелинейные колебательные системы. С целью уменьшения действия ИО на ЭДВС и ЭМВС предлагаем следующий метод и соответствующие ему структурные коррекции в данных стендах. Для пояснения метода представим на рис. 1, а, б механические схемы стендов совместно с ИО, считая, что ИО расположены на платформе стенда как колебательные системы.

На рис. 1, а изображена механическая схема ЭДВС. Здесь m_0, m_c — массы ИО и стенда; c_0, c_c — пружины; b_0, b_c — демпферы. Так же обозначим коэффициенты жесткости (c_0, c_c) и коэффициенты диссипации (b_0, b_c), F — сила вибровозбуждения (пондеромоторная); x_0, x_c — колебания ИО и стенда, соответственно. На рис. 1, б представлена механическая схема ЭМВС. Здесь, по сравнению с рис. 1, а, имеется реактивная масса m_p со своими пружиной c_p и демпфером b_p , опирающимся на корпус и колебания x_p . Как и для ЭДВС, обозначим c_0, c_c, c_p — коэффициенты жесткости и b_0, b_c, b_p — коэффициенты диссипации и F . Дальнейшее изложение будем осуществлять последовательно, вначале для ЭДВС, а затем — для ЭМВС.

Рассмотрим рис. 1, а. Уравнения движения данной системы следующие:

$$\left. \begin{aligned} m_0 \ddot{x}_0 + b_0 \dot{x}_0 + c_0 x_0 &= b_0 \dot{x}_c + c_0 x_c, \\ m_0 \ddot{x}_c + (b_0 + b_c) \dot{x}_c + (c_0 + c_c) x_c &= F + b_0 \dot{x}_0 + c_0 x_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

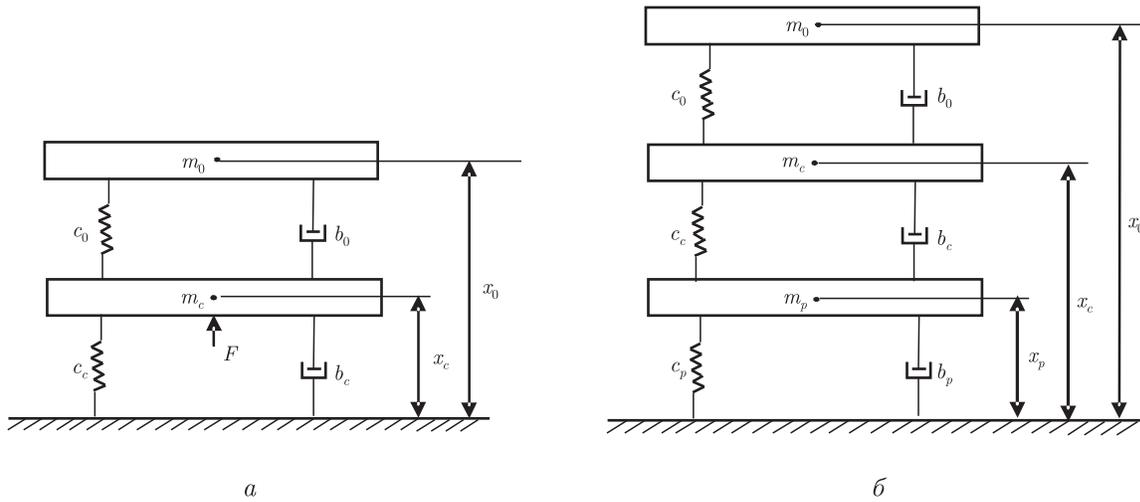


Рис. 1

где $\dot{x} = dx/dt$; $\ddot{x} = d^2x/dt^2$; t — время.

Из второго уравнения (1) видно, что на платформу ЭДВС, кроме силы F , действуют силы $b_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_c)$ и $c_0(x_0 - x_c)$. Если же ИО колеблется на резонансном режиме, то возможно, что $\dot{x}_0 \gg \dot{x}_c$ и $x_0 \gg x_c$ и тогда влияние колебаний ИО на ЭДВС может вызвать выход из строя последнего. Во избежание этого необходимо, чтобы второе уравнение (1) имело вид $m_c\ddot{x}_c + b_c\dot{x}_c + c_c x_c = F$, что возможно, если его записать так:

$$m_c\ddot{x}_c + b_c\dot{x}_c + c_c x_c = F + b_0(\dot{x}_0 - \dot{x}_c) + c_0(x_0 - x_c) - b_{0\text{ЭКВ}}(\dot{x}_0 - \dot{x}_c) - c_{0\text{ЭКВ}}(x_0 - x_c), \quad (2)$$

при условии, что $b_{0\text{ЭКВ}} = b_0$; $c_{0\text{ЭКВ}} = c_0$. Удовлетворение уравнению (2) можно осуществить в ЭДВС с помощью обратных связей. Покажем это на следующей структурной схеме (см. рис. 2), соответствующей рис. 1, а. При этом для уменьшения числа инверторов учтем, что вместо отрицательной обратной связи $-[b_{0\text{ЭКВ}}(\dot{x}_0 - \dot{x}_c) + c_{0\text{ЭКВ}}(x_0 - x_c)]$ используем положительную обратную связь $b_{0\text{ЭКВ}}(\dot{x}_c - \dot{x}_0) + c_{0\text{ЭКВ}}(x_c - x_0)$.

На рис. 2 обозначено: w_1, w_2, w_3 — передаточные функции; D_c, D_0 — дифференциаторы; \dot{U}_0, U_0 — инверторы (-1); C_M, C_{Mc}, C_{Mo} — сумматоры; $b_{0\text{ЭКВ}}, c_{0\text{ЭКВ}}$ — звенья с масштабными коэффициентами $b_{0\text{ЭКВ}}$ и $c_{0\text{ЭКВ}}$, соответственно; $x_c, \dot{x}_c, x_0, \dot{x}_0$ — перемещение и скорость колебаний платформы стенда и ИО соответственно; F — сила возбуждения колебаний; $w_1 = w_1(p) = 1/(m_c p^2 + (b_c + b_0)p + c_c + c_0)$; $w_2 = w_2(p) = b_0 p + c_0$; $w_3 = w_3(p) = 1/(m_0 p^2 + b_0 p + c_0)$; $p = d/dt$ — оператор.

Проверим правильность этой схемы. При отсутствии введенной обратной компенсирующей связи $x_c = (F + w_2 x_0) w_1$. Из рис. 2 при условии, что $w_2 = b_0 p + c_0 = b_{0\text{ЭКВ}} p + c_{0\text{ЭКВ}} = w_{2\text{ЭКВ}}$ $[F + x_0 w_2 + w_{2\text{ЭКВ}}(x_c - x_0)] w_1 = x_c$ или $(F + w_{2\text{ЭКВ}} x_c) w_1 = x_c$, откуда

$$x_c = \frac{F w_1}{1 - w_1 w_{2\text{ЭКВ}}} = \frac{F}{1/w_1 - w_{2\text{ЭКВ}}}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) параметры w_1 , получим

$$x_c = \frac{F}{m_c p^2 + b_c p + c_c + (b_0 - b_{0\text{ЭКВ}}) p + c_0 - c_{0\text{ЭКВ}}} = \frac{F}{m_c p^2 + b_c p + c_c}. \quad (4)$$

где R, L — активное сопротивление и индуктивность электрической катушки ЭМВС; ω — круговая частота U . Учтем, что сигналы обратных связей с $b_{2\text{ЭКВ}}$ и $c_{2\text{ЭКВ}}$ являются электрическими, которые в сумматоре C_M складываются, и в ЭМВС в этом случае тяговое усилие

$$F = \frac{(U + x_0 w_{2\text{ЭКВ}})^2 L}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)} = \frac{1}{z}(U^2 + 2U x_0 w_{2\text{ЭКВ}} + x_0^2 w_{2\text{ЭКВ}}^2)$$

не может обеспечить решение поставленной задачи [$z = L/(2\delta(R^2 + \omega^2 L^2))$]. Для ЭМВС необходима искомая реализация, отличная от реализации для ЭДВС. В данном случае после сумматора необходимо включить звено извлечения квадратного корня, т. е. на вход ЭМВС должен подаваться сигнал $\sqrt{U + x_0 w_{2\text{ЭКВ}}}$. Тогда тяговое усилие приобретает вид

$$F_\Sigma = \frac{(U + x_0 w_{2\text{ЭКВ}})L}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)} = F_U + \frac{x_0 L w_{2\text{ЭКВ}}}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)}.$$

И здесь так же, как и для ЭДВС (см. (4) и (5)), следует иметь в виду, что равенства $b_0 - b_{0\text{ЭКВ}} = c_0 - c_{0\text{ЭКВ}} = 0$ реально могут быть выполнены в ЭМВС при условии

$$b_{0\text{ЭКВ}} = \frac{L b'_{0\text{ЭКВ}}}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)}; \quad c_{0\text{ЭКВ}} = \frac{L c'_{0\text{ЭКВ}}}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)},$$

где $b'_{0\text{ЭКВ}}, c'_{0\text{ЭКВ}}$ — коэффициенты передачи в цепи обратной связи по координатам $\dot{x}_c - \dot{x}_0$ и $x_c - x_0$ соответственно.

Таким образом, изменяя структуру систем ЭДВС и ЭМВС с помощью электрических звеньев обратной связи, можно уменьшить влияние колебаний испытуемого объекта на стелды, что особенно важно, если ИО колеблется в резонансном режиме.

1. *Вибрации в технике*. Т. 4 / Под ред. д. т. н. Э.Э. Лавендела. — Москва: Машиностроение, 1981. — 512 с.
2. *Божко А. Е.* Об активной виброзащите в электромагнитных виброиспытательных стендах // Доп. НАН України. — 2005. — № 2. — С. 80–83.

*Институт проблем машиностроения
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков
Украинская государственная академия
железнодорожного транспорта, Харьков*

Поступило в редакцию 16.01.2006