



MEXAHIKA

УДК 621.318.001.2

© 2007

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

Об уменьшении динамического действия испытуемого 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 испытуемых объектов (ИО) последние подвешивают на специальные конструкции. Однако и в этом случае стенды со стороны испытуемых 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, *a*, *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, δ представлена механическая схема ЭМВС. Здесь, по сравнению с рис. 1, *a*, 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:

$$\left. \begin{array}{l} m_{0}\ddot{x}_{0} + b_{0}\dot{x}_{0} + c_{0}x_{0} = b_{0}\dot{x}_{c} + c_{0}x_{c}, \\ m_{0}\ddot{x}_{c} + (b_{0} + b_{c})\dot{x}_{c} + (c_{0} + c_{c})x_{c} = F + b_{0}\dot{x}_{0} + c_{0}x_{0}, \end{array} \right\}$$

$$(1)$$

ISSN 1025-6415 Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2007, № 1

56



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:

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

при условии, что $b_{0_{3KB}} = b_0$; $c_{0_{3KB}} = c_0$. 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 $-[b_{0_{3KB}}(\dot{x}_0 - \dot{x}_c) + c_{0_{3KB}}(x_0 - x_c)]$ используем положительную обратную связь $b_{0_{3KB}}(\dot{x}_c - \dot{x}_0) + c_{0_{3KB}}(x_c - x_0)$.

На рис. 2 обозначено: w_1, w_2, w_3 — передаточные функции; D_c, D_0 — дифференциаторы; \dot{U}_0, U_0 — инверторы (-1); $C_{\rm M}, C_{\rm Mc}, C_{\rm Mo}$ — сумматоры; $b_{0_{3\rm KB}}, c_{0_{3\rm KB}}$ — звенья с масштабными коэффициентами $b_{0_{3\rm KB}}$ и $c_{0_{3\rm KB}}$, 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 $w_2 = b_0 p + c_0 = b_{03KB} p + c_{03KB} = w_{23KB}$ $[F + x_0 w_2 + w_{23KB} (x_c - x_0)] w_1 = x_c$ или $(F + w_{23KB} x_c) w_1 = x_c$, откуда

$$x_c = \frac{Fw_1}{1 - w_1 w_{2\mathsf{9KB}}} = \frac{F}{1/w_1 - w_{2\mathsf{9KB}}}.$$
(3)

Подставляя в (3) параметры w_1 , получим

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

ISSN 1025-6415 Доповіді Національної академії наук України, 2007, №1

57



Рис. 2

Как видно из (4), x_c не зависит от x_0 , т.е. такой структурой, какая представлена на рис. 2, уменьшается обратное влияние ИО на стенд. Покажем еще некоторое дополнение по формированию возбуждающего усилия в ЭДВС. Пондеромоторная сила F = Bli, где i, l - электрический ток и длина провода подвижной катушки; <math>B — магнитная индукция в воздушном зазоре ЭДВ; $i = U/\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$, где U — входное задающее напряжение; R, ωL — активное и индуктивное сопротивление подвижной катушки; ω — круговая частота напряжения U. Реально обратная связь с передаточной функцией $w_{23\kappa B}$ подается на сумматор вместе с U, а выходной сигнал сумматора подается на зажимы подвижной катушки ЭДВС. Поэтому возбуждающая вибрацию сила будет иметь вид

$$F_{\Sigma} = \frac{U + w_{2\mathsf{j}\mathsf{K}\mathsf{B}}(x_c - x_0)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} Bl = F + \frac{Blw_{2\mathsf{j}\mathsf{K}\mathsf{B}}(x_c - x_0)}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}.$$
(5)

На основании (5) в (4) следует иметь в виду, что равенства $b_0 - b_{0 ext{>>}KB} = c_0 - c_{0 ext{>>}KB} = 0$ в реальных ЭДВС могут быть выполнены, если $b_{0 ext{>>}KB} = \frac{Blb'_{0 ext{>>}KB}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$; $c_{0 ext{>>}KB} = \frac{Blc'_{0 ext{>>}KB}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$, где $b'_{0 ext{>>}KB} - \kappa_0$ формициенты передачи в цепи обратной связи по координатам $\dot{x}_c - \dot{x}_0$ и $x_c - x_0$ соответственно. Заметим, что в цепи обратной связи эти координаты являются электрическими сигналами, полученными от вибродатчиков, стоящих на платформе стенда и на испытуемом объекте.

Перейдем к рассмотрению ЭМВС, механическая схема которого изображена на рис. 1, б. В ЭМВС реактивная масса предохраняет корпус и соответственно фундамент стенда от действия вибраций x_c . В работе [2] дан метод активной виброзащиты корпуса и фундамента ЭМВС. Если учесть этот метод, то механическая схема ЭМВС будет соответствовать механической схеме ЭДВС. И для уменьшения влияния x_0 на платформу стенда можно принять те же решения, что и для ЭДВС, т. е. для ЭМВС справедлива структура, изображенная на рис. 2. Но в этом случае необходимо учесть физику формирования тягового усилия, возбуждающего платформу (якорь), на которой находится ИО. Это усилие $F = \Phi^2/\mu_0 S$, где Φ — магнитный поток в воздушном зазоре δ ; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; S площадь поперечного сечения полюса магнитопровода у воздушного зазора. Задающее напряжение ЭМВС U связано с тяговым усилием формулой

$$F = \frac{U^2 L}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)},$$

ISSN 1025-6415 Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2007, № 1

где R, L — активное сопротивление и индуктивность электрической катушки ЭМВС; ω — круговая частота U. Учтем, что сигналы обратных связей с $b_{23\kappa B}$ и $c_{23\kappa B}$ являются электрическими, которые в сумматоре $C_{\rm M}$ складываются, и в ЭМВС в этом случае тяговое усилие

$$F = \frac{(U + x_0 w_{2\mathsf{9}\mathsf{K}\mathsf{B}})^2 L}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)} = \frac{1}{z} (U^2 + 2U x_0 w_{2\mathsf{9}\mathsf{K}\mathsf{B}} + x_0^2 w_{2\mathsf{9}\mathsf{K}\mathsf{B}}^2)$$

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 $\sqrt{U + x_0 w_{23KB}}$. Тогда тяговое усилие приобретает вид

$$F_{\Sigma} = \frac{(U + x_0 w_{2 \Im \kappa B})L}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)} = F_U + \frac{x_0 L w_{2 \Im \kappa B}}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)}$$

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

$$b_{0_{3KB}} = \frac{Lb'_{0_{3KB}}}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)}; \qquad c_{0_{3KB}} = \frac{Lc'_{0_{3KB}}}{2\delta(R^2 + \omega^2 L^2)},$$

где $b'_{0_{9KB}}, c'_{0_{9KB}}$ — 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 стенды, 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. *Божско 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