



УДК 534.232.001.11:62.50

© 2007

Член-корреспондент НАН України А. Е. Божко

## Коррекция системы электромагнитного вибростенда с учетом гибких связей

*The compensation correction of distortional factors in the effort of an electromagnetic vibro-bench is shown.*

Электромагнитные вибростенды ЭМВС применяются для оценки вибрационной надежности испытуемых изделий [1]. В практике вибрационных испытаний выходные сигналы ЭМВС должны быть откалиброваны, т. е. не иметь в себе искажающих факторов. Последние могут появляться от действия на платформу ЭМВС колебаний составляющих стенд конструктивных элементов. Кроме того, испытания объектов на ЭМВС может осуществляться по методу качающей частоты [2], в котором частота вибраций изменяется в определенном диапазоне, начиная от низких и заканчивая высокими частотами. В этом случае система платформа стенда (якорь) совместно с испытуемым объектом ведет себя с особенностями. При низких частотах возбуждения вибраций эта система является жесткой и испытуемый объект колеблется синхронно и синфазно с якорем ЭМВС. На высоких частотах вибронатрузок между якорем ЭМВС и испытуемым объектом появляются гибкие связи [3], заключающиеся в том, что между якорем и испытуемым объектом возникают эффекты от сил диссипации  $b_0\dot{x}_0$  и упругости (жесткости)  $cx_0$ , заключающиеся в том, что колебания испытуемого объекта  $x_0$  отстают от колебания якоря  $x_я$  на угол  $\varphi = \arctg((bm_0\omega)/(\omega_0^2 - \omega^2))$ , где  $m$  — масса объекта;  $\omega$  — круговая частота вибраций якоря;  $\omega_0$  — круговая собственная частота объекта.

При отсутствии гибких связей (жесткое соединение якоря и объекта на низких частотах)  $\varphi = 0$ . Исходя из эффекта  $\varphi > 0$  при наличии гибких связей, предлагаем метод оценки наличия гибких связей по углу  $\varphi_n$  и, в свою очередь, применение этого метода при коррекции системы ЭМВС. Для уяснения данного предложения представим механические схемы ЭМВС без и с гибкими связями и покажем существо предлагаемых методов. На рис. 1 и 2 представлены эти схемы для жесткого соединения якоря и испытуемого объекта (рис. 1) и гибкого соединения этих же элементов (рис. 2).

Обозначения на рис. 1, 2 следующие: М — магнитопровод ЭМВС;  $\delta$  — воздушный зазор; К — электрическая катушка с током  $i_k$ ;  $m_я$  — масса якоря;  $m_0$  — масса испытуемого

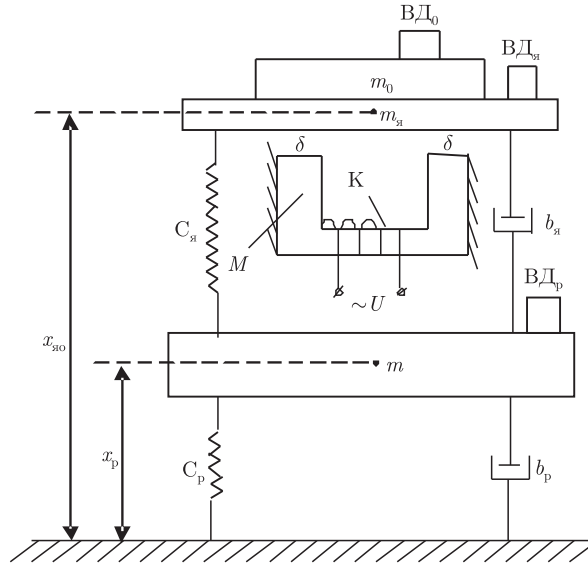


Рис. 1

объекта;  $m_p$  — реактивная масса;  $c_я, c_p, c_0$  — жесткости якоря, реактивной массы и объекта соответственно;  $b_я, b_p, b_0$  — элементы диссипации якоря, реактивной массы и испытуемого объекта соответственно;  $x_я, x_p, x_0$  — координаты колебаний объекта, якоря, реактивной массы соответственно;  $U$  — входное задающее напряжение ЭМВС; ВД<sub>0</sub>, ВД<sub>я</sub>, ВД<sub>р</sub> — вибродатчики, прикрепленные к  $m_0, m_я$  и  $m_p$  соответственно.

Запишем дифференциальные уравнения движения рассматриваемых схем (см. рис. 1, 2). Для схемы, изображенной на рис. 1, уравнения следующие:

$$\begin{cases} (m_0 + m_я)\ddot{x}_{я0} + b_я\dot{x}_{я0} + c_яx_{я0} = F + b_я\dot{x}_p + c_яx_p; \\ m_p\ddot{x}_p + (b_я + b_p)\dot{x}_p + (c_я + c_p)x_p = b_я\dot{x}_{я0} + c_яx_{я0}; \\ F = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S} = \frac{\mu_0 S}{r^2 + (\omega L)^2} \left( \frac{Uw}{2\delta} \right)^2, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Phi$  — магнитный поток в ЭМВС;  $F$  — тяговое усилие ЭМВС;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;  $r, w$  — активное сопротивление и число витков катушки;  $S$  — площадь поперечного сечения полюсов магнитопровода  $M$  в зазоре  $\delta$ .

Для схемы, представленной на рис. 2, уравнения имеют вид

$$\begin{cases} m_0\ddot{x}_0 + b_0\dot{x}_0 + c_0x_0 = b_0\dot{x}_я + c_0x_я; \\ m_я\ddot{x}_я + (b_0 + b_я)\dot{x}_я + (c_0 + c_я)x_я = F + b_0\dot{x}_0 + c_0x_0 + b_я\dot{x}_p + c_яx_p; \\ m_p\ddot{x}_p + (b_я + b_p)\dot{x}_p + (c_я + c_p)x_p = b_я\dot{x}_я + c_яx_я; \\ F = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S} = \frac{\mu_0 S}{r^2 + (\omega L)^2} \left( \frac{Uw}{2\delta} \right)^2. \end{cases} \quad (2)$$

Как видим, для схемы с гибкими связями (см. рис. 2) уравнения движения сложнее, чем для ЭМВС с жестким креплением испытуемого объекта. Анализируя уравнения (1) и (2), с учетом заданного закона воспроизведения вибраций якорем ЭМВС, т. е. соответственно выражению тягового усилия  $F$ , видим, что в обоих случаях необходима коррекция системы

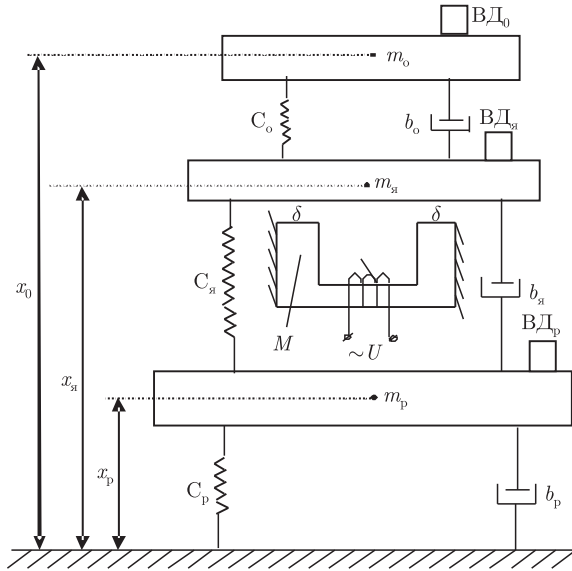


Рис. 2

ЭМВС, а именно: для схемы рис. 1 необходимо скомпенсировать силу  $b_я\dot{x}_p + c_яx_p$ , а для схемы рис. 2 необходима компенсация силы  $b_0\dot{x}_0 + c_0x_0 + b_я\dot{x}_p + c_яx_p$ , что сложнее, чем в первом случае. Однако, на наш взгляд, такая компенсационная коррекция возможна. Компенсация сил  $b_я\dot{x}_p + c_яx_p$  и  $b_0\dot{x}_0 + c_0x_0 + b_я\dot{x}_p + c_яx_p$  будет, если сформировать противоположные силы указанным. Покажем процедуру формирования корректирующих цепей последовательным изложением для схемы рис. 1, а затем для другой схемы (см. рис. 2).

Для схемы рис. 1 необходимо на реактивную массу  $m_p$  поставить вибродатчик (ВД<sub>р</sub>), например, акселерометр. Выходной сигнал ВД<sub>р</sub> надо два раза проинтегрировать и тогда получим сигналы, пропорциональные  $\dot{x}_p$  и  $x_p$ . Пропуская полученные  $\dot{x}_p$  и  $x_p$  через звенья с коэффициентами передачи  $b_я^э$  и  $c_я^э$  соответственно и суммируя  $b_я^э\dot{x}_p$  и  $c_я^эx_p$ , получим сигнал, соответствующий по форме силе, которую необходимо компенсировать. Затем пропустим суммирующий сигнал через инвертор [-1], т.е. получим сигнал  $-b_я^э\dot{x}_p - c_я^эx_p$ . Этот сигнал должен быть входным сигналом ЭМВС. Из (1) и (2) видим, что  $F \approx kU^2$ , т.е. квадрату входного напряжения  $U$ . При компенсации входное напряжение будет  $U_k = U - b_я^э\dot{x}_p - c_я^эx_p$ . Если следовать формуле  $F \sim \alpha U_k^2$ , где  $\alpha = \frac{\mu_0 S}{r^2 + (\omega L)^2} \left(\frac{w}{2\delta}\right)^2$ , то тогда необходимая компенсация невозможна.

Однако выход из этой, якобы невозможной, ситуации имеется. Решение задачи заключается в использовании звеньев суммирования и извлечение квадратного корня. Поясним данную мысль. Входное напряжение  $U$  суммируем в сумматоре с сигналом  $-b_я^э\dot{x}_p - c_я^эx_p$  и из  $U_k = U - b_я^э\dot{x}_p - c_я^эx_p$  извлекаем квадратный корень, т.е. получаем входной сигнал катушки К в виде  $\sqrt{U - b_я^э\dot{x}_p - c_я^эx_p}$ .

Тогда при таком входном напряжении ЭМВС тяговое усилие будет иметь вид

$$F = \frac{\mu_0 S}{r^2 + (\omega L)^2} \left(\frac{w}{2\delta}\right)^2 (U - b_я^э\dot{x}_p - c_я^эx_p) = \alpha U - \alpha b_я^э\dot{x}_p - \alpha c_я^эx_p. \quad (3)$$

Если (3) подставить в первое уравнение (1), получим

$$(m_0 + m_я)\ddot{x}_{я0} + b_я\dot{x}_{я0} + c_яx_{я0} = \alpha U - \alpha b_я^э\dot{x}_p - \alpha c_я^эx_p + b_я\dot{x}_p + c_яx_p. \quad (4)$$

Уравнение (4) принимает вид

$$(m_0 + m_{\text{я}})\ddot{x}_{\text{я}0} + b_{\text{я}}\dot{x}_{\text{я}0} + c_{\text{я}}x_{\text{я}0} = \alpha U$$

при  $(b_{\text{я}} - \alpha b_{\text{я}}^{\exists})\dot{x}_{\text{п}} = 0$  и  $(c_{\text{я}} - \alpha c_{\text{я}}^{\exists})x_{\text{п}} = 0$ .

Так как  $\dot{x}_{\text{п}}$  и  $x_{\text{п}} \neq 0$ , то необходимо соблюсти условия  $b_{\text{я}} - \alpha b_{\text{я}}^{\exists} = 0$  и  $c_{\text{я}} - \alpha c_{\text{я}}^{\exists} = 0$ .

Таким образом, в схеме рис. 1 получается четкое воспроизведение заданных вибраций без наличия искажающих факторов. Подобная по форме компенсация возможна и для схемы рис. 2, хотя трудностей в реализации здесь больше. Покажем суть и этой компенсации. Как было ранее отмечено, в этом случае необходимо компенсировать силу  $b_0\dot{x}_{\text{я}0} + c_0x_0 + b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{п}} + c_{\text{я}}x_{\text{п}}$ . На основании компенсации в схеме рис. 1 понятно, что необходимо с помощью вибродатчиков, стоящих на испытуемом объекте и на реактивной массе и интеграторов, создаются сигналы  $x_0$ ,  $\dot{x}_0$ ,  $x_{\text{п}}$ ,  $\dot{x}_{\text{п}}$ , которые проходят соответственно через звенья с коэффициентами передачи  $b'_0$ ,  $c'_0$ ,  $b'_{\text{я}}$ ,  $c'_{\text{я}}$  сумматор и инвертор. В результате получаем сигнал  $-b'_0\dot{x}_0 - c'_0x_0 - b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{п}} - c_{\text{я}}^{\exists}x_{\text{п}}$ , который суммируем с входным задающим напряжением ЭМВС и пропускаем через звено извлечения квадратного корня. Тяговое усилие ЭМВС в этом случае будет иметь вид

$$\begin{aligned} F &= \frac{\mu_0 S}{r^2 + (\omega L)^2} \left( \frac{w}{2\delta} \right)^2 (U - b_0^{\exists}\dot{x}_0 - c_0^{\exists}x_0 - b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{п}} - c_{\text{я}}^{\exists}x_{\text{п}}) = \\ &= \alpha U - \alpha(b_0^{\exists}\dot{x}_0 + c_0^{\exists}x_0 + b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{п}} + c_{\text{я}}^{\exists}x_{\text{п}}). \end{aligned} \quad (5)$$

Подставляя (5) во второе уравнение (2), получим

$$\begin{aligned} m_{\text{я}}\ddot{x}_{\text{я}} + (b_0 + b_{\text{я}})\dot{x}_{\text{я}} + (c_0 + c_{\text{я}})x_{\text{я}} = \\ = \alpha U + \dot{x}_0(b_0 - \alpha b'_0) + x_0(c_0 - \alpha c'_0) + \dot{x}_{\text{п}}(b_{\text{я}} - \alpha b'_{\text{я}}) + x_{\text{п}}(c_{\text{я}} - \alpha c'_{\text{я}}). \end{aligned} \quad (6)$$

Если в (6) принять  $b_0 - \alpha b'_0 = 0$ ;  $c_0 - \alpha c'_0 = 0$ ;  $b_{\text{я}} - \alpha b'_{\text{я}} = 0$ ;  $c_{\text{я}} - \alpha c'_{\text{я}} = 0$ , то в правой части (6) будет  $\alpha U$ , и колебания якоря будут осуществляться по заданному закону  $\alpha U$ .

Таким образом, формируется компенсация дополнительных факторов в системе ЭМВС, изображенной на рис. 2. Такая компенсация осуществляется с помощью представленных корректирующих устройств. Однако в данной компенсации необходимо ввести устройство определения угла  $\varphi$ , звено переключения корректирующей цепи для схемы рис. 1 на корректирующую цепь для схемы рис. 2 при  $\varphi > 0$ . Все эти звенья реализуются в соответствии со структурной схемой, представленной на рис. 3, где СУ<sub>0</sub>, СУ<sub>я</sub>, СУ<sub>п</sub> — согласующие усилители каналов вибродатчиков ВД<sub>0</sub>, ВД<sub>я</sub>, ВД<sub>п</sub> соответственно; U<sub>0</sub>, U<sub>я</sub>, U<sub>п</sub> — интеграторы тех же каналов;  $b'_{\text{я}}$ ,  $c'_{\text{я}}$  — звенья с коэффициентами передачи  $b'_{\text{я}}$  и  $c'_{\text{я}}$ ; СМ1, СМ2, СМ3 — сумматоры;  $\boxed{-1}$  — инвертор;  $\boxed{\sqrt{\quad}}$  — звено извлечения квадратного корня; УМ — усилитель мощности; ЭМВ — вибровозбудитель;  $\varphi$  — звено измерения угла  $\varphi$ ; РЭ — релейный элемент с порогом срабатывания при  $\varphi > 0$ ; Кл — ключ, срабатывающий от сигнала РЭ при  $\varphi > 0$ .

Данная система работает следующим образом. Сигналы с вибродатчиков ВД<sub>0</sub>, ВД<sub>я</sub>, ВД<sub>п</sub> через согласующие усилители подаются на интеграторы. В результате на каждом канале получаем сигнал  $\dot{x}_0$ ,  $x_0$ ,  $\dot{x}_{\text{п}}$ ,  $x_{\text{п}}$ . Заметим, в канале ВД<sub>я</sub> интеграторы отсутствуют. После инверторов в каналах ВД<sub>0</sub> и ВД<sub>п</sub> появляются сигналы  $-(b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_0 + c_{\text{я}}^{\exists}x_0)$  и  $-(b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{п}} + c_{\text{я}}^{\exists}x_{\text{п}})$  соответственно. Сигнал  $-(b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_0 + c_{\text{я}}^{\exists}x_0)$  подается на вход ключа Кл, который открывается выходным сигналом РЭ. Выход ключа Кл соединен со входом сумматора СМ3. На вход

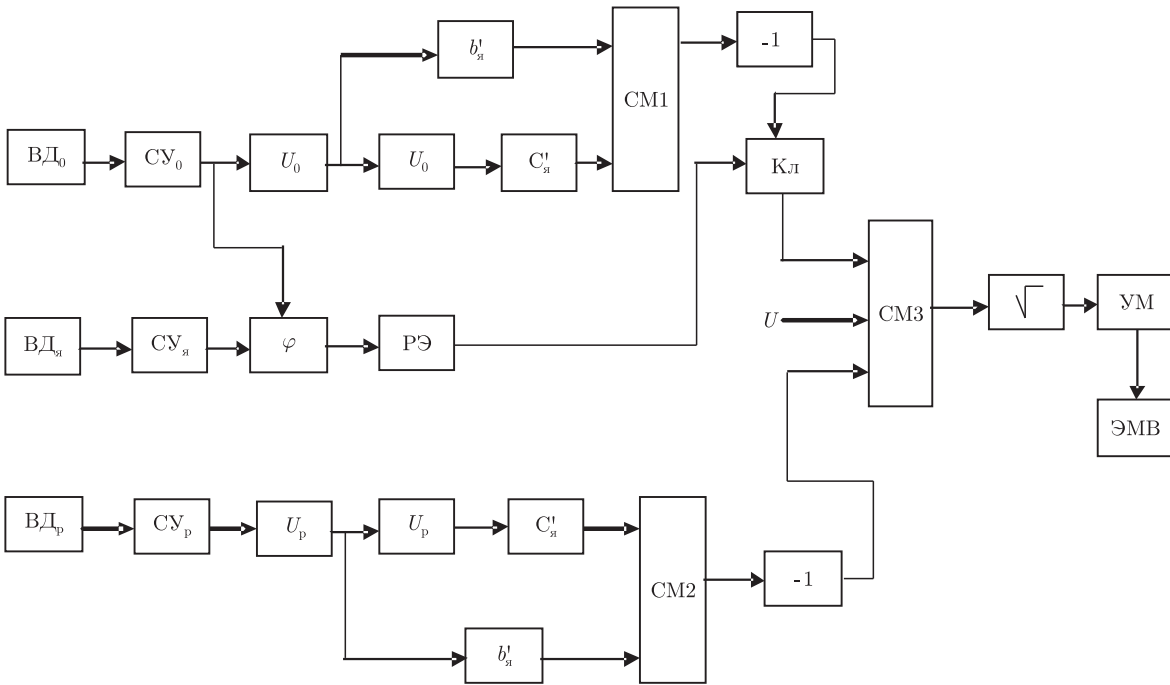


Рис. 3

этого сумматора (СМ3) подаются задающее напряжение  $U$  и сигнал  $-(b_{я}^3 \dot{x}_p + c_{я}^3 x_p)$ . Далее выходной сигнал СМ3 подается на звено  $\sqrt{\quad}$  и затем на УМ и ЭМВ.

Если система якорь + испытуемый объект является жесткой, то на выходе Кл сигнал равен 0, так как  $\varphi = 0$  и РЭ не срабатывает. При гибкой связи  $\varphi > 0$  и РЭ подает сигнал на ключ Кл, который пропускает сигнал  $-(b_{я}^3 \dot{x}_0 + c_{я}^3 x_0)$  и таким образом добавляется еще один сигнал компенсации влияния колебаний объекта на якорь.

Заметим, что если необходимо иметь  $F \sim U^2$ , то входное напряжение  $U$  необходимо пропустить через звено возведения в квадрат, выход которого подается на вход СМ3.

В результате представленный метод учета гибких связей в ЭМВС позволяет повысить точность воспроизведения стендом вибраций по заданному закону без влияния колебаний испытуемого объекта и реактивной массы.

1. *Вибрации в технике*. В 4-х т. / Под ред. Э. Э. Лавендела. – Москва: Машиностроение, 1981. – Т. 4. – 510 с.
2. *Испытательная техника*. В 2-х т. / Под ред д. т. н. В. В. Ключева. – Москва: Машиностроение, 1982. – Т. 1. – 560 с.
3. *Божко А. Е.* Воспроизведение вибраций. – Киев: Наук. думка, 1975. – 191 с.

*Институт проблем машиностроения  
им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

*Поступило в редакцию 25.09.2006*