



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 вибронгрузок 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; ω — круговая частота вибраций якоря; ω_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 φ_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; δ — воздушный зазор; К — электрическая катушка с током i_k ; $m_я$ — масса якоря; m_0 — масса испытуемого

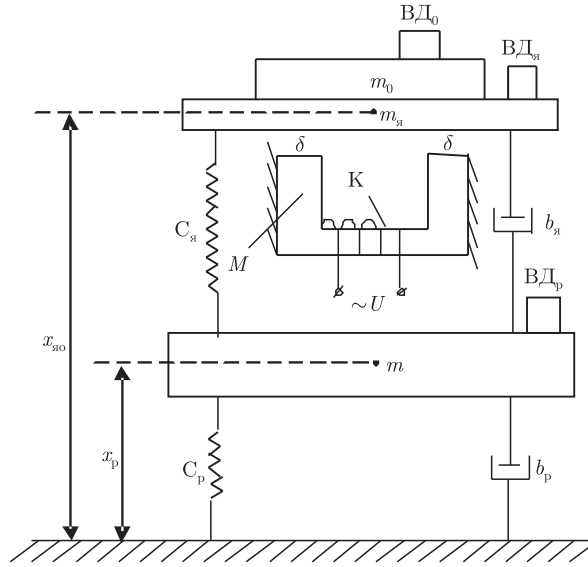


Рис. 1

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; ВД₀, ВД_я, ВД_р — 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 Φ — магнитный поток в ЭМВС; F — тяговое усилие ЭМВС; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; r, w — активное сопротивление и число витков катушки; S — площадь поперечного сечения полюсов магнитопровода M в зазоре δ .

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

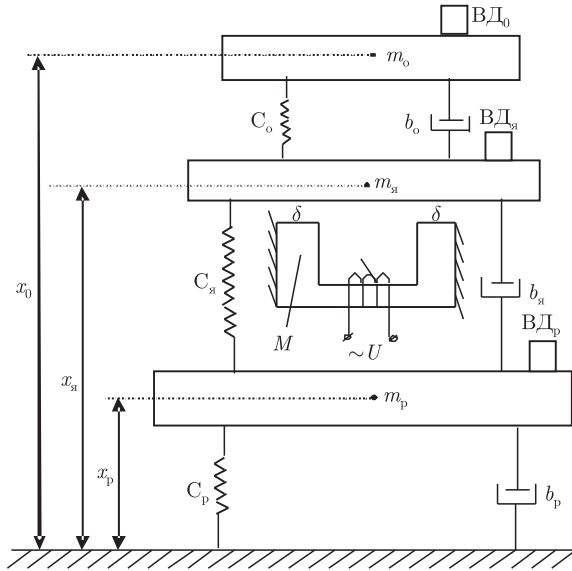


Рис. 2

ЭМВС, а именно: для схемы рис. 1 необходимо скомпенсировать силу $b_я\dot{x}_р + c_яx_р$, а для схемы рис. 2 необходима компенсация силы $b_0\dot{x}_0 + c_0x_0 + b_я\dot{x}_р + c_яx_р$, что сложнее, чем в первом случае. Однако, на наш взгляд, такая компенсационная коррекция возможна. Компенсация сил $b_я\dot{x}_р + c_яx_р$ и $b_0\dot{x}_0 + c_0x_0 + b_я\dot{x}_р + c_яx_р$ 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 $m_р$ поставить вибродатчик (ВД_р), например, акселерометр. Выходной сигнал ВД_р надо два раза проинтегрировать и тогда получим сигналы, пропорциональные $\dot{x}_р$ и $x_р$. Пропуская полученные $\dot{x}_р$ и $x_р$ через звенья с коэффициентами передачи $b_я^э$ и $c_я^э$ соответственно и суммируя $b_я^э\dot{x}_р$ и $c_я^эx_р$, получим сигнал, соответствующий по форме силе, которую необходимо компенсировать. Затем пропустим суммирующий сигнал через инвертор $[-1]$, т.е. получим сигнал $-b_я^э\dot{x}_р - c_я^эx_р$. 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 $U_k = U - b_я^э\dot{x}_р - c_я^эx_р$. 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 $-b_я^э\dot{x}_р - c_я^эx_р$ и из $U_k = U - b_я^э\dot{x}_р - c_я^эx_р$ извлекаем квадратный корень, т.е. получаем входной сигнал катушки К в виде $\sqrt{U - b_я^э\dot{x}_р - c_я^эx_р}$.

Тогда при таком входном напряжении ЭМВС тяговое усилие будет иметь вид

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

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

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

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

Так как $\dot{x}_{\text{р}}$ и $x_{\text{р}} \neq 0$, 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 $b_0\dot{x}_{\text{я}0} + c_0x_0 + b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{р}} + c_{\text{я}}x_{\text{р}}$. 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 , $x_{\text{р}}$, $\dot{x}_{\text{р}}$, 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 $-b'_0\dot{x}_0 - c'_0x_0 - b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{р}} - c_{\text{я}}^{\exists}x_{\text{р}}$, который суммируем с входным задающим напряжением ЭМВС и пропускаем через звено извлечения квадратного корня. Тяговое усилие ЭМВС в этом случае будет иметь вид

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

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

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

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 αU , и колебания якоря будут осуществляться по заданному закону αU .

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 φ , 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 СУ₀, СУ_я, СУ_р — согласующие усилители каналов вибродатчиков ВД₀, ВД_я, ВД_р соответственно; U₀, U_я, U_р — 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; φ — звено измерения угла φ ; 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 ВД₀, ВД_я, ВД_р через согласующие усилители подаются на интеграторы. В результате на каждом канале получаем сигнал \dot{x}_0 , x_0 , $\dot{x}_{\text{р}}$, $x_{\text{р}}$. Заметим, в канале ВД_я интеграторы отсутствуют. После инверторов в каналах ВД₀ и ВД_р появляются сигналы $-(b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_0 + c_{\text{я}}^{\exists}x_0)$ и $-(b_{\text{я}}^{\exists}\dot{x}_{\text{р}} + c_{\text{я}}^{\exists}x_{\text{р}})$ 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

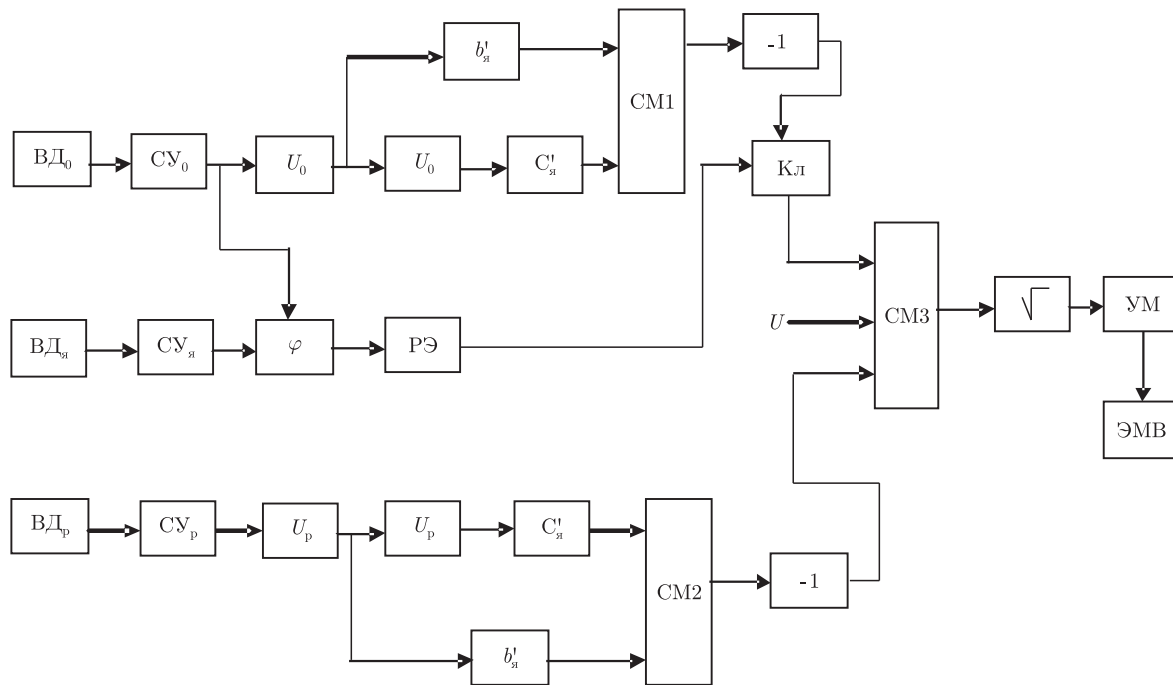


Рис. 3

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