

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЬ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ УДАРА

© Крупенин В.Л.¹, Божко А. Е.², Мягкохлеб К.Б.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия
krupeninster@gmail.com

² Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина
mkb2004@ukr.net

Аннотация. Рассматривается задача воспроизведения электромагнитным вибростендом импульсов скорости и ускорения якоря.

Ключевые слова. Виброударные испытания, возбуждение ударов, условия эксплуатации, механическое напряжение, уравнения движения, структурная схема устройства.

THE ELECTROMAGNETIC VIBRATION EXCITER WHEN PLAYING IMPACT

V.Krupenin¹, A.Bozhko², K. Myagkokhlib²

¹Federal budget-funded research Institute of Machines Science named after A.A.Blagonravov of the Russian Academy of Science
krupeninster@gmail.com

²The A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMash NAS of Ukraine)
mkb2004@ukr.net

Abstract. The problem of reproducing the electromagnetic shaker pulse velocity and acceleration of the armature.

Keywords. Vibro-impact tests, the excitement blows, operating conditions, the stress, the equations of motion, a block diagram of the device.

В практике виброударных испытаний деталей, узлов машин и приборов существуют программы, формирующие совместное воспроизведение испытательным стендом вибраций с чередованием ударов, что отражает эксплуатационные условия испытуемых объектов. Для таких стендов приемлемыми являются электромагнитные вибровозбудители (ЭМВ) [1]. Условие возбуждения удара в данном случае включает в себя неравенство нулю перемещений, скоростей и ускорений в момент воспроизведения якорем стенда ударной нагрузки на испытуемый объект. Для адекватности условий эксплуатации и испытаний этого объекта необходимо равенство механических напряжений в испытуемых объектах, определяемых по формуле

$$\sigma = \frac{q}{S_u} = \frac{m}{S_u} a,$$

где q – действующая сила, создаваемая платформой (якорем) стенда; S_u – площадь, на которую действует сила q ; m – действующая масса; a – ускорение движущегося якоря.

С точки зрения разрушения испытуемого объекта (деталь, узел машины, прибора) при виброударных испытаниях [2] действующей величиной является скорость изменения механического напряжения

$$\frac{d\sigma(t)}{dt} = \frac{1}{S_a} \frac{dq(t)}{dt} = \frac{m}{S_u} \frac{da}{dt} = \frac{m\dot{a}}{S_a}, \quad (1)$$

а это значит, что при проведении виброударных испытаний изделий следует анализировать величины \dot{a} и в соответствии с этим анализом регулировать испытательный режим.

Исходя из приведенного вступления, на наш взгляд, желательно учитывать величину \dot{a} при анализе динамики якоря ЭМВ.

Электромеханическая схема ЭМВ приведена на рис. 1,

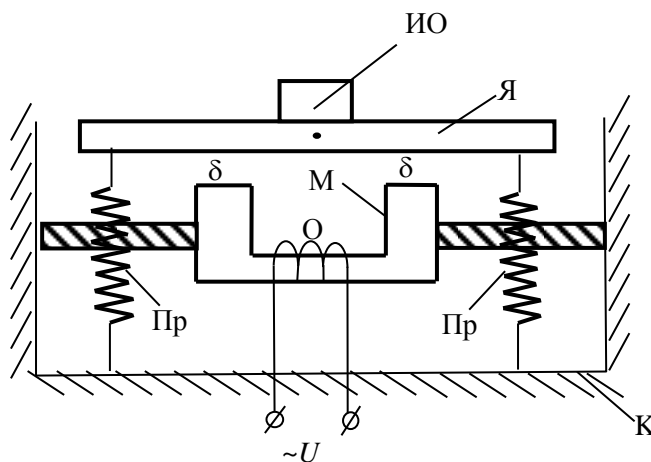


Рис. 1.

где М – магнетопровод; Я – якорь; ИО – испытуемый объект; Пр – пружины; О – электрическая катушка (обмотка); U – входное управляющее электрическое напряжение; К – корпус вибростенда; δ – воздушный зазор.

Напряжение U представляет собой сигнал, включающий в себя гармонические и импульсные составляющие. Причем возможны следующие режимы работы ЭМВ:

- а) при детерминированных суммарных сигналах с моногармоническими составляющими и повторяющимися импульсами;
- б) при детерминированных суммарных сигналах с полигармоническими составляющими и повторяющимися импульсами;
- в) при стохастических сигналах, имеющих в своем составе импульсы.

В настоящей работе рассмотрим вариант а). Для этого представим на рис. 2 механическую схему ЭМВ,

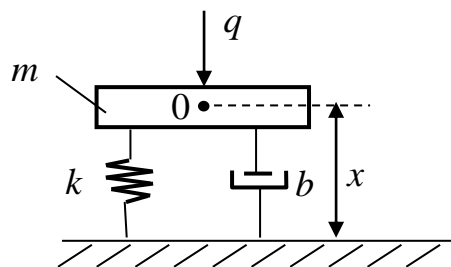


Рис. 2.

где k , b – коэффициенты упругости (жесткости) и диссипации соответственно; x – перемещение якоря; m – масса; q – сила, действующая на ИО.

С точки зрения воспроизведения удара (импульсной динамической нагрузки) воспользуемся энергией ускорения [3]

$$W_a = \frac{1}{2} m a^2. \quad (2)$$

При применении энергии ускорения W_a к схеме, изображенной на рис. 2, получается уравнение движения якоря ЭМВ в виде

$$m\dot{a}(t) + ba(t) + k \int a(t) dt = \frac{dq(t)}{dt},$$

где $\dot{a} = \frac{da}{dt}$; t – время,

или

$$m \frac{d^3 x}{dt^3} + b \frac{d^2 x}{dt^2} + k \frac{dx}{dt} = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (3)$$

Будем рассматривать уравнение (3) при действии на ИО со стороны якоря ЭМВ импульса при условии, что в момент приложения ударной нагрузки якорь колебался, имея перемещение $x(t) = x_a \sin(\omega t \pm \varphi)$, скорость $\frac{dx}{dt}(t) = x_a \omega \cos(\omega t \pm \varphi)$, ускорение

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -x_a \omega^2 \sin(\omega t \pm \varphi)$$

$$q(t) = q_a \sin \omega t \frac{dq}{dt}(t) = q_a \omega \cos \omega t.$$

Как видим, (3) является дифференциальным уравнением 3-го порядка, в котором фигурирует скорость ускорения $\frac{dq(t)}{dt} = \frac{d^3 x(t)}{dt^3}$.

При анализе уравнения (3) воспользуемся операторными изображениями Карсона [4]

$$x(t) \xleftrightarrow{\leftarrow} x(p) = p \int_0^{\infty} x(t) e^{-pt} dt. \quad (4)$$

Учтем в изображениях Карсона для составляющих уравнения (3) начальные условия $\frac{d^3 x}{dt^3}(0)$, $\frac{d^2 x}{dt^2}(0)$, $x(0)$ в виде [4]

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^3 x(t)}{dt^3} \xrightarrow{\leftarrow} x_3(p) &= p^3 x(p) - p^3 x(0) - p^2 \frac{dx}{dt}(0) - p \frac{d^2 x}{dt^2}(0), \\ \frac{d^2 x(t)}{dt^2} \xrightarrow{\leftarrow} x_2(p) &= p^2 x(p) - p^2 x(0) - p \frac{dx}{dt}(0), \\ \frac{dx}{dt} \xrightarrow{\leftarrow} x_1(p) &= px(p) - px(0), \\ \frac{dQ}{dt} \xrightarrow{\leftarrow} Q(p) &= pQ(p) - pQ(0). \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Итак, с учетом (5) уравнение (3) в изображениях Карсона имеет вид

$$\begin{aligned} x(p)p(mp^2 + bp + k) &= pQ(p) - pq(0) + x(0)p(mp^2 + bp + k) + \\ &+ p \frac{dx}{dt}(0)(mp + b) + mp \frac{d^2 x}{dt^2}(0). \end{aligned} \quad (6)$$

Из (6) получаем изображение

$$\begin{aligned} x(p) &= \frac{1}{(mp^2 + bp + k)} \left[Q(p) - q(0) + x(0)(mp^2 + bp + k) + \right. \\ &\left. + \frac{dx}{dt}(0)(mp + b) + mp \frac{d^2 x}{dt^2}(0) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

Заметим, что уравнение (3) соответствует динамике якоря ЭМВ в промежутке изменения тягового усилия ЭМВ q на $q + \Delta q$, где Δq – приращение величины тягового усилия. С учетом Δq дифференциальное уравнение движения якоря ЭМВ имеет вид

$$m(\ddot{x} + \Delta\ddot{x}) + b(\dot{x} + \Delta\dot{x}) + k(x + \Delta x) = q + \Delta q, \quad (8)$$

где $\ddot{x} = \frac{d^2 x}{dt^2}$; $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$; $\Delta\ddot{x}, \Delta\dot{x}, \Delta x$ – приращение ускорения, скорости и перемещения якоря ЭМВ при приращении Δq соответственно.

В принципе, уравнение (8) может быть представлено в виде двух уравнений

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{x} + b\dot{x} + kx &= q, \\ m\Delta\ddot{x} + b\Delta\dot{x} + k\Delta x &= \Delta q. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Если второе уравнение соотнести к моменту возникновения Δq , то есть возникновения импульса в гармоническом тяговом усилии q , то тогда это уравнение может быть представлено в виде (3). А это значит, что подвижная часть вибростенда с ЭМВ в гармоническом режиме описывается первым уравнением (9), а в сумме с импульсом Δq – двумя уравнениями (9).

Первое уравнение (9) в изображениях Карсона имеет вид

$$x(p)(mp^2 + bp + k) = q(p). \quad (10)$$

Передаточная функция якоря ЭМВ на основании (10) следующая

$$W_1(p) = \frac{x(p)}{q(p)} = \frac{1}{mp^2 + bp + k} = \frac{1}{mp^2} \frac{1}{1 + \frac{bp + k}{mp^2}}. \quad (11)$$

Структурная схема системы якоря ЭМВ, соответствующая уравнению (10) и $W_1(p) = (11)$, изображена на рис. 5,

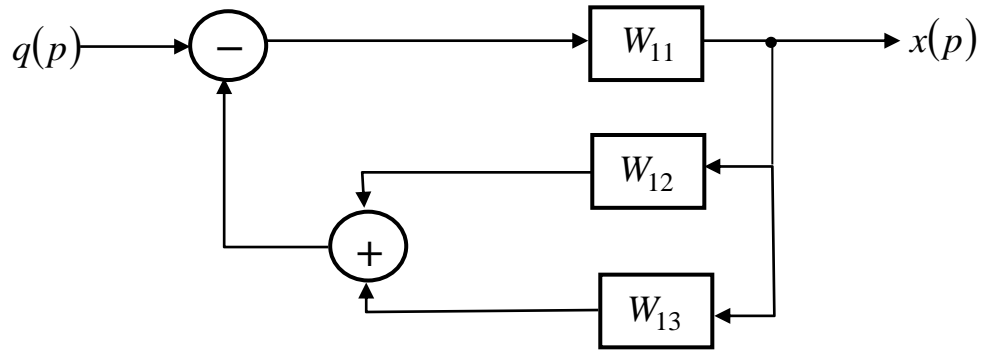


Рис. 3

где $W_{11} = \frac{1}{mp^2}$ – двойной интегратор ($\int \int dt dt$); W_{12} – дифференцирующее звено ($b \frac{d}{dt}$);

$W_{13} = k$ – усилитель (безынерционное звено).

Далее с учетом анализа (10), (11) и схемы, изображенной на рис. 3, представим структурную схему системы якоря ЭМВ, соответствующую уравнениям (7) или

$$x(p) = W_1(p)[q(p) - q(0) + \dot{x}(0)(mp + b) + \ddot{x}(0)m] + x(0). \quad (12)$$

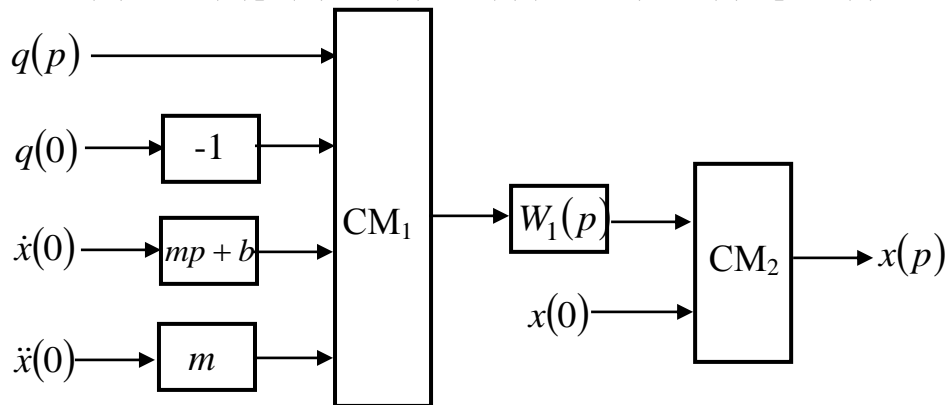
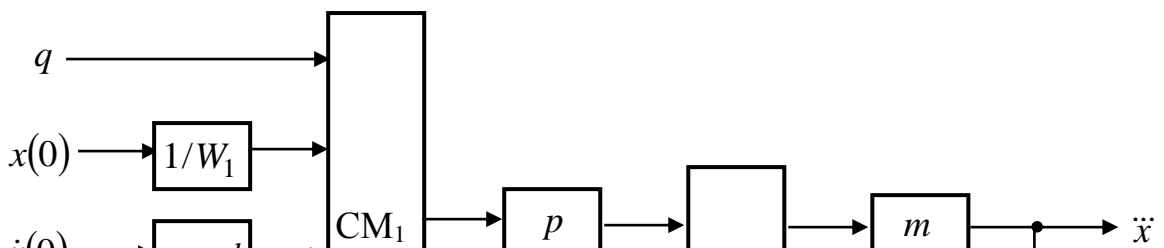


Рис. 4

Как видно из рис. 4 с учетом (11) $x(p)$ связан с $q(p)$ через $W_1(p)$, прямое звено в котором представляет собой двойной интегратор $\frac{1}{mp^2}$, то есть является двойным инерционным звеном. Безынерционность здесь наблюдается под действием величины $x(0)$.

Рассмотрим далее структурную схему (рис. 5) относительно скорости ускорения $\ddot{x}(t) \xrightarrow{\leftarrow} p^3 x(p)$. Для этого запишем в изображениях Карсона уравнение (3) в следующем виде

$$\begin{aligned} m\ddot{x}(p) &= pq(p) - pq(0) - x(p)p(bp + k) + \\ &+ x(0)p \frac{1}{W_1(p)} + \dot{x}(0)p(mp + b) + \ddot{x}(0)mp. \end{aligned} \quad (13)$$



Из рис. 5 видно, что для резкого начального изменения скорости ускорения $\ddot{x}(t)$ обратные связи из-за наличия в них инерционных звеньев в виде интеграторов « \int » не уменьшают действие сигналов на входе усилителя « m » и поэтому при изменении $\Delta q(t)$, по сути, безынерционно изменяется скорость ускорения $\ddot{x}(t)$. Для формирования величины $q + \Delta q$ необходимо на входе ЭМВ изменить электрическое напряжение U на $U + \Delta U$.

Величина тягового усилия в ЭМВ определяется выражением [5]

$$q = \frac{1}{4} \mu_0 S \left(\frac{iw}{\delta} \right)^2, \quad (14)$$

где I – ток в обмотке О; w – число витков этой обмотки; μ_0 – магнитная проницаемость воздуха; S – площадь поперечного сечения полюсов магнитопровода у зазоров δ .

В свою очередь ток $i(t)$ при напряжении $U(t)$ равен

$$i(t) = \frac{U(t)}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

где R – сопротивление электроцепи обмотки О; $\tau = \frac{L}{R}$ – постоянная времени; L – индуктивность обмотки О.

При скачке $U(t)$ на $\Delta U(t)$ переходной процесс будет только от действия $\Delta U(t)$ и формула тока $i(t) + \Delta i(t)$ примет вид

$$i(t) + \Delta i(t) = \frac{U(t)}{R} + \frac{\Delta U}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (15)$$

Подставляя (15) в (14), получим

$$\begin{aligned} q + \Delta q &= \frac{1}{4\delta^2 R^2} \mu_0 S \left[U + \Delta U \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]^2 = \\ &= \frac{\mu_0 S}{4\delta^2} \left[i^2 + 2\Delta i i \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) + \Delta i^2 \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)^2 \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Из (16) видно, что импульс тягового усилия в ЭМВ на переднем фронте имеет некоторый наклон из-за наличия в электрической части ЭМВ индуктивности L . Увеличение крутизны переднего фронта можно осуществить путем увеличения сопротивления R . Тогда $\tau = \frac{L}{R}$ будет уменьшаться, и множитель $\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$ будет стремиться к единице

(при $R \rightarrow \infty$).

Такое решение можно осуществить на основе представления входного сигнала ЭМВ от генератора тока. В этом случае

$$q + \Delta q \approx \frac{\mu_0 S}{4\delta^2} (i^2 + 2i\Delta i + \Delta i^2)$$

и скорость изменения ускорения \ddot{x} изменяется импульсно.

Таким образом, данное исследование показало, что при определенных условиях на испытательном вибростенде с ЭМВ возможно воспроизводить импульсные нагрузки на испытываемые изделия.

Статья выполнена при финансовой поддержке Государственного Фонда Фундаментальных Исследований Украины (проект № Ф53.7/038) и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 13-08-90419 Укр_ф_а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Божко А.Е., Крупенин В.Л., К.Б. Мягкохлеб К анализу математической модели и структурной схемы электромагнитной трехкоординатной системы возбуждения вибраций.// Интернет-журнал «Вестник научно-технического развития», www.vntr.ru, №6 (70).-2013.- С.3-9.
2. Широкополосные виброударные генераторы механических колебаний/ Крупенин В.Л., Веприк А.М. и др. Л.: Машиностроение, 1987. 76 с.
3. Аппель П. Теоретическая механика. М: Физматгиз, 1960. – Т. 2. – 488 с.
4. Гинзбург С.Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – М.: Сов. радио, 1959. – 404 с.
5. Теория электромагнитных вибровозбудителей / Под ред. чл.-кор. НАН Украины А.Е. Божко, Харьков: ХНАДУ, 2009. – 414 с.