

УДК 62.50.531|534

## ДИНАМИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЯ ПРИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИИ УДАРА

© Александр Евгеньевич Божко<sup>1</sup>, Виталий Львович Крупенин<sup>2</sup>,  
Константин Борисович Мягкохлеб<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков,  
Украина

[mkb2004@ukr.net](mailto:mkb2004@ukr.net)

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения  
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия

[krupeninster@gmail.com](mailto:krupeninster@gmail.com)

**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.

## DYNAMICS OF THE ELECTROMAGNETIC VIBRATION EXCITER WHEN PLAYING SHOCK

A.Bozhko<sup>1</sup>, V.Krupenin<sup>2</sup>, K. Myagkokhlib<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The A.N. Podgorny Institute for Mechanical Engineering Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPMash NAS of Ukraine)

<sup>2</sup>Federal budget-funded research Institute of Machines Science named after A.A.Blagonravov of the Russian Academy of Science

**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 испытываемых 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 испытываемый объект. Для адекватности условий эксплуатации и испытаний этого объекта необходимо равенство механических напряжений в испытываемых объектах, определяемых по формуле

$$\sigma = \frac{q}{S_u} = \frac{ma}{S_u},$$

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

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

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,

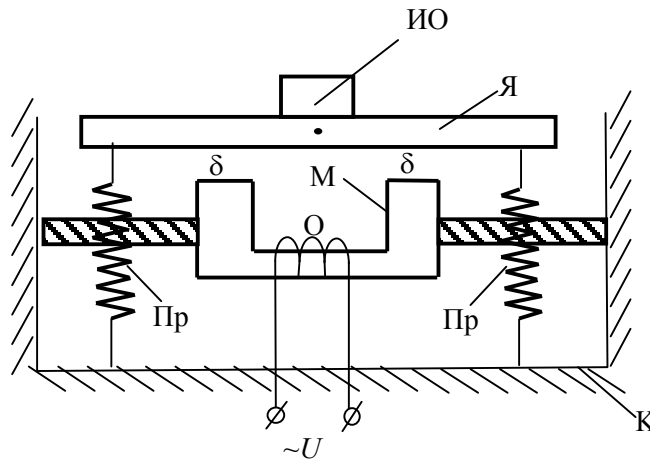


Рис. 1.

где М – магнитопровод; Я – якорь; ИО – испытуемый объект; Пр – пружины; О – электрическая катушка (обмотка);  $U$  – входное управляющее электрическое напряжение; К – корпус вибростенда;  $\delta$  – 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,

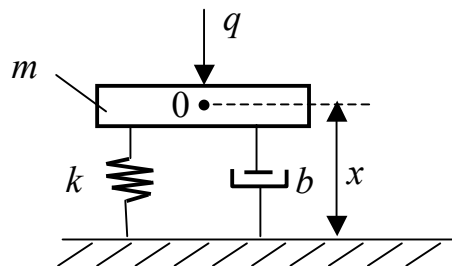


Рис. 2.

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]

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

Учтем в изображениях Карсона для составляющих уравнения (3) начальные условия

$$\frac{d^3 x}{dt^3}(0), \frac{d^2 x}{dt^2}(0), x(0) \text{ в виде [4]}$$

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

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

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

Из (6) получаем изображение

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

Заметим, что уравнение (3) соответствует динамике якоря ЭМВ в промежутке изменения тягового усилия ЭМВ  $q$  на  $q + \Delta q$ , где  $\Delta q$  – приращение величины тягового усилия. С учетом  $\Delta q$  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  $\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$ ;  $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ ;  $\Delta\ddot{x}, \Delta\dot{x}, \Delta x$  – приращение ускорения, скорости и перемещения якоря

ЭМВ при приращении  $\Delta q$  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 соотносить к моменту возникновения  $\Delta q$ , 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  $\Delta q$  – 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,

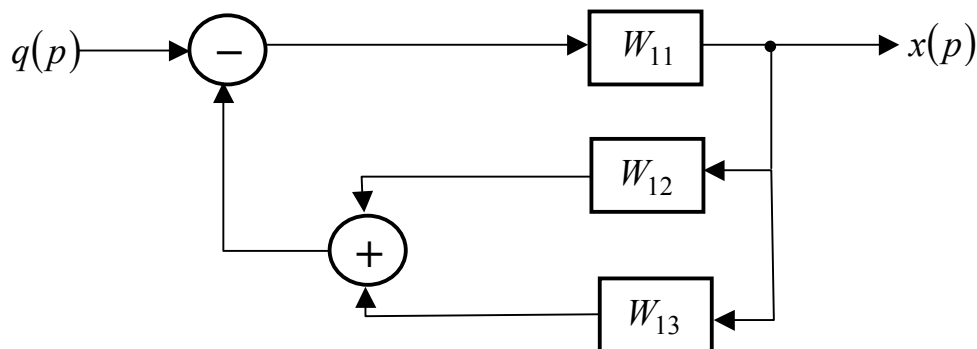


Рис. 3

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

$W_{13} = k$  – 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

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

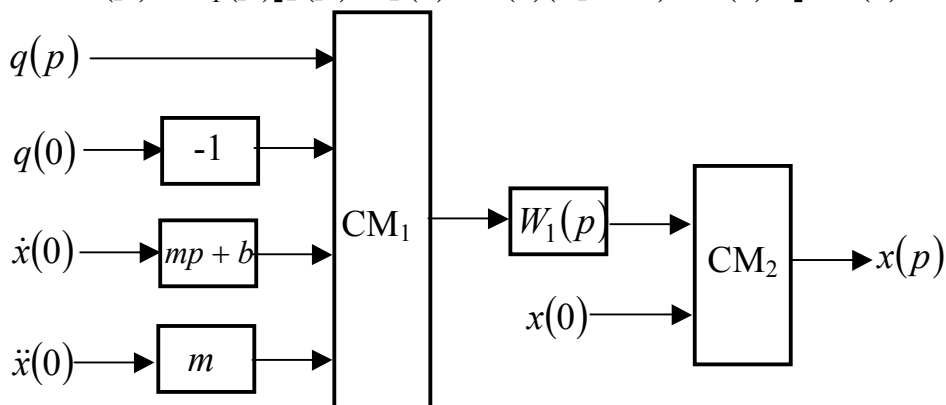


Рис. 4

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 звено. Безынерционность здесь наблюдается под действием величины  $x(0)$ .

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

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

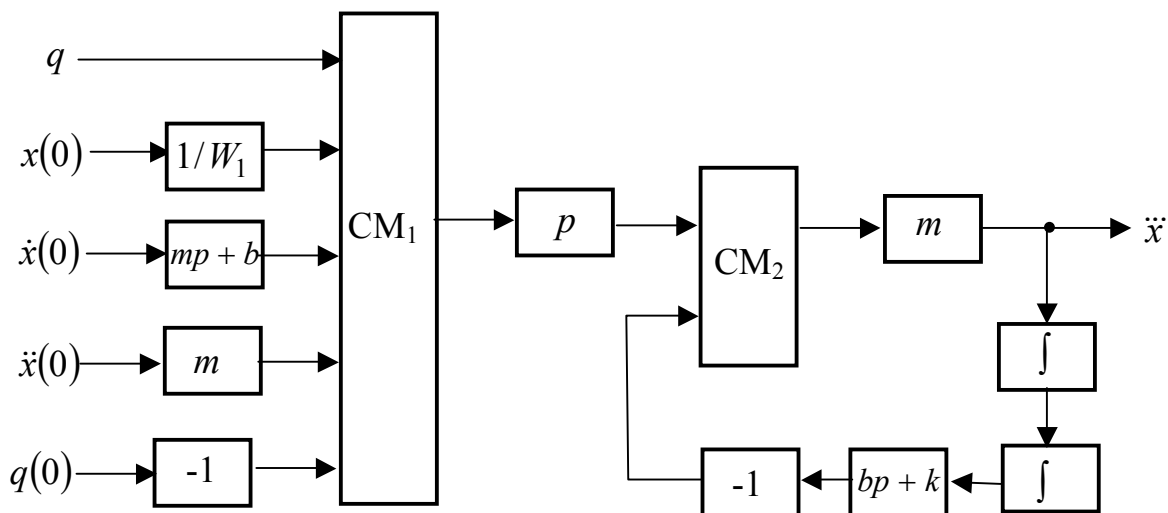


Рис. 5

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]

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

где  $I$  – ток в обмотке  $O$ ;  $w$  – число витков этой обмотки;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздуха;  $S$  – площадь поперечного сечения полюсов магнитопровода у зазоров  $\delta$ .

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  $O$ ;  $\tau = \frac{L}{R}$  – постоянная времени;  $L$  – индуктивность обмотки  $O$ .

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.

*Работа 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).*

### Список литературы

1. Божко А.Е., Крупенин В.Л., К.Б. Мякохлеб К анализу математической модели и структурной схемы электромагнитной трехкоординатной системы возбуждения вибраций.// Интернет-журнал «Вестник научно-технического развития», [www.vntr.ru](http://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.