

**А.Е.БОЖКО**, д-р техн. наук, профессор, член-корр. НАН Украины, ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**Е.М. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, доцент, ХНАДУ «ХАДИ», Харьков;  
**З.А.ИВАНОВА**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент, ИПМаш НАН Украины, Харьков;  
**К.Б.МЯГКОХЛЕБ**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., ИПМаш НАН Украины, Харьков

## ИССЛЕДОВАНИЕ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ МОДУЛЯТОРОВ ВИБРАЦИЙ

В данной работе осуществляется попытка более детально определить энергетические показатели электромагнитных вибровозбудителей, находящихся широкое применение в технологических процессах уплотнения сред, для передвижения в конвейерах материалов, в испытательных стендах и т.д. Энергетические показатели определяются с учетом вибрационного движения массы и потерь, возникающих в электрической и механической частях. Эти результаты необходимы для оптимального выбора управляющего устройства по энергетическим показателям.

**Ключевые слова:**якорь, воздушный зазор, демпфирование, жесткость, колебательная система.

**Введение.** Электромагнитные вибровозбудители (ЭМВ) находят широкое применение в технологических процессах уплотнения сред, для передвижения в конвейерах материалов, в испытательных стендах и т.д. [3, 4, 5]. В каждом случае нагрузкой является масса, которая может быть расположена на подвижной части (якоря) ЭМВ непосредственно, либо через упругие элементы (пружины).

**Постановка проблемы.** Для формирования движения якоря в виде вибрации масс необходимо знать энергетические показатели ЭМВ. Подробный анализ и вывод энергетических соотношений с учетом механических нагрузок и частоты колебаний подвижной системы ЭМВ отсутствуют, хотя некоторые краткие данные о мощности ЭМВ в литературе имеются [4, 5]. Исходя из этого, в данной работе осуществляется попытка более детально определить энергетические показатели ЭМВ с учетом вибрационного движения массы и потерь, возникающих в электрической и механической частях. Рассмотрим однотактную электромеханическую схему ЭМВ (рис. 1).

При подключении зажимов обмотки 4 к источнику ( $U$ ) в ней возникает ток  $i$ , который, в свою очередь, в силу действия закона полного тока

$$i\omega = \Phi/G, \quad G = (\mu_0 S)/(2\delta) \quad (1)$$

© А.Е.Божко, Е.М. Иванов, З.А.Иванова, К.Б.Мягкохлеб, 2014

наводит в магнитопроводе 1 магнитный поток  $\Phi$ . В выражении (1):  $w$  – число витков обмотки 4;  $G$  – магнитная проводимость;  $\mu_0$  – магнитная проницаемость воздушного зазора;  $S$  – площадь поперечного сечения полюсов магнитопровода 1 у воздушного зазора  $\delta$ . Магнитный поток  $\Phi$ , проходя по цепи (1, 2 $\delta$ , 2), создает в якоре 2 тяговое усилие  $F$ , вызывающее его колебания.

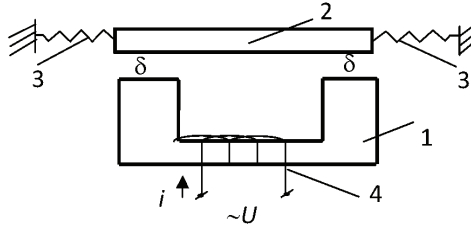


Рисунок 1 – Однотактная электромеханическая схема ЭМВ:

1 – магнитопровод; 2 – якорь; 3 – пружины; 4 – обмотка с электрическим током  $i$ ;  $U$  – задающее переменное напряжение;  $\delta$  – воздушный зазор

Подвижная система 2 включает в себя якорь и испытуемый объект. Движение ее описывается дифференциальным уравнением вида

$$m \cdot d^2x/dt^2 + b \cdot dx/dt + cx = F, \quad (2)$$

где  $m = m_{я} + m_{о}$  – общая масса;  $m_{я}$  – масса якоря 2;  $m_{о}$  – масса испытуемого объекта;  $b$  – коэффициент демпфирования;  $c$  – коэффициент жесткости;  $x$  – перемещение подвижной системы;  $t$  – время.

Для поддержания колебаний платформы стенда (подвижной системы) в течение периода необходим подвод энергии [1]

$$W_c = \int_0^{2\pi/\omega} F \dot{x} dt, \quad \dot{x} = \frac{dx}{dt}, \quad (3)$$

где  $\omega$  – круговая частота колебаний платформы стенда.

Как видно из (3) для определения  $W_c$  необходимо знать  $F$  и  $x$ . Известно [3], что

$$F = \Phi^2 / (\mu_0 S), \quad (4)$$

а если использовать выражение (1) и  $i = I_m \sin \omega_1 t$ , где  $\omega_1$  ( $\omega_1 = \omega/2$ ) – частота входного напряжения  $U$ ;  $I_m$  – амплитуда тока, то тогда

$$W_c = \int_0^{2\pi/\omega} \dot{x} (iw/2\delta)^2 \mu_0 S dt = 1/2 \int_0^{2\pi/\omega} \dot{x} (I_m w/2\delta)^2 \mu_0 S (1 - \cos \omega t) dt. \quad (5)$$

Представим

$$x = x_a \cos(\omega t - \varphi), \quad (6)$$

где  $x_a$  – амплитуда колебаний;  $\varphi$  – сдвиг фаз между  $F$  и  $x$ .

Для колебательной системы с одной степенью свободы [2]

$$x_a = F_a / \left( m \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (b\omega/m)^2} \right). \quad (7)$$

Подставим в (5) продифференцированное по  $t$  выражение (6). Тогда получим

$$W_c = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi/\omega} (I_m w / 2\delta)^2 \mu_0 S x_a \omega (1 - \cos \omega t) \times [ -(\sin(\omega t - \varphi)) ] dt. \quad (8)$$

Учтем в (8) тригонометрическое преобразование вида  $\sin \alpha \cdot \cos \beta = (\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)) / 2$  и введем обозначение

$$1/2 (I_m w / 2\delta)^2 \mu_0 S x_a \omega = A. \quad (9)$$

В этом случае (8) будет иметь вид

$$W_c = A \int_0^{2\pi/\omega} [\cos \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) - \sin(\omega t - \varphi)] dt = \frac{A\pi}{\omega} \sin \varphi. \quad (10)$$

Таким образом, с учетом (9) и (10)

$$W_c = 1/2 (I_m w / 2\delta)^2 \pi \mu_0 S x_a \sin \varphi \quad (11)$$

или, если учесть (7) и что

$$F_a = 1/2 (I_m w / 2\delta)^2 \mu_0 S, \quad (12)$$

то

$$W_c = \pi F_a \cdot x_a \sin \varphi = \pi m x_a^2 \sin \varphi \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (b\omega/m)^2} \quad (13)$$

или

$$W_c = \frac{\pi}{4} (\mu_0 S)^2 \cdot \left( \frac{I_m w}{2\delta} \right)^4 \sin \varphi \times \left[ m \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (b\omega/m)^2} \right]^{-1}, \quad (14)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{c/m}; \quad \varphi = \arctg(b\omega / (c - m\omega^2)). \quad (15)$$

Как видно из выражений (13) и (15) для поддержания колебаний платформы стенда с заданной максимальной амплитудой  $x_a$  при известных параметрах электромагнитного возбудителя  $m, b, c$  требуется подвод энергии  $W_c$ . При изменении механических параметров вибровозбудителя будет изменяться и величина  $W_c$ .

Средняя мощность, которой должен обладать усилитель мощности ЭМВС для возбуждения колебаний  $x$ , определяется выражением

$$P_{cp} = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} F \dot{x} dt = \frac{\omega}{2\pi} W_c, \quad (16)$$

Подставим (16) в (14)

$$P_{cp} = \frac{\omega}{8} (\mu_0 S)^2 \cdot \left( \frac{I_m W}{2\delta} \right)^4 \sin \varphi \times \left[ m \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (b\omega/m)^2} \right]^{-1}. \quad (17)$$

На основании закона Ома

$$I_m = U_m / r, \quad (18)$$

где  $U_m$  – амплитуда входного напряжения  $U$ ;  $r$  – активное сопротивление электрической цепи обмотки 4, получаем

$$P_{cp} = \frac{\omega}{8} (\mu_0 S)^2 \cdot \left( \frac{U_m W}{2\delta r} \right)^4 \sin \varphi \times \left[ m \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (b\omega/m)^2} \right]^{-1}. \quad (19)$$

Выразим  $\sin \varphi$  через параметры подвижной системы  $\sin \varphi = tg \varphi / \sqrt{1 + tg^2 \varphi}$  и, учитывая (15), получим

$$\sin \varphi = b\omega / (c - m\omega^2) \left[ \sqrt{1 + (b\omega / (c - m\omega^2))^2} \right]^{-1}. \quad (20)$$

Подставим (20) в (19)

$$P_{cp} = \frac{b\omega^2}{8(c - m\omega^2)} (\mu_0 S)^2 \cdot \left( \frac{U_m W}{2\delta r} \right)^4 \left[ \sqrt{1 + (b\omega / (c - m\omega^2))^2} \right]^{-1} \times \left[ m \sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + (b\omega/m)^2} \right]^{-1}. \quad (21)$$

Следует отметить, что если взять управляющее устройство ЭМВС мощностью  $P_{cp}$ , то для осуществления колебаний платформы она будет уменьшена из-за мощности рассеяния, равной  $P_r = b\dot{x}^2 + ri^2$ . Поэтому общая средняя мощность генератора с напряжением  $U$  должна быть

$$P_{общcp} = P_{cp} + P_r. \quad (22)$$

Выразим (22) через параметры ЭМВ, входное воздействие  $U$  и перемещение  $x$ . При этом будем учитывать максимальное значение  $P_r$ , а для этого возьмем  $\dot{x} = \dot{x}_a = \omega x_a$  и  $i = I_m = U_m / r$ . Тогда  $P_{r \max} = b\omega x_a U_m^2 / r$ , и общая мощность ЭМВС записывается выражением  $P_{общcp} = P_{cp} + P_{r \max}$ .

Если для движения платформы необходимо иметь несколько ЭМВ, то тогда

$$P_{обц} = \sum_{k=1}^n P_k = P_{cp} + \sum_{k=1}^n P_{rk} ; \quad \sum_{k=1}^n P_{rk} = b\dot{x}^2 + \sum_{k=1}^n i_k^2 R_k . \quad (23)$$

**Вывод.** В статье представлено доскональное решение задачи об определении мощности ЭМВ стенда. Эти результаты необходимы для оптимального выбора управляющего устройства по энергетическим показателям.

**Список литературы:** 1. Божко А.Е. Воспроизведение вибраций. – К.: Наукова думка, 1975. – 191 с. 2. Божко А.Е., Голуб Н.М. Динамико-энергетические связи колебательных систем. – К.: Наукова думка, 1980. – 188 с. 3. Божко А.Е., Пермяков В.И., Пушня В.А. Методы проектирования электромеханических вибровозбудителей. – К.: Наукова думка, 1989. – 208 с. 4. Вибрации в технике. В 6-ти т. – Т.2 / Под ред. д.т.н. И.И. Блехмана. – М.: Машиностроение, 1979. – 352 с. 5. Вибрации в технике. В 6-ти т. – Т.4 / Под ред. д.т.н. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 510 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bozhko A.E. Vosproizvedenie vibracij. Kyuyiv: Naukova dumka, 1975. 191 Print. 2. Bozhko A.E., Golub N.M. Dinamiko-energeticheskie svyazi kolebatel'nyh sistem. Kyuyiv: Naukova dumka, 1980. 188 Print. 3. Bozhko A.E., Permyakov V.I., Pushnya V.A. Metody proektirovaniya elektromehanicheskih vibrovzbuditelej. Kyuyiv: Naukova dumka, 1989. 208 Print. 4. Vibracii v tehnikе. V 6-ti t. Vol.2. Pod red. d.t.n. I.I. Blehmana. Moscow: Mashinostroenie, 1979. 352 Print. 5. Vibracii v tehnikе. V 6-ti t. Vol.4. Pod red. d.t.n. E.E. Lavendela. Moscow: Mashinostroenie, 1981. 510 Print.

*Поступила (received) 04.02.2014*

УДК 534/143

**Дослідження потужності електромагнітних модуляторів вібрацій / А.Е.Божко, Е.М. Іванов, З.А.Іванова, К.Б.Мягкохлеб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 57 (1099). – С. 14-18. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9130.**

У даній роботі здійснюється спроба детальніше визначити енергетичні показники електромагнітних вібровозбудувачів, які знаходять широке застосування в технологічних процесах ущільнення середовищ, для пересування в конвеєрах матеріалів, у випробувальних стендах та ін. Енергетичні показники визначаються з урахуванням вібраційного руху маси і втрат, що виникають в електричній і механічній частинах. Ці результати необхідні для оптимального вибору керуючого пристрою за енергетичними показниками.

**Ключові слова:** якір, повітряний зазор, демпфірування, твердість, коливальна система.

УДК 534/143

**Исследование мощности электромагнитных модуляторов вибраций / А.Е.Божко, Е.М. Иванов, З.А.Иванова, К.Б.Мягкохлеб // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 57 (1099). – С. 14-18. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2078-9130.**

В данной работе осуществляется попытка более детально определить энергетические показатели электромагнитных вибровозбудителей, находящих широкое применение в технологических процессах уплотнения сред, для передвижения в конвейерах материалов, в испытательных стендах и т.д. Энергетические показатели определяются с учетом вибрационного движения массы и потерь, возникающих в электрической и механической частях. Эти результаты необходимы для оптимального выбора управляющего устройства по энергетическим показателям.

**Ключевые слова:** якорь, воздушный зазор, демпфирование, жесткость, колебательная

**An investigation of the power of the electromagnetic modulator of vibrations / A.E.Bozhko, E.M. Ivanov, Z.A.Ivanova, K.B.Myagkohleb // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 57 (1099). – P. 14-18. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2078-9130.**

Electromagnetic vibroexciters find wide adaptation in technological processes of condensation of environments, for movement in conveyors of materials, in test beds, etc. In each case loading is the weight which can be located on mobile parts (rotor) electromagnetic exciters directly, or through elastic elements (springs). For formation of movement of an rotor in the form of weights vibration it is necessary to know power parameters electromagnetic vibroexciter. The detailed analysis and a conclusion of power correlation taking into account of mechanical loadings and frequencies of mobile system electromagnetic exciters vibrations are absent, though some brief data about power electromagnetic exciters in the literature are available. In this paper an attempt is made to further define the energy indicators of electromagnetic exciters with regard to the vibratory motion of the mass and losses arising in electrical and mechanical parts.

**Key words:** anchor, air gap, damping, rigidity, oscillatory system.