

УДК 534/143

**А.Е. БОЖКО; З.А. ИВАНОВА; Е.М. ИВАНОВ****ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЕЙ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ**

В данной работе исследуется проблема построения математических моделей и блок-диаграмм колебаний платформы в дорезонансной и резонансной областях электромагнитных вибровозбудителей. Вибровозбудители широко используются в вибрационных испытательных стендах. Они должны функционировать в широком диапазоне частот (в области низких частот до  $2 \div 5$  мм, и высоких - десятые доли мм), особенно в тех случаях, когда необходимо провести испытания (двигателей транспортных средств и др.) в условиях, соответствующих эксплуатационным, так как в этом случае амплитуда колебаний, воздействуя на испытуемые объекты, изменяется в широких пределах.

**Ключевые слова:** воздушный зазор, амплитуда вибраций, активное сопротивление, индуктивное сопротивление.

**Введение.** Электромагнитные вибровозбудители (ЭМВ) широко используются в вибрационных испытательных стендах [2], причем они должны функционировать в широком диапазоне частот, особенно в тех случаях, когда необходимо проводить испытания изделий (двигателей транспортных средств и др.) в условиях, эквивалентных эксплуатационным. Амплитуды вибраций, действующих на испытуемые объекты, при этом изменяются в больших пределах (на низких частотах до  $2 \div 5$  мм, а на высоких - десятые доли мм), что заставляет проектировщиков ЭМВ выбирать величину воздушного зазора  $\delta$  ЭМВ, исходя из максимальных значений амплитуд вибраций и предъявления определенных требований к пружинам подвижной части ЭМВ.

**Постановка проблемы.** Вследствие предположения, что ЭМВ работает в широком интервале изменения амплитуд вибраций  $x_{a1}$  массы  $m$ , считаем, что величины  $x_{a1}$  и  $\delta$  могут быть сравнимы. Поэтому, при  $x_1 = x_{a1} \sin \omega_1 t$ , где  $\omega_1$ ,  $t$  - круговая частота и время соответственно; воздушный зазор между якорем и полюсом магнитопровода при  $(\delta - x_{a1} \sin \omega_1 t)$  может быть близок к нулю, что вносит существенные изменения в электромагнитные соотношения в ЭМВ. Если  $x_{a1} \ll \delta$ , что справедливо для высокочастотного диапазона воспроизводимых вибраций, то в этом случае величиной  $x_{a1}$  пренебрегаем по сравнению с величиной  $\delta$ .

На наш взгляд, наиболее важным являются исследования случая  $\delta \approx x_{a1}$ , что соответствует колебаниям массы в дорезонансной и в самой резонансной областях.

Так как на вход ЭМВ подается электрическое переменное напряжение  $U = U_a \sin \omega_2 t$ , где  $\omega_2$  - круговая частота ( $\omega_2 = \omega_1/2$  [2]), то для построения, как математической модели, так и структурной схемы ЭМВ, необходимо тяговое усилие  $F$  выразить относительно  $U$  и электромагнитных параметров ЭМВ (числа витков обмотки -  $w$ , магнитной проницаемости воздушного зазора -  $\mu_0$ , площади поперечного сечения полюсов магнитопровода -  $S$ , магнитной проводимости -  $G$ ). Для этого запишем уравнение электрической цепи ЭМВ и воспользуемся законом полного тока [1] с учетом индуктивного сопротивления

$$U = ri + L \frac{di}{dt}; \quad L = w^2 G, \quad (1)$$

при этом будем учитывать изменение воздушного зазора, то есть

$$G = \mu_0 S / (2(\delta - x_1)), \quad (2)$$

где  $r$ ,  $L(\delta - x_1)$  - активное сопротивление и индуктивность соответственно; сопротивление  $r = r_1 + r_0$ , где  $r_1$ ,  $r_0$  - активные сопротивления электрической цепи до зажимов обмотки и собственно провода обмотки соответственно.

Для составления математической модели и структурной схемы воспользуемся операторным методом, нашедшим применение в теории автоматического управления [3].

На основании закона полного тока, индуктивного сопротивления и с учетом изменения воздушного зазора

$$\Phi = iwG = iw \frac{\mu_0 S}{2(\delta - x_1)};$$

$$i(p) = \frac{U(p)}{r + \frac{\mu_0 S p}{2(\delta - x_1)}} = \frac{U(p)(\delta - x_1)}{r(\delta - x_1) + kp},$$

где  $k = w^2 \mu_0 S / 2$ ;  $p = d/dt$ ;  $\Phi$  - магнитный поток, тогда

$$F = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S} = i^2 \frac{k}{2(\delta - x_1)^2} \rightarrow \frac{U^2(p)k}{2[r(\delta - x_1) + kp]^2}. \quad (3)$$

Подставим (3) в дифференциальное уравнение подвижной массы  $m$

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

( $m = m_{\text{я}} + m_0$  - общая масса;  $m_{\text{я}}$  - масса якоря 2;  $m_0$  - масса испытуемого объекта;  $b$  - коэффициент демпфирования;  $c$  - коэффициент жесткости;  $x$  - перемещение подвижной системы;  $t$  - время) с учетом представления в операторной форме получим

$$x(m_1 p^2 + b_1 p + c_1) = U^2 k / (2[r(\delta - x_1) + kp]^2). \quad (4)$$

Преобразуем (4), обозначив  $U^2 k / 2 = U_1$ . В результате получим

$$W_1(p) [x_1 (r^2 \delta^2 + 2rk \delta k + k^2 p^2) - 2rx_1^2 (r\delta + kp) + x_1^3 r^2] = U_1, \quad (5)$$

где  $W_1(p) = m_1 p^2 + b_1 p + c_1$ .

Анализируя выражение (5), приходим к построе-

нию структурной схемы без РМ, изображенной на рис. 1, причем приведенные на нем передаточные функции имеют следующий вид

$$W_2(p) = w_2^{-1}(p); \quad W_3(p) = (r^2 \delta^2 + 2rk \delta k + k^2 p^2)^{-1}; \\ W_4(p) = (2r(r\delta + kp))^{-1}; \quad W_5(p) = 1/r^2.$$

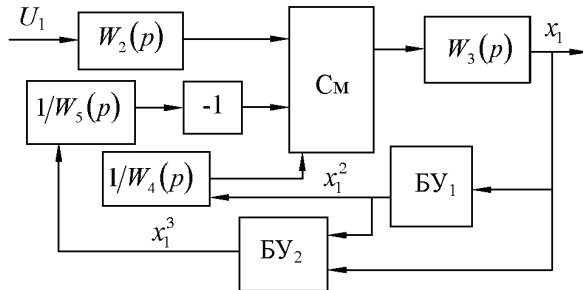


Рисунок 1 – Структурная схема ЭМВ без РМ: где См – сумматор; БУ<sub>1</sub>, БУ<sub>2</sub> – блоки умножения;  $\square$  – инвертор;  $W_2(p)$ ,  $W_3(p)$ ,  $W_4(p)$ ,  $W_5(p)$  – звенья с передаточными функциями

Таким образом, на основании выражения (5) и структурной схемы, изображенной на рис. 1, математическая модель ЭМВ без РМ имеет вид

$$(U^2 k W_2 / 2 + x_1^2 / W_4 - x_1^3 / W_5) W_3 = x_1.$$

**Выводы.** В ЭМВ без РМ колебания платформы осуществляются под действием сил  $U^2 k W_2 / 2$ ;  $x_1^2 / W_4$ ;  $-x_1^3 / W_5$ , возникающих в результате возведения в квадрат и умножения на  $W_2 k / 2$  задающего напряжения  $U$ , создаваемых положительной обратной связью  $x_1^2 / W_4$  и отрицательной обратной связью  $-x_1^3 / W_5$ .

Если в ЭМВ активное сопротивление ( $r$ ) значительно меньше индуктивного ( $L_p$ ), что, в принципе, практически возможно, то, принимая в этом случае  $r = 0$ , из (5) получаем уравнение вида

$$W_1 x_1 k^2 p^2 = U_1$$

и передаточная функция

$$W(p) = x_1(p) / U_1(p) = 1 / (k^2 p^2 (m_1 p^2 + b_1 p + c_1)),$$

из которой видно, что в этом случае обратные связи, сумматор См исчезают, и система ЭМВ становится разомкнутой.

**Список литературы:** 1. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с. 2. Вибрации в технике. В 6-ти т. / Под ред. Э. Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – Т.4. – 510 с. 3. Теория автоматического управления / Под ред. А. В. Нетушила. – М.: Высшая школа, 1976. – 400 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Bessonov L. A. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. L. A. Bessonov. Moscow: Vysshaya shkola, 1978. 528. Print. 2. Vibracii v tehnikе. In 6 vol. Pod red. E. E. Lavendela. Moscow: Mashinostroenie, 1981. Vol. 4. 510. Print. 3. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. A. V. Netushila. Moscow: Vysshaya shkola, 1976. 400. Print.

Поступила (received) 27.10.2015

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Божко Александр Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, член-корр. НАН Украины, Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины

**Alexander Bozhko**, Doctor of Technical Science, Professor, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Institute of Problems of Mechanical Engineering named after A.N. Podgorny The National Academy of Sciences of Ukraine

**Иванова Зоя Александровна**, кандидат технических наук, доцент, ст. науч. співр., Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины: тел. (+380 572) 94-15-51; e-mail: bozhko@ipmach.kharkov.ua

**Ivanova Zoya Aleksandrovna**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher Assistant Institute of Problems of Mechanical Engineering named after A.N. Podgorny The National Academy of Sciences of Ukraine: phone (+380 572) 94-15-51; e-mail: bozhko@ipmach.kharkov.ua

**Иванов Евгений Мартьянович**, кандидат технических наук, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет: тел. (+38 057) 707-37-24; e-mail: repositiv@mail.ru

**Ivanov Evgeny Martynovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Kharkov National Automobile and Highway University: phone (+38 057) 707-37-24; e-mail: repositiv@mail.ru