

Член-корреспондент НАН Украины А. Е. Божко

О подмагничивании двухтактного электромагнитного вибровозбудителя

Наводиться прикладна теорія визначення тягового зусилля двотактного електромагнітного вібровбуджувача з підмагнічуванням.

Несмотря на существующие исследования о двухтактных электромагнитных вибровозбудителях (ДЭМВ) [1–3], вопросы их подмагничивания пока оставались без внимания. Однако пренебрегать подмагничиванием в этих ДЭМВ, на наш взгляд, нецелесообразно по причине возможного в этом случае увеличения тягового усилия. Для рассмотрения этого вопроса представим на рис. 1 электромагнитомеханическую схему ДЭМВ, где М1, М2 — магнитопроводы; Я — якорь; 01, 03 — обмотки однополупериодного тока i_{\sim} ; 02, 04 — обмотки постоянного тока (подмагничивания); δ — воздушный зазор; Д1, Д2 — диоды; $\sim U_1$ — переменное напряжение; $= U_2$ — постоянное напряжение; Пр — пружины; //// — корпус.

Как видно из рис. 1, по обмоткам 02, 04 протекают постоянные токи i_2, i_4 . Если эти обмотки включить последовательно, то по ним будет протекать один ток i_n . По обмоткам 01, 03 в соответствующий полупериод напряжения $\sim U_1(t) = U_a \sin \omega t$, где U_a — амплитуда; ω — круговая частота ($\omega = 2\pi f$, f — частота, Гц); t — время, протекают через диоды Д1, Д2 токи i_1, i_3 . Постоянные токи i_2, i_4 или i_n намагничивают свои магнитные системы М1+ δ +Я+ δ +М1 и М2+ δ +Я+ δ +М2, создавая в них магнитные потоки Φ_2, Φ_4 , которые, в свою очередь, создают постоянные тяговые усилия F_2, F_4 . Если $U_1(t) = 0$, то [4]

$$F_2 = \frac{\Phi_2^2}{\mu_0 S}, \quad F_4 = \frac{\Phi_4^2}{\mu_0 S}, \quad (1)$$

где μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; S — площадь поперечного сечения полюса магнитопровода М1 или М2.

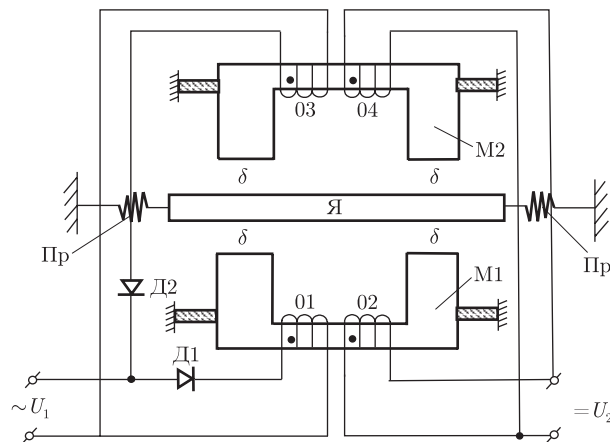


Рис. 1

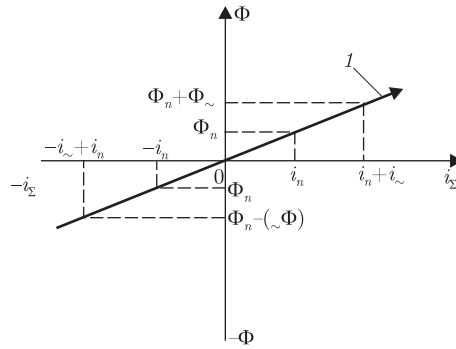


Рис. 2

При равенстве F_2 и F_4 якорь Я остается неподвижным. Возникает вопрос — с какой целью в систему ДЭМВ вводится подмагничивание? Постараемся ответить следующим образом. Если нет подмагничивания в ДЭМВ, то тяговое усилие при объединении действия токов i_1, i_3 равно

$$F_{\sim} = \frac{\Phi_{\sim}^2}{\mu_0 S}, \quad (2)$$

где Φ_{\sim} — магнитный поток, создаваемый токами i_1, i_3 на основе закона полного тока [5]. Из (2) видно, что чем больше Φ_{\sim} , тем больше тяговое усилие F_{\sim} . Этот факт можно проиллюстрировать на рис. 2, где I — кривая намагничивания магнитных систем ДЭМВ; Φ — магнитный поток; i_{Σ} — общий ток; i_n, i_{\sim} — токи подмагничивания и переменный; Φ_n, Φ_{\sim} — магнитные потоки подмагничивания и переменный.

Как видно из рис. 2, при наличии Φ_n общий магнитный поток $\Phi_{\Sigma} = \Phi_n + \Phi_{\sim}$ увеличивается и переменный Φ_{\sim} совместно с Φ_n (см. (1), (2)) может создать большее тяговое усилие F_{Σ} по сравнению с отсутствием Φ_n . Более доказательно покажем это преимущество математически.

В каждый полупериод по якорю Я проходит суммарный поток $|\Phi_{\sim} + \Phi_n|$, а это значит, что тяговое усилие в каждый полупериод будет равно со своим знаком + или —

$$F_{\Sigma} = \frac{(\Phi_{\sim} + \Phi_n)^2}{\mu_0 S} = \frac{1}{\mu_0 S} (\Phi_{\sim}^2 + 2\Phi_{\sim}\Phi_n + \Phi_n^2). \quad (3)$$

Переменная составляющая в (3) $F_{\sim} = \Phi_{\sim}^2 + 2\Phi_{\sim}\Phi_n$, т.е. по сравнению с тяговым усилием F_{\sim} , определяемым по формуле (2), в данном случае больше на величину $2\Phi_{\sim}\Phi_n$, что, конечно, существенно. Остается найти связь между $(\Phi_{\sim} + \Phi_n)$ и токами $i_1 - i_4$ в обмотках 01–04. Для этого составим уравнения соответствующих электрических цепей с учетом их взаимосвязи. С целью упрощения без изменения существа исследования в силу идентичности параметров как магнитных систем, так и электрических, будем рассматривать работу ДЭМВ в один полупериод задающего напряжения U_1 , а затем отождествим эти результаты на другой полупериод U_1 . Для электрической цепи обмотки 01 уравнение будет следующим:

$$U_1 = e_{1R1} + e_{1L1} + e_{1M}. \quad (4)$$

Здесь e_{1R1}, e_{1L1}, e_{1M} — напряжения на активном сопротивлении $R1$, индуктивности $L1$, взаимоиנדуктивности M соответственно. Взаимоиндуктивность $M = w_1\Phi_2/i_2 = w_1\Phi_1/i_1$

возникла из связи токов i_1, i_2 с магнитными потоками Φ_1, Φ_2 . В данном случае под i_2, Φ_2 подразумеваются ток i_n и магнитный поток Φ_n подмагничивания. Обычно в электромагнитных вибровозбудителях (ЭМВ) активное сопротивление $R1$ обмотки намного меньше, чем индуктивное. Поэтому в (4) практически величиной e_{1R1} можно пренебречь. Тогда

$$U_1 = e_{1L1} + e_{1M} = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{w_1 \Phi_2}{i_2} \frac{di_2}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{w_1}{w_2} L_2 \frac{di_2}{dt}, \quad (5)$$

где L_1 — индуктивность обмотки 01 ($L_1 = w_1 \Phi_1 / i_1$); L_2 — индуктивность обмотки 02 ($L_2 = w_2 \Phi_2 / i_2$).

Так как по обмотке 01 идет переменный ток i_1 , то этот ток с коэффициентом трансформации k_T создает в обмотке 02 переменный ток $i_{2\sim} = k_T i_1$. Тогда общий ток

$$i_2 = i_{2=} + i_{2\sim} = i_{2=} + k_T i_1. \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5), получим

$$U_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{w_1}{w_2} L_2 \left(\frac{di_{2=}}{dt} + k_T \frac{di_1}{dt} \right) = L_\Sigma \frac{di_1}{dt}, \quad (7)$$

где

$$L_\Sigma = L_1 + \frac{w_1}{w_2} k_T L_2; \quad k_T = \frac{w_1}{w_2} \frac{\omega L_1}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

Пусть, как было отмечено ранее, $U_1(t) = U_{a1} \sin \omega t$. Тогда (7) представим в виде $U_{a1} \sin \omega t = L_\Sigma di_1 / dt$, откуда

$$i_1 = \frac{U_{a1}}{L_\Sigma} \int_0^{T/2} \sin dt = \frac{-U_{a1}}{L_\Sigma \omega} \left(1 - \cos \omega \frac{T}{2} \right). \quad (8)$$

Таким образом, в каждый полупериод в магнитных системах ДЭМВ проходят магнитные потоки Φ_1, Φ_2 и соответственно равные им Φ_3, Φ_4 , создаваемые токами $i_1(t)$, выраженные формулой (8) и i_2 , выраженной формулой (6).

На основании закона полного тока [5] эти потоки записываются выражением

$$\Phi_1 = i_1 w_1 G_1;$$

$$\Phi_2 = i_2 w_2 G_2 = i_{2=} w_2 G_2 + i_{2\sim} w_2 G_2 = i_{2=} w_2 G_2 + k_T i_1 w_2 G_2 = \Phi_{2=} + \Phi_{2\sim}.$$

Ток $i_{2=} = U_2 / R_2$, где R_2 — активное сопротивление обмотки 02.

Общий магнитный поток в каждый полупериод $U_1(t)$ равен (имеется в виду согласное включение обмоток 01, 02 и 03, 04)

$$\Phi_1 + \Phi_2 = i_1 w_1 G_1 + i_{2=} w_2 G_2 + k_T i_1 w_2 G_2.$$

Здесь $G_1 = G_2 = G$ — магнитные проводимости в ДЭМВ ($G = \mu_0 S / (2\delta)$). Используя (3) при условии, что $\Phi_1 = \Phi_{\sim}, \Phi_2 = \Phi_{\Pi}$, получим

$$F_\Sigma = \frac{G^2}{\mu_0 S} [i_1 (w_1 + k_T w_2) + i_2 w_2]^2 = \frac{\mu_0 S}{4\delta^2} [(i_1 w)^2 + (i_2 w_2)^2 + 2i_1 i_2 w w_2], \quad (9)$$

где $w = w_1 + k_T w_2$.

Подставим в (9) выражения (8) и $i_2 = \frac{U_2}{R_2} + i_{2\sim}$. Тогда

$$F_{\Sigma} = \frac{\mu_0 S}{4\delta^2} \left[\left(\frac{U_{a1} w}{L_{\Sigma} \omega} \right)^2 \left(1 - \cos \frac{T}{2} \right)^2 + w_2^2 \left(\frac{U_2}{R_2} + i_{2\sim} \right)^2 + 2 \frac{U_{a1}}{\omega L_{\Sigma}} \left(1 - \cos \frac{T}{2} \right) w w_2 \left(\frac{U_2}{R_2} + i_{2\sim} \right) \right], \quad (10)$$

где

$$i_{2\sim} = \frac{U_{2\sim}}{\sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} = \frac{U_{a1} w_2 \sin \omega t}{w_1 \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

Заметим, что

$$L_1 = w_1^2 G; \quad L_2 = w_2^2 G; \quad L_{\Sigma} = G \left[w_1^2 + \frac{(w_1 w_2)^2 \omega}{\sqrt{R_2^2 + (\omega G)^2 w_2^4}} \right].$$

Выражение (10) соответствует каждому полупериоду $U_1(t)$. Поэтому в (10), вместо $\omega T/2$ можно поставить текущее значение времени и соответственно угла, т. е. $(\omega/2)t$ и сразу же в (10) раскроем скобки. Тогда получим

$$F_{\Sigma} = F_{\Sigma 0} + F_{\Sigma \sim},$$

где $F_{\Sigma 0}$, $F_{\Sigma \sim}$ — постоянная и переменная составляющие соответственно,

$$F_{\Sigma 0} = \frac{\mu_0 S}{4\delta^2} \left\{ 3 \left(\frac{U_{a1} w}{L_{\Sigma} \omega} \right)^2 + w_2^2 \frac{U_2^2}{R_2^2} + \left(\frac{U_{a1} w_2^2}{w_1} \right)^2 \frac{1}{2[R_2^2 + (\omega L_2)^2]} + \frac{2U_{a1} U_2 w w_2}{\omega L_{\Sigma} R_2} \right\},$$

$$F_{\Sigma \sim} = \frac{\mu_0 S}{4\delta^2} - 2 \left[\left(\frac{U_{a1} w}{L_{\Sigma} \omega} \right)^2 + \frac{U_{a1} U_2 w w_2}{\omega L_{\Sigma} R_2} \right] \cos \frac{\omega}{2} t - \frac{2U_{a1}^2 w w_2^2}{w_1 \omega L_{\Sigma} \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \sin \frac{\omega}{2} t +$$

$$+ \left[\frac{2U_{a1}^2 w w_2^2}{w_1 \omega L_{\Sigma} \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} + 2 \frac{U_2 U_{a1}^2 w w_2^3}{R_2 w_1 \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \right] \sin \omega t + \frac{1}{2} \left(\frac{U_{a1} w}{L_{\Sigma} \omega} \right)^2 \cos \omega t -$$

$$- \frac{2U_{a1}^2 w w_2^2}{\omega L_{\Sigma} w_1 \sqrt{R_2^2 + (\omega L_2)^2}} \sin \frac{3}{2} \omega t - \frac{U_{a1}^2 w_2^3}{2w_1^2 [R_2^2 + (\omega L_2)^2]} \cos 2\omega t. \quad (11)$$

Как видно из (11), в переменную составляющую $F_{\Sigma \sim}$ входят гармоники с частотами $\omega/2$, ω , $(3/2)\omega$, 2ω . А это значит, что для точного воспроизведения заданного сигнала с заданной частотой ω , что необходимо в электромагнитных вибростендах, осуществить в ДЭМВ невозможно. Эти ДЭМВ могут быть успешно использованы в технологическом оборудовании для транспортеров, вибросит, виброгрохотов и т. д. Из (11) видно увеличение переменного тягового усилия из-за присутствия в ДЭМВ подмагничивания.

Постоянные составляющие $F_{\Sigma 0}$ в ДЭМВ компенсируют друг друга. Подвижная часть ДЭМВ в виде якоря на пружинах, являясь колебательным звеном с одной степенью свободы, под действием $F_{\Sigma \sim}$ вибрирует в виде полигармонического колебания с этими же ча-

стогами, что и в переменной составляющей тягового усилия F_{Σ} , т.е. перемещение якоря совместно с нагрузкой имеет вид

$$x_{\text{я}}(t) = x_{\text{ая}1} \cos\left(\frac{\omega}{2}t - \varphi_x\right) + x_{\text{ая}2} \sin\left(\frac{\omega}{2}t - \varphi_x\right) + x_{\text{ая}3} \cos(\omega t - \varphi_x) + \\ + x_{\text{ая}4} \sin(\omega t - \varphi_x) + x_{\text{ая}5} \sin\left(\frac{3}{2}\omega t - \varphi_x\right) + x_{\text{ая}6} \cos(2\omega t - \varphi_x),$$

где $x_{\text{ая}k}$, $k = \overline{1,6}$, — амплитуда k -й гармоники.

В соответствии с [6] амплитуда $x_{\text{ая}k} = F_{\Sigma \sim ak} / (m_{\text{я}} \sqrt{(\omega_k^2 - \omega_0^2)^2 + (b_{\text{я}} \omega_k / m_{\text{я}})^2})$, $\varphi_x = \arctg \omega_k b_{\text{я}} / (\omega_k^2 - \omega_0^2)$ — угол сдвига между $F_{\Sigma \sim}$ и x_k , $k = \overline{1,4}$, $\omega_1 = \omega/2$; $\omega_2 = \omega$; $\omega_3 = (3/2)\omega$; $\omega_4 = 2\omega$; $m_{\text{я}}$ — масса якоря Я совместно с массой нагрузки; $b_{\text{я}}$ — коэффициент диссипации; ω_0 — собственная частота колебаний массы $m_{\text{я}}$.

Таким образом, в результате данного исследования получены математические выражения тяговых усилий и перемещений подвижной части двухтактного электромагнитного вибровозбудителя.

1. *Вибрации* в технике. В 6-ти т. / Под ред. Э.Э. Лавендела. — Москва: Машиностроение, 1981. — Т. 4. — 512 с.
2. *Божко А. Е., Мякохлеб К. Б.* О некоторых особенностях двухтактных электромагнитных вибровозбудителей // Доп. НАН України. — 2005. — № 5. — С. 76–80.
3. *Божко А. Е., Личкатый Е. А., Мякохлеб К. Б.* О двухтактном электромагнитном вибровозбудителе // Там само. — 2006. — № 5. — С. 90–93.
4. *Ступель Ф. А.* Электромеханические реле. — Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1956. — 355 с.
5. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. — Москва: Высш. шк., 1978. — 528 с.
6. *Божко А. Е., Голуб Н. М.* Динамико-энергетические связи колебательных систем. — Киев: Наук. думка, 1980. — 188 с.

*Институт проблем машиностроения
им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков*

Поступило в редакцию 08.05.2008

Corresponding Member of the NAS of Ukraine **A. E. Bozhko**

On magnetization of a two-stroke electromagnetical vibroexciter

The applied theory for the determination of the tractive force of a two-stroke electromagnetic vibroexciter with magnetization is developed.