



УДК 621.318.3

© 2008

Член-корреспондент НАН Украины А. Е. Божко

## О коррективе в тяговом усилии электромагнитного вибровозбудителя

*A new formula for the tractive force of an electromagnetic exciter is given. This formula takes into account a change of the air clearance on oscillations of the anchor.*

Во многих работах об электромагнитных механизмах (ЭМ) (контакторах, реле, вибровозбудителях), например [1–4], тяговые усилия описываются выражениями

$$F_1 = \frac{\Phi_1^2}{2\mu_0 S}, \quad F_2 = \frac{\Phi_2^2}{\mu_0 S},$$

где  $\Phi_1, \Phi_2$  — магнитные потоки;  $\mu_0$  — магнитная проницаемость воздуха;  $S$  — площадь поперечного сечения полюса магнитопровода;  $F_1$  и  $F_2$  относятся к ЭМ с одним и двумя воздушными зазорами соответственно. На основании закона полного тока [5]  $\Phi_k = iwG_k$ ,  $k = 1, 2$ , где  $w$  — число витков электрической обмотки ЭМ;  $G_k$  — магнитная проводимость в ЭМ;  $i$  — электрический ток, идущий по обмотке ЭМ;  $G_1 = \mu_0 S/\delta$ ,  $G_2 = \mu_0 S/(2\delta)$  ( $\delta$  — воздушный зазор).

При одинаковых ампер-витках ( $iw$ )  $\Phi_1 = iw\mu_0 S/\delta$ ,  $\Phi_2 = iw\mu_0 S/(2\delta)$  и тогда

$$F_1 = \frac{\mu_0 S}{2} \left( \frac{iw}{\delta} \right)^2, \quad F_2 = \frac{\mu_0 S}{4} \left( \frac{iw}{\delta} \right)^2. \quad (1)$$

Из (1) видно, что  $F_1 = 2F_2$ , т.е. ЭМ с одним воздушным зазором обладает тяговым усилием в два раза большим, чем ЭМ с двумя зазорами. Обычно электромагнитные вибровозбудители (ЭМВ) имеют электромагнитомеханическую схему такую, как на рис. 1, где М — магнитопровод; Я — якорь;  $\delta$  — воздушный зазор; О — обмотка; ПЯ, ПР — пружины; РМ — реактивная масса; К — корпус;  $U$  — задающее переменное напряжение;  $i$  — ток в обмотке О.

Как видно из рис. 1, в ЭМВ есть два воздушных зазора  $\delta$ . А это значит, что тяговое усилие в нем будет  $F_2$ . Для увеличения тягового усилия ЭМВ в два раза необходимо его сконструировать с одним воздушным зазором и тогда оно будет  $F_1$ . Однако формулы (1)

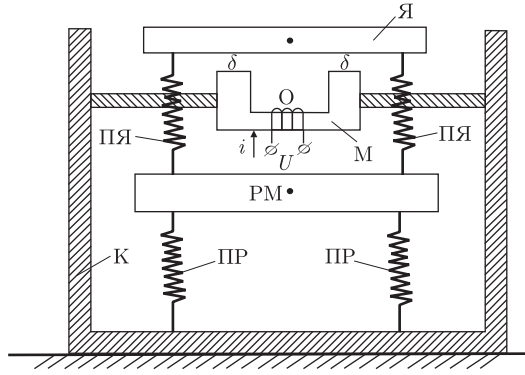


Рис. 1

являются приближенными. В них отсутствует влияние изменения воздушного зазора, связанное со смещением и колебаниями якоря Я, а также с явлением выпучивания магнитных силовых линий в воздушном зазоре при переходе магнитного потока  $\Phi$  из М в Я и наоборот (имеется в виду двухзазорный ЭМВ — рис. 1), обуславливающего изменение площади  $S$ . В связи с этим введем корректив как в определение тягового усилия ЭМВ, так и в конечный результат.

Электромагнитная энергия ЭМВ

$$W_\ell = \frac{1}{2}Li^2, \quad (2)$$

где  $L$  — индуктивность.

Тяговое усилие ЭМВ определяется выражением

$$F = \frac{dW_\ell}{d\varepsilon}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon = \delta - x_{\text{смя}} \pm x_{\text{ая}} \sin \omega t$ ;  $x_{\text{смя}}$  — смещение якоря Я под действием постоянной составляющей тягового усилия  $F$  (будет представлено ниже);  $x_{\text{ая}}$  — амплитуда колебаний якоря;  $\omega$  — круговая частота ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота, Гц);  $t$  — время.

Известно [1, 5], что  $L = w^2G$ , где в данном случае  $G = G_2 = \mu_0 S / (2\varepsilon)$ . Учет выпучивания магнитного потока  $\Phi$  в определении  $S$  осуществим следующим образом (см. рис. 2). На рис. 2, а изображен магнитный поток  $\Phi$  с учетом выпучивания в зазоре  $\delta$  (вид сбоку), а на рис. 2, б (вид сверху) — площадь  $S$  с учетом выпучивания  $\Phi$ . В данном случае площадь поперечного сечения М принимаем  $S_0 = a \times a$ . Исходя из рис. 2, б,

$$S = a^2 + 4a\varepsilon + \pi\varepsilon^2 = S_0 + 4a(\delta - x_{\text{смя}} \pm x_{\text{ая}} \sin \omega t) + \pi[S_0 + (\delta - x_{\text{смя}} \pm x_{\text{ая}} \sin \omega t)]^2.$$

Подставляя в (3) с учетом (2),  $\varepsilon$  и  $S$  с учетом выпучивания  $\Phi$ , получим

$$\begin{aligned} F &= \frac{dW_\ell}{\varepsilon} = \frac{1}{2} \frac{dLi^2}{d\varepsilon} = \frac{(iw)^2}{2} \frac{dG}{d\varepsilon} = \mu_0 \left( \frac{iw}{2} \right)^2 \frac{d}{d\varepsilon} \left( \frac{S}{\varepsilon} \right) = \\ &= \mu_0 \left( \frac{iw}{2} \right)^2 \frac{d}{d\varepsilon} \left[ \left( \frac{S_0}{\varepsilon} + 4a + \pi\varepsilon \right) \right] = \mu_0 \left( \frac{iw}{2} \right)^2 \left( -\frac{S_0}{\varepsilon^2} + \pi \right). \end{aligned} \quad (4)$$

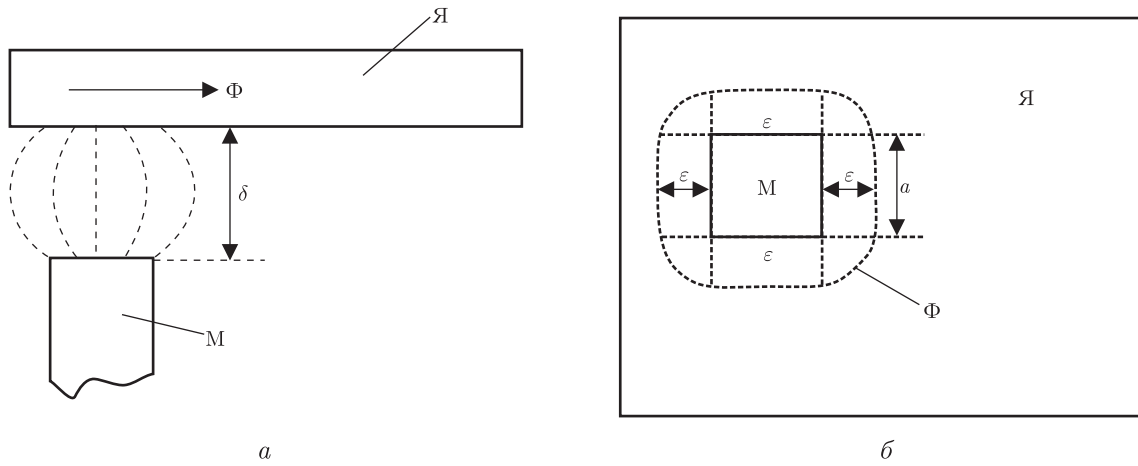


Рис. 2

Преобразуем (4) относительно магнитного потока  $\Phi$ , используя закон полного тока [5]. Для этого подставим

$$iw = \frac{\Phi}{G} = \frac{\Phi 2\varepsilon}{\mu_0(S_0 + 4a\varepsilon + \pi\varepsilon^2)}$$

в (4). Тогда имеем

$$F = \frac{1}{\mu_0} \left( \pi - \frac{S_0}{\varepsilon^2} \right) \left( \frac{\varepsilon\Phi}{S_0 + 4a\varepsilon + \pi\varepsilon^2} \right)^2$$

или

$$F = \frac{1}{\mu_0} (\pi\varepsilon - S_0) \left( \frac{\Phi}{S_0 + 4a\varepsilon + \pi\varepsilon^2} \right)^2. \quad (5)$$

Заметим, что если выпучиванием пренебречь ( $\pi\varepsilon^2 = 0$  и  $4a\varepsilon = 0$ ), то  $F = -\Phi^2/(\mu_0 S_0)$  приобретает вид  $F_2$ , что доказывает правильность выражения (5).

Таким образом, выражение (5) является скорректированной формулой тягового усилия ЭМВ, в которой учитывается изменение воздушного зазора при колебаниях якоря.

1. *Ступель Ф. А.* Электромеханические реле. – Харьков: Изд-во Харьков. гос. ун-та, 1956. – 355 с.
2. *Литвак В. И.* Автоматизация усталостных испытаний натуральных конструкций. – Москва: Машиностроение, 1972. – 384 с.
3. *Клименко Б. В.* Форсированные электромагнитные системы. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
4. *Испытательная техника.* Справочник. В 2-х кн. / Под ред. В. В. Клюева. – Москва: Машиностроение, 1982. – Кн. 1. – 528 с.
5. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. – Москва: Высш. шк., 1978. – 528 с.

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

Поступило в редакцию 29.03.2007