



УДК 621.318.001.2

© 2008

Член-корреспондент НАН України А. Е. Божко

Уточнение формулы тягового усилия электромагнитных контакторов и реле

A new formula for the tractive force of a contactor (relay) on the basis of a special expansion of jump-like input voltages is constructed.

В работах [1, 2] показано, что скачкообразные входные напряжения электроцепей можно представить в виде особого разложения

$$U \cdot 1(t) = U(1 - e^{-\alpha t}) + e^{-\alpha t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t, \quad (1)$$
$$\sum_{k=1}^n U_{ak} = U, \quad U_{a1} = \frac{U}{\pi \omega_1}, \quad U_{ak} = \frac{U_{a1}}{\omega_k},$$

где α — коэффициент затухания; t — время; ω_k — круговая частота ($\omega_k = 2\pi f_k$, f_k — частота, Гц); U_{ak} — амплитуда k -й гармоники; $1(t)$ — единичная скачкообразная функция $\left[1(t) = \begin{matrix} 1 & \text{при } > 0 \\ 0 & \text{при } \leq 0 \end{matrix} \right]$.

Известно, что включение контакторов, реле постоянного тока осуществляется путем подключения их обмоток на скачкообразное напряжение $U \cdot 1(t)$. И обычно в этом случае тяговые усилия F этих объектов определяются на основе определения тока I в их обмотках классическими методами [3, 4] в виде

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

где Φ_1, Φ_2 — магнитные потоки в магнитной системе контакторов; μ_0 — магнитная проницаемость воздуха; S — площадь поперечного сечения полюса магнитопровода.

Вид F по формуле (2) определен при условии, что входное напряжение обмотки контактора (реле) равно $U = \text{const}$. Однако в работах [1, 2] утверждается, что вид входного скачкообразного напряжения $U \cdot 1(t)$ электроцепи определяется выражением (1). Исходя

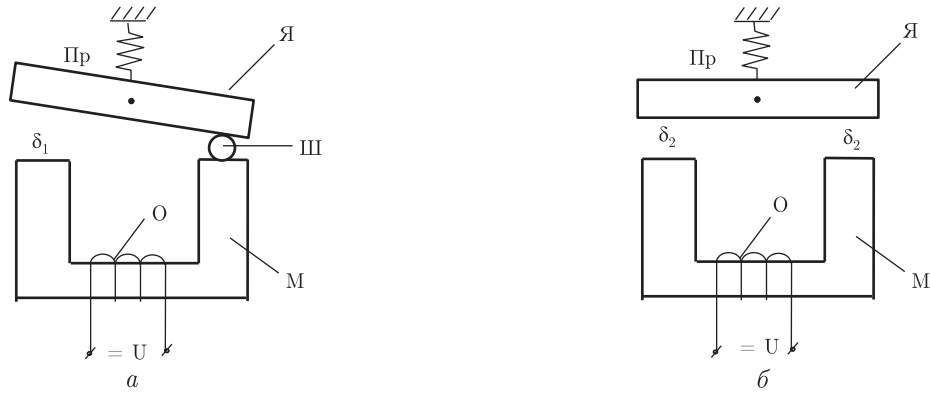


Рис. 1

из такого утверждения, уточним формулу тягового усилия контактора. Принципы работы контактора и реле похожи. Поэтому в дальнейшем опустим реле как объект исследования.

Вывод уточненной формулы F будем вначале осуществлять относительно тока I в обмотке контактора, а затем можем перейти к зависимости F от Φ . Для этого воспользуемся законом полного тока [5]

$$IwG = \Phi, \quad (3)$$

где w — число витков обмотки; G — магнитная проводимость контактора.

G определяется в зависимости от конструктивной схемы контактора. Обычно эти схемы такие, как изображены на рис. 1, а, б, где М — магнитопровод; Я — якорь; Пр — пружина; О — обмотка; δ_1 , δ_2 — воздушный зазор; Ш — шарнир; U — напряжение.

Тяговое усилие F_1 соответствует контактору, изображенному на рис. 1, а, а F_2 — на рис. 1, б. Для рис. 1, а — $G_1 = \mu_0 S / \delta_1$, а для рис. 1, б — $G_2 = \mu_0 S / (2\delta_2)$. Поэтому формула (3) для этих конструкций контакторов будет следующая:

$$I_1 w_1 G_1 = \Phi_1, \quad I_2 w_2 G_2 = \Phi_2. \quad (4)$$

Подставляя (4) в (2), получим

$$F_1 = \frac{\mu_0 S}{2} \left(\frac{I_1 w_1}{\delta_1} \right)^2, \quad F_2 = \mu_0 S \left(\frac{I_2 w_2}{2\delta_2} \right)^2. \quad (5)$$

В (5) фигурируют токи I_1 и I_2 , которые зависят от входного напряжения U контактора и параметров электрической цепи обмотки. Определение I_1 и I_2 будем осуществлять путем решения уравнения (считаем, что $w_1 = w_2$ и $I_1 = I_2$)

$$U \cdot 1(t) = rI + L \frac{dI}{dt},$$

или, с учетом (1),

$$U(1 - e^{-\alpha t}) + e^{-\alpha t} \sum_{k=1}^n U_{ak} \cos \omega_k t = rI + L \frac{dI}{dt}, \quad (6)$$

где r — активное сопротивление обмотки; L — индуктивность обмотки.

Для нахождения тока I воспользуемся операционным методом Карсона [6]. В изображениях Карсона уравнение (6) примет вид

$$\frac{U\alpha}{p+\alpha} + \sum_{k=1}^n \frac{U_{ak}p(p+\alpha)}{(p+\alpha)^2 + \omega_k^2} = (r+pL)I(p),$$

откуда

$$I(p) = \frac{U\alpha}{(p+\alpha)(pL+r)} + \frac{1}{(pL+r)} \sum_{k=1}^n \frac{U_{ak}p(p+\alpha)}{(p+\alpha)^2 + \omega_k^2}. \quad (7)$$

Оригинал тока $I(t)$, соответствующий изображению (7), находим по таблицам [6]. При этом обозначим $r/L = \beta$

$$\begin{aligned} I(t) = & \frac{U\alpha}{L} \left[\frac{1}{\alpha\beta} + \frac{1}{\alpha-\beta} \left(\frac{1}{\alpha} \ell^{-\alpha t} - \frac{1}{\beta} \ell^{-\beta t} \right) \right] + \\ & + \frac{1}{L} \sum_{k=1}^n \left\langle \frac{U_{ak}\alpha}{(\alpha-\beta)^2 + \omega_k^2} \left\{ \ell^{-\beta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega_k} [-\omega_k \cos \omega_k t + (\beta-\alpha) \sin \omega_k t] \right\} + \right. \\ & \left. + \frac{U_{ak}}{(\alpha-\beta)^2 + \omega_k^2} \left\{ -\beta \ell^{-\beta t} + \frac{\ell^{-\alpha t}}{\omega_k} [\omega_k \beta \cos \omega_k t + (\omega_k^2 + \alpha^2 - \alpha\beta) \sin \omega_k t] \right\} \right\rangle. \quad (8) \end{aligned}$$

Теперь для определения уточненных формул тяговых усилий F_1 и F_2 подставим (8) в (5), считая, что $I_1 = I_2 = I$. В результате имеем

$$\begin{aligned} F_1 = \frac{\mu_0 S}{2} \left(\frac{w_1}{\delta_1} \right)^2 I^2 = \gamma_1 I^2; \quad F_2 = \frac{\mu_0 S}{4} \left(\frac{w_2}{\delta_2} \right)^2 I^2 = \gamma_2 I^2; \\ \gamma_1 = \frac{\mu_0 S}{2} \left(\frac{w_1}{\delta_1} \right)^2; \quad \gamma_2 = \frac{\mu_0 S}{4} \left(\frac{w_2}{\delta_2} \right)^2 \end{aligned}$$

и

$$F_l = \gamma_l [(8)]^2, \quad l = 1, 2. \quad (9)$$

В (9) в квадратных скобках включено выражение (8). Формула (9) с учетом (8) является новым видом тягового усилия F контактора или реле при учете особого разложения (1) скачкообразного входного напряжения обмотки контактора. Заметим, что коэффициент затухания α значительно больше коэффициента затухания $\beta = r/L$. Проверим правильность (9) с учетом (8).

При $t = 0$ $F_1 = 0$, $F_2 = 0$, при $t = \infty$

$$F_1 = \gamma_1 \left(\frac{U}{r} \right)^2 = \gamma_1 I^2; \quad F_2 = \gamma_2 \left(\frac{U}{r} \right)^2 = \gamma_2 I^2. \quad (10)$$

Эта проверка показала правильность вывода формулы (9).

Далее рассмотрим (9) при $\alpha = \infty$, т. е., если скачкообразное входное напряжение $U \cdot 1(t) = U$ и не описывается особым разложением (1). В этом случае F_1 и F_2 выражаются соотношениями (10), т. е. их математическая запись соответствует известным формулам [3, 4].

1. *Божко А. Е.* Новая интерпретация переходных процессов в электроцепях // Доп. НАН України. – 2004. – № 9. – С. 83–87.
2. *Божко А. Е.* Аргументация новой концепции о переходных процессах в электроцепях с позиций волновой механики // Там само. – 2006. – № 3. – С. 83–89.
3. *Клименко Б. В.* Форсированные электромагнитные системы. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 160 с.
4. *Ступель Ф. А.* Электромеханические реле. – Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1956. – 355 с.
5. *Бессонов Л. А.* Теоретические основы электротехники. – Москва: Высш. шк., 1978. – 528 с.
6. *Гинзбург С. Г.* Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – Москва: Сов. радио, 1959. – 404 с.

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

Поступило в редакцию 23.01.2007