

ЗАВИСИМОСТЬ ТОКА ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ КЗ ДВИГАТЕЛЕЙ НОРМАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ

КУЛЕЕВ И. Г.

Доцент, кандидат технических наук

Зависимость тока от времени при торможении по методу противовключения ненагруженного двигателя

Уравнение движения для процесса выбега ненагруженного двигателя при торможении по методу противовключения может быть написано в следующем виде:

$$-\frac{m_2 r_2 I_2^2}{9,81 \omega_1 S} = J \omega_1 \frac{dS}{dt} \quad (1)$$

В уравнение (1) входят две переменные: S и I_2 . Зависимость S от I_2 может быть найдена следующим образом.

В начальный момент торможения $S=2$. Следовательно, момент торможения, соответствующий этому скольжению,

$$M_{m2} = \frac{m_2 r_2 I_{2n}^2}{9,81 \omega_1 2} \quad (2)$$

Здесь I_{2n} — ток ротора в начальный момент торможения.

Поделив равенство (2) на выражение момента торможения, получим

$$\frac{M_{m2}}{M_m} = \frac{I_{2n}^2 S}{I_2^2 2} \quad (3)$$

Деление числителя и знаменателя уравнения (3) на M_{max} дает

$$\frac{M_{m2}}{M_m} = \frac{\frac{M_{m2}}{M_{max}}}{\frac{M_m}{M_{max}}} \quad (3)$$

Подставляя значение $\frac{M_{m2}}{M_{max}}$ и $\frac{M_m}{M_{max}}$ из уравнения Клосса, получим

$$\frac{M_{m2}}{M_m} = \frac{2(S_m^2 + S^2)}{(S_m^2 + 4)S} \quad (4)$$

Подставляя значение $\frac{M_{m2}}{M_m}$ в уравнение (4), будем иметь

$$\frac{I_{2n}^2 S}{I_2^2 2} = \frac{2(S_m^2 + S^2)}{(S_m^2 + 4)S} \quad (5)$$

Уравнение (5) является квадратным уравнением вида

$$S^2[(4 + S_m^2)I_{2n}^2 - 4I_2^2] - 4I_2^2 S_m^2 = 0,$$

откуда

$$S = \pm \frac{2I_2 S_m}{\sqrt{I_{2n}^2(4 + S_m^2) - 4I_2^2}} \quad (6)$$

и

$$dS = \pm \frac{2I_2^2 S_m dI_2}{[I_{2n}^2(4 + S_m^2) - 4I_2^2]^{3/2}}. \quad (7)$$

Заменяя s и ds в уравнении (1) их значениями из уравнений (6, 7), найдем выражение зависимости тока от времени в виде

$$t = \frac{39,24 J \omega_1^2 S_m^2}{m_2 r_2} \int_{I_{2n}}^I \frac{I_{2n}^2 (4 + S_m^2) dI_2}{I_2 [I_{2n}^2 (4 + S_m^2) - 4I_2^2]}. \quad (8)$$

Интегрирование дает

$$t = - \frac{19,62 \cdot J \omega_1^2 S_m^2}{m_2 r_2} \left[\frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{I_{2n}^2 S_m^2}{\varepsilon - 4I_2^2} + \frac{4(I_2^2 - I_{2n}^2)}{I_{2n}^2 S_m^2 (\varepsilon - 4I_2^2)} \right] \quad (9)$$

где

$$\varepsilon = I_{2n}^2 (4 + S_m^2).$$

Зависимость тока от времени при торможении по методу противоключения нагруженного двигателя $M_c = \text{Const}$.

Уравнение движения для процесса выбега в этом случае может быть написано в виде

$$- \frac{m_2 r_2 I_2^2}{\omega_1 S \cdot 9,81} - M_c = J \omega_1 \frac{dS}{dt}.$$

Заменяя S и dS их значениями из уравнений (6, 7), получим

$$\frac{J \omega_1 S_m^2 dI_2}{dt(\varepsilon - 4I_2^2)^{3/2}} = - \frac{m_2 r_2 I_2}{39,24 \cdot \omega_1 S_m} - M_c,$$

откуда зависимость тока от времени

$$t = - J \omega_1^2 S_m^2 \varepsilon \int_{I_{2n}}^{I_2'} \frac{dI_2}{\left(\varepsilon - 4I_{2n}^2 \right)^{3/2} \left(\frac{I_2 m_2 r_2 \sqrt{\varepsilon - 4I_2^2}}{39,24} \right)}. \quad (10)$$

Интегрирование дает

$$t = \frac{J \omega_1 S_m}{M_c} \left[\frac{4}{a_1 a_2} \left(- \frac{I_2}{\sqrt{\varepsilon - 4I_2^2}} + \frac{I_{2n}}{\sqrt{\varepsilon - 4I_{2n}^2}} + \frac{4(a_1 + a_2)}{a_1^2 - a_2^2} \ln \frac{2\sqrt{\varepsilon - 4I_2^2}}{\sqrt{\varepsilon - 4I_{2n}^2}} - \frac{a_1^2 + 4}{a_1(a_2 - a_1)} \ln \frac{2(\sqrt{\varepsilon - 4I_2^2} - a_1 I_2)}{\sqrt{\varepsilon - 4I_{2n}^2} - 2a_1 I_{2n}} + \frac{a_2^2 + 4}{a_2^2(a_2 - a_1)} \ln \frac{2(\sqrt{\varepsilon - 4I_2^2} - a_2 I_2)}{\sqrt{\varepsilon - 4I_{2n}^2} - 2a_2 I_{2n}} \right] \right], \quad (11)$$

где

$$a_{12} = - \frac{H\varepsilon}{2M_c} \pm \sqrt{\left(\frac{H\varepsilon}{2M_c} \right)^2 - 4}.$$

Зависимость тока от времени при торможении по методу противоключения нагруженного двигателя $M_c = k'\omega_2^2$.

В этом случае уравнение движения для процесса выбега может быть написано в виде

$$-\frac{m_2 r_2 I_2^2}{\omega_1 S_{9,81}} - k(S-1)^2 = J\omega_1 \frac{dS}{dt}.$$

Здесь $k(S-1)^2 = M_c = k'\omega_1^2(S-1)^2$.

Заменяя S и dS их значениями из уравнений (6, 7), получим

$$-\frac{m_2 r_2 I_2 \sqrt{\varepsilon - 4I_2^2}}{9,81 \cdot \omega_1 S_m \cdot 2} - k \left(-1 + \frac{2S_m I_2}{\sqrt{\varepsilon - 4I_2^2}} \right)^2 = J\omega_1 \frac{2S_m dI_2}{dt(\varepsilon - 4I_2^2)^{3/2}},$$

откуда зависимость тока от времени

$$t = -4J\omega_1 S_m \varepsilon \int_{I_{2n}}^{I_2} \frac{dI_2}{(\varepsilon - 4I_2^2)^{3/2} \left\{ I_2 H(\varepsilon - 4I_2^2)^{3/2} + k \left[\frac{\varepsilon - 4I_2^2}{2} - S_m I_2 \sqrt{\varepsilon - 4I_2^2 + 2S_m^2 I_2^2} \right] \right\}}, \quad (12)$$

где

$$H = \frac{m_2 r_2}{9,81 \cdot \omega_1 S_m}.$$

Интеграл, входящий в правую часть уравнений (12), решается посредством подстановки нового переменного.

Пусть

$$\varepsilon - 4I_2^2 = Z^2 I_2^2, \quad (13)$$

тогда

$$-dI_2 = \frac{I_2 Z dZ}{4 + Z^2}; \quad I_2 = \frac{\varepsilon}{4 + Z^2}.$$

Подставляя значения I_2 и dI_2 в уравнение (13), получим

$$t = \frac{4J\omega_1 S_m}{k} \int_{I_{2n}}^{I_2} \frac{(4 + Z^2) dZ}{Z^4 + Z^3 \left(\frac{H\varepsilon}{k} - 2S_m \right) + Z^2(1 + S_m^2)2 - Z8S_m + 8S_m^2}.$$

Обозначив $\frac{H\varepsilon}{k} - 2S_m$ через h , $2(1 + S_m^2)$ через g , будем иметь

$$t = \frac{4J\omega_1 S_m}{k} \int_{I_{2n}}^{I_2} \frac{(4 + Z^2) dZ}{Z^4 + Z^3 h + Z^2 g - Z8S_m + 8S_m^2}. \quad (14)$$

Интегрирование дает:

(См. работу автора—„Разбег КЗ двигателей нормального исполнения“, Известия ТПИ, т. 63, 1944 г.).

$$t = \frac{4J\omega_1 S_m}{k} \left[\operatorname{Aln} \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{I_{2n}^2} - 1} - \frac{f}{2} + d}{\sqrt{\frac{\varepsilon}{I_2^2} - 1} - \frac{f}{2} + d} + \right]$$

$$\begin{aligned}
& + B \ln \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{I_2^2} - 1} - \frac{f}{2} - d}{\sqrt{\frac{\varepsilon}{I_3^2} - 1} - \frac{f}{2} - d} + \\
& + \frac{c}{2} \ln \frac{\frac{\varepsilon}{I_{2n}^2} - 1 + f \sqrt{\frac{\varepsilon}{I_2^2} - 1} + \frac{f^2}{4} + e^2}{\frac{\varepsilon}{4I_{2n}^2} - 1 + f \sqrt{\frac{\varepsilon}{4I_{2n}^2} - 1} + \frac{f^2}{4} + e^2} + \\
& + \frac{2D - cf}{2e} \left(\operatorname{arctg} 2 \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{I_2^2} - 1} + f}{2e} - \operatorname{arctg} 2 \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{4I_{2n}^2} - 1} + f}{2e} \right) \Bigg], \quad (15)
\end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
A &= \frac{4 + \frac{f^2}{4} + fd + d^2}{2d(f^2 + 2fd + d^2 + e^2)}, \quad B = \frac{4 + \frac{f^2}{4} - fd + d^2}{2d(f^2 - 2fd + d^2 + e^2)}; \\
C &= -A - B; \quad D = 1 - A \left(d + \frac{f}{2} \right) + B \left(d - \frac{f}{2} \right) + cf.
\end{aligned}$$

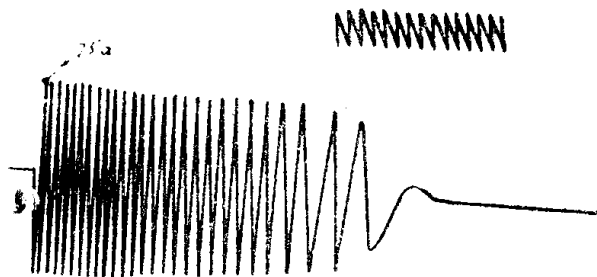


Рис. 1

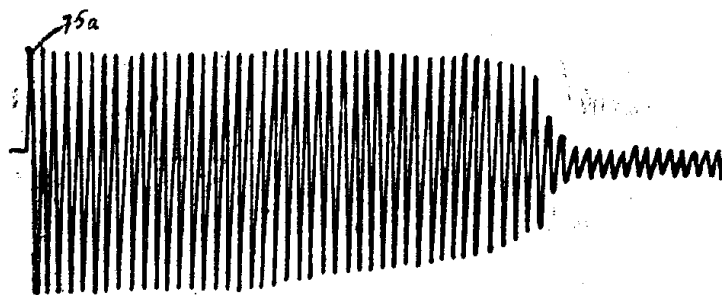


Рис. 2



Рис. 3

Значения I при торможении по методу противовключения, полученные по формулам и взятые из осциллограмм (1, 2) для одних и тех же моментов времени приводятся в нижеследующей таблице 1.

Таблица 1

$M_c = 0$		t	$M_c = \text{Const}$		t
По формуле	Из осцил.		По формуле	Из осцил.	
75	75	0,01	75	75	0,01
75	75	0,05	75	75	0,05
75	75	0,1	75	75	0,1
19,5	19,5	0,65	21,0	21,0	0,81

Подсчеты и осциллографические записи произведены для двигателя, имеющего следующие данные: тип Т-750, $U_1 = 220$ в, $E_2 = 145$ в, $I_1 = 38$ а, $I_2 = 45,5$ а, $n = 715$ об/мин, $\cos \varphi = 0,8$, $r_1 = 0,4$ ома, $r_2 = 0,08$ ома, $r_k = 1,1$ ома, $X_1 = 1,35$ ома, $X_2 = X_1$, $Z_k = 2,92$ ома, $S_m = 0,213$, $J = 0,05$ кгм сек², $M_n = 11$ кгм, $M_{\max} = 30$ кгм.

Зависимость тока от времени при динамическом торможении ненагруженного двигателя.

Уравнение движения при динамическом торможении ненагруженного двигателя может быть написано в следующем виде:

$$-\frac{m_2 r_2 I_2^2}{\omega_1 s \cdot 9,81} = J \omega_1 \frac{ds}{dt}.$$

Заменяя s и ds их значениями (см. работу автора „Зависимость тока от времени при пуске короткозамкнутых двигателей нормального исполнения“, Известия ТПИ, т. 63, 1944 г.), получим

$$t = \frac{9,81 J \omega_1^2 S_{m1}^{0,051} I_{2n}^{2n}}{m_2 r_2} \int_{I_{2n}}^{I_2} \frac{I_{2n}^2 (1 + S_{m1}^2) dI_2}{I_2 [I_{2n}^2 (1 + S_{m1}^2) - I_2^2]^2}, \quad (16)$$

где I_{2n} — ток ротора в первый момент после подключения обмотки статора к сети постоянного тока. Так как ток ротора мало отличается от пускового тока, то с достаточной для практики точностью его можно принять равным последнему.

Интегрирование дает

$$t = -\frac{9,81 J \omega_1^2 S_{m1}^2}{m_2 r_2} \left\{ \frac{1}{2\varepsilon} \ln \frac{I_2^2 S_{m1}^2}{I_{2n}^2 (1 + S_{m1}^2) - I_2^2} + \frac{1}{2[I_{2n}^2 (1 + S_{m1}^2) - I_2^2]} - \frac{1}{2S_{m1}^2 I_{2n}^2} \right\} \quad (17)$$

Зависимость тока от времени при торможении нагруженного двигателя $M_c = \text{Const}$.

Уравнение движения в этом случае может быть написано в виде

$$-\frac{m_2 r_2 I_2^2}{9,81 \omega_1 S} - M_c = J \omega_1 \frac{dS}{dt}.$$

Заменяя S и dS их значениями (см. предыдущий раздел), получим

$$\frac{f\omega_1 S_{m1} \varepsilon dI_2}{(\varepsilon - I_2^2)^{3/2} dt} = - \frac{m_2 r_2 I_2 \sqrt{\varepsilon - I_2^2}}{9,81 \omega_1 S_{m1}} - M_c,$$

откуда зависимость тока от времени

$$t = - J \omega_1^2 S_{m1}^2 \varepsilon \int_{I_{2n}}^{0,05 I_{2n}} \frac{dI_2}{(\varepsilon - I_2^2)^{3/2} \left(- \frac{I_2 m_2 r_2 \sqrt{\varepsilon - I_2^2}}{9,81} + M_c \omega_1 S_{m1} \right)}$$

где I_{2n} — пусковой ток ротора. Здесь, как и раньше, верхний предел интегрирования принят равным $0,05 I_{2n}$, чтобы получить для t конечное значение.

Интегрирование дает

$$t = - \frac{J \omega_1 S_{m1}}{M_c} \left[\frac{1}{a_1 a_2} \left(- \frac{I_2}{\sqrt{\varepsilon - I_2^2}} + \frac{I_{2n}}{\sqrt{\varepsilon - I_{2n}^2}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{a_1 + a_2}{a_1^2 a_2^2} \ln \frac{I_2 \sqrt{\varepsilon - I_2^2}}{I_{2n} \sqrt{\varepsilon - I_{2n}^2}} - \right. \\ \left. - \frac{a_1^2 + 1}{a_1^2 (a_2 - a_1)} \ln \left(\frac{I_{2n} \sqrt{\varepsilon - I_{2n}^2}}{I_2 \sqrt{\varepsilon - I_{2n}^2}} - a_1 \right) + \frac{a_2 + 1}{a_2^2 (a_2 - a_1)} \ln \left(\frac{I_{2n} \sqrt{\varepsilon - I_{2n}^2}}{\sqrt{\varepsilon - I_{2n}^2}} - a_2 \right) \right].$$

Значения I , полученные по формулам (17) и взятые из осциллограммы (крив. 4) для одних и тех же моментов времени для ранее упомянутого

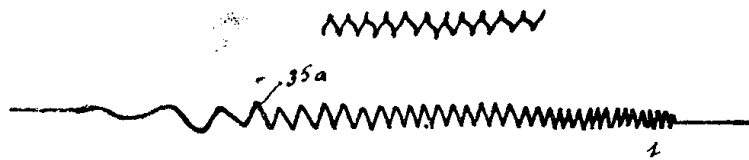


Рис. 4

двигателя проводится в нижеследующей таблице 2.

Таблица 2

По форм.	По осциллогр.	t
44	35	0,01
44	40	0,05
42	41	0,01

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
89	Рис. 3	(Рисунок перевернут)	
92	7 снизу	i_{02}	$-i_{02}$
95	19 снизу	Z	Z_T
97			В уравнении (27) α является показателем степени
98	19 снизу	$Z_m \Delta$	$Z_m V$
101	15 снизу	окружающей	окружностей
178	17 снизу	$s = \frac{n}{n}$	$s = \frac{n}{n_0}$
193	4 сверху	$I_2^2 = \frac{E}{1 + Z^2}$	$I_2^2 = \frac{\varepsilon}{1 + Z^2}$
203	12 сверху	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$	$I = I_m \left(1 - e^{-\frac{\Gamma_m}{L_m} t} \right) = \dots$
203	17 снизу	закрывающихся	закрывающийся
214	8 снизу	(28)	(26)
221	4 сверху	$\dots \frac{i_0^2 - i''_a}{i_{01} - i''_a}$	$\dots \frac{i_{02} - i''_a}{i_{01} - i''_a}$
318	Подпись к рис. 5	Потери тепла неполноты горения.	Потери тепла от неполноты горения.
318	14 снизу	(рис. 3)	(рис. 4)
323	1 сверху	аттуру	пературу
323	1 сверху	$r = 58$	$r = 587$
325	На рис. 6	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$	$q'_{\text{вод}}$ и $q''_{\text{вод}}$
326	33 сверху	$/2 \cdot 3 + 25 = 293 \text{ K},$	$/273 + 25 = 293 \text{ K},$