

*ЭЛЕКТРОПРИВОД ПОСТОЯННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМ МОМЕНТОМ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ, ПОТРЕБЛЯЮЩИЙ МИНИМАЛЬНО ВОЗМОЖНОЕ  
ЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПРИ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА*

**Ю.П. ДОБРОБАБА, Г.А. КОШКИН, А.А. ИВАНЮК**

*Кубанский государственный технологический университет  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2  
электронная почта: solist\_4321@mail.ru*

Оптимальную по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмму перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением по скорости электропривода целесообразно использовать для достижения минимально возможного потребления электроэнергии при управлении большими перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, если момент сопротивления ЭП не превышает половину максимально допустимого момента. Оптимальную по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмму перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода целесообразно использовать для достижения минимально возможного потребления электроэнергии при управлении большими перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, если момент сопротивления ЭП превышает половину максимально допустимого момента. Разработано математическое обеспечение для определения параметров для обеих диаграмм при больших перемещениях исполнительного органа электропривода, при которых потребляется минимально возможное значение электроэнергии.

**Ключевые слова:** электропривод, перемещение исполнительного органа, минимально возможное потребление электроэнергии.

В работе [1] представлена оптимальная по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением скорости электропривода. Данная диаграмма используется при больших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления. При этом за время цикла  $T_{ц}$  угол поворота исполнительного органа электропривода изменяется от начального значения  $\varphi_{нач}$  до конечного значения  $\varphi_{кон}$ . Оптимальная по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом

сопротивления с ограничением скорости электропривода состоит из трех этапов. Длительность первого и третьего этапов равна  $t_1$ ; длительность второго этапа равна  $t_2$ .

На первом этапе ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  линейно уменьшается от максимального значения  $I_{max}$  до значения  $\frac{M_{со}}{C_M}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega$  параболически увеличивается от нулевого значения до максимально допустимого значения  $\omega_{доп}$ ; угол поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi$  увеличивается от начального значения  $\varphi_{нач}$  до значения  $\varphi_1$  [1]. На втором этапе ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  равен значению  $\frac{M_{со}}{C_M}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega$  равна максимально допустимому значению  $\omega_{доп}$ ; угол поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi$  увеличивается от значения  $\varphi_1$  до значения  $\varphi_2$  [1]. На третьем этапе ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  линейно уменьшается от значения  $\frac{M_{со}}{C_M}$  до минимального значения  $I_{min}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega$  параболически уменьшается от максимально допустимого значения  $\omega_{доп}$  до нулевого значения; угол поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi$  увеличивается от значения  $\varphi_2$  до конечного значения  $\varphi_{кон}$ . [1].

При описании оптимальной по минимуму потребляемой электроэнергии диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением скорости электропривода приняты следующие обозначения:

$M_{со}$  – момент сопротивления электропривода, Н·м;

$C_M$  – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, В·с.

Для оптимальной по минимуму потребляемой электроэнергии диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с

постоянным моментом сопротивления с ограничением скорости электропривода справедливы следующие соотношения [1]:

$$\omega_{max}^{(1)} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{доп}^2}{\omega_{доп} T_{ц} - (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})}; \quad (1)$$

$$I_{max} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[ M_{со} + \frac{4}{3} \cdot \frac{J \omega_{доп}^2}{\omega_{доп} T_{ц} - (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})} \right]; \quad (2)$$

$$I_{min} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[ M_{со} - \frac{4}{3} \cdot \frac{J \omega_{доп}^2}{\omega_{доп} T_{ц} - (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})} \right]; \quad (3)$$

$$t_1 = \frac{3}{2} \cdot \left( T_{ц} - \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} \right); \quad (4)$$

$$t_2 = 3 \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} - 2T_{ц}, \quad (5)$$

где  $\omega_{max}^{(1)}$  – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ ;

$J$  – момент инерции электропривода,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна [1]

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{со} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{со}^2 \cdot (2t_1 + t_2) + \frac{2}{3} J^2 \cdot \left[ \omega_{max}^{(1)} \right]^2 \cdot t_1 \right\}, \quad (6)$$

где  $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью исполнительного органа электропривода и ЭДС электродвигателя,  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;

$R_{я}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом.

Если в зависимость (6) подставить максимальное значение первой производной угловой скорости в соответствии с выражением (1), длительностей первого (третьего) и второго этапов в соответствии с выражениями (4) и (5), то зависимость для электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл, принимает вид

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 \cdot T_{ц} + \frac{16}{9} \cdot \frac{J^2 \omega_{доп}^3}{\omega_{доп} \cdot T_{ц} - (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})} \right\}. \quad (7)$$

Определим частную производную зависимости электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от длительности цикла и приравняем её к нулю

$$\frac{\partial W}{\partial T_{ц}} = \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 - \frac{16}{9} \cdot \frac{J^2 \omega_{доп}^4}{[\omega_{доп} \cdot T_{ц} - (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})]^2} \right\} = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что при

$$T_{ц \text{ экстр}} = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} + \frac{4}{3} \cdot \frac{J \omega_{доп}}{M_{co}} \quad (9)$$

якорная цепь электропривода потребляет минимально возможное значение электроэнергии за цикл

$$W_{min} = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left[ M_{co}^2 \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} + \frac{8}{3} M_{co} J \omega_{доп} \right]. \quad (10)$$

Для параметров диаграммы для больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением скорости электропривода, обеспечивающей минимально возможное потребление электроэнергии за цикл, справедливы соотношения:

$$\omega_{max.экстр}^{(1)} = \frac{M_{co}}{J}; \quad (11)$$

$$I_{max.экстр} = 2 \cdot \frac{M_{co}}{C_M}; \quad (12)$$

$$I_{min.экстр} = 0; \quad (13)$$

$$t_{1экстр} = 2 \cdot \frac{J \omega_{доп}}{M_{co}}; \quad (14)$$

$$t_{2\text{экстр}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{8}{3} \cdot \frac{J\omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}. \quad (15)$$

При  $t_{2\text{экстр}} = 0$  угол поворота исполнительного органа электропривода достигает экстремального граничного значения, которое равно

$$\varphi_{\text{экстр. гр}} = \frac{8}{3} \cdot \frac{J\omega_{\text{доп}}^2}{M_{\text{со}}}. \quad (16)$$

При этом экстремальное граничное значение длительности цикла равно

$$T_{\text{ц. экстр. гр}} = 4 \cdot \frac{J\omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}. \quad (17)$$

В данной работе рассматривается электропривод постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, имеющий следующие параметры:

$C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;  $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$ ;  $R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}$ ;  $J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . На контролируемые

координаты электропривода наложены ограничения: максимально допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя,  $U_{\text{доп}} = 250 \text{ В}$ ; максимально допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя  $I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}$ ; максимально допустимое значение угловой скорости электропривода  $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода с моментом сопротивления  $M_{\text{со}} = 1,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Таблица 1

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$T_{\text{ц экстр}},$ с	$t_{2 \text{ экстр}},$ с	$W_{\text{min}},$ Дж
$2730 \frac{2}{3}$	25,6	0	3584
3200	$28 \frac{8}{15}$	$2 \frac{4}{15}$	$4185 \frac{1}{3}$

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:  $\omega_{\text{max. экстр}}^{(1)} = 25 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ ;

$I_{\text{max. экстр}} = 2 \text{ А}$ ;  $I_{\text{min. экстр}} = 0 \text{ А}$ ;  $t_{1\text{экстр}} = 12,8 \text{ с}$ .

В таблице 2 предоставлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода с моментом сопротивления  $M_{co} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Таблица 2

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$T_{\text{ц экстр}},$ с	$t_2 \text{ экстр},$ с	$W_{\text{min}},$ Дж
$1365\frac{1}{3}$	12,8	0	$3754\frac{2}{3}$
3200	$24\frac{4}{15}$	$11\frac{7}{15}$	$8570\frac{2}{3}$

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:  $\omega_{\text{max. экстр}}^{(1)} = 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$

$$I_{\text{max. экстр}} = 4 \text{ А}; I_{\text{min. экстр}} = 0 \text{ А}; t_{1\text{экстр}} = 6,4 \text{ с}.$$

В таблице 3 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода с моментом сопротивления  $M_{co} = 3,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Таблица 3

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$T_{\text{ц экстр}},$ с	$t_2 \text{ экстр},$ с	$W_{\text{min}},$ Дж
$910\frac{2}{9}$	$8\frac{8}{15}$	0	$3925\frac{1}{3}$
3200	$22\frac{38}{45}$	$14\frac{14}{45}$	13156

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:  $\omega_{\text{max. экстр}}^{(1)} = 75 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$

$$I_{\text{max. экстр}} = 6 \text{ А}; I_{\text{min. экстр}} = 0 \text{ А}; t_{1\text{экстр}} = 4\frac{4}{15} \text{ с}.$$

В таблице 4 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода с моментом сопротивления  $M_{co} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Таблица 4

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$T_{\text{ц экстр}},$ с	$t_2 \text{ экстр},$ с	$W_{\text{min}},$ Дж
$682\frac{2}{3}$	6,4	0	4096

3200	$22\frac{2}{15}$	$15\frac{11}{15}$	$17941\frac{1}{3}$
------	------------------	-------------------	--------------------

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:  $\omega_{max. экстр}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2}$ ;  
 $I_{max. экстр} = 8 \text{ A}$ ;  $I_{min. экстр} = 0 \text{ A}$ ;  $t_{1экстр} = 3,2 \text{ с}$ .

Дальнейшее увеличение момента сопротивления электропривода при использовании рассматриваемой диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода не возможно, так как при этом максимальное значение тока якорной цепи электродвигателя  $I_{max}$  превысит значение максимально допустимого значения тока  $I_{доп}$ .

Таким образом, оптимальная по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением скорости электропривода применима для достижения минимально возможного потребления электроэнергии за цикл при выполнении условия

$$M_{со} \leq \frac{1}{2} C_M I_{доп}. \tag{18}$$

Если выполняется условие

$$\frac{1}{2} C_M I_{доп} \leq M_{со}, \tag{19}$$

то необходимо использовать оптимальную по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода. Данная диаграмма используется при больших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления. При этом диаграмма состоит из четырех этапов. На первом этапе ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  имеет максимально допустимое значение  $I_{доп}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega$  линейно увеличивается от нулевого значения до значения  $\omega_1$ ; угол поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi$  увеличивается от начального значения  $\varphi_{нач}$  до значения  $\varphi_1$  [1]. Длительность первого этапа равна  $t_1$ .

На втором этапе ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  линейно уменьшается от максимально допустимого значения  $I_{доп}$  до значения  $\frac{M_{со}}{C_{м}}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega$  параболически увеличивается от значения  $\omega_1$  до максимально допустимого значения  $\omega_{доп}$ ; угол поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi$  увеличивается от значения  $\varphi_1$  до значения  $\varphi_2$  [1]. Длительность второго этапа равна  $t_2$ . На третьем этапе ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  равен значению  $\frac{M_{со}}{C_{м}}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega$  равна максимально допустимому значению  $\omega_{доп}$ ; угол поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi$  увеличивается от значения  $\varphi_2$  до значения  $\varphi_3$  [1]. Длительность третьего этапа равна  $t_3$ . На четвертом этапе ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  линейно уменьшается от значения  $\frac{M_{со}}{C_{м}}$  до минимального значения  $I_{min}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода  $\omega$  параболически уменьшается от максимально допустимого  $\omega_{доп}$  до нулевого значения; угол поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi$  увеличивается от значения  $\varphi_3$  до конечного значения  $\varphi_{кон}$  [1]. Длительность четвертого этапа равна  $t_4$ .

Для оптимальной по минимуму потребляемой электроэнергии диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода справедливы следующие соотношения [1]:

$$I_{max} = I_{доп}; \quad (20)$$

$$I_{min} = \frac{1}{C_{м}} \cdot \left[ M_{со} - (C_{м}I_{доп} - M_{со}) \cdot \frac{t_4}{t_2} \right]; \quad (21)$$

$$\omega_{max}^{(1)} = \frac{C_{м}I_{доп} - M_{со}}{J}; \quad (22)$$

$$\omega_{min}^{(1)} = -\frac{C_{м}I_{доп} - M_{со}}{J} \cdot \frac{t_4}{t_2}; \quad (23)$$

$$T_{ц} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4, \quad (24)$$

где  $\omega_{min}^{(1)}$  – минимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с^2}$ .

Электроненергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна [1]

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \\
 & + R_{я} \cdot \left[ I_{доп}^2 \cdot (t_1 + t_2) - I_{доп} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right) \cdot t_2 - \frac{M_{co}}{C_M} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right) \cdot \frac{t_4^2}{t_2} + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{3} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right)^2 \cdot \left( t_2 + \frac{t_4^3}{t_2^2} \right) + \frac{M_{co}^2}{C_M^2} \cdot (t_3 + t_4) \right].
 \end{aligned} \quad (25)$$

Для оптимальной по минимуму потребляемой электроэнергии диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода справедливы уравнения [1]:

$$\omega_{доп} = \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot \left( t_1 + \frac{1}{2} t_2 \right); \quad (26)$$

$$\omega_{доп} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot \frac{t_4^2}{t_2}; \quad (27)$$

$$\begin{aligned}
 (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = & \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot \left( \frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + \frac{1}{3} t_2^2 \right) - \\
 & - \frac{1}{6} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot \frac{t_4^3}{t_2} + \omega_{доп} \cdot (t_3 + t_4).
 \end{aligned} \quad (28)$$

Из системы трех уравнений (26), (27) и (28) следует, что

$$t_1 = \frac{J \omega_{доп}}{C_M I_{доп} - M_{co}} - \frac{1}{4} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J \omega_{доп}} \cdot t_4^2; \quad (29)$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J \omega_{доп}} \cdot t_4^2; \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
 t_3 = & \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{доп}}{C_M I_{доп} - M_{co}} - \frac{2}{3} t_4 - \\
 & - \frac{1}{4} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J \omega_{доп}} \cdot t_4^2 + \frac{1}{96} \cdot \frac{(C_M I_{доп} - M_{co})^3}{J^3 \omega_{доп}^3} \cdot t_4^4.
 \end{aligned} \quad (31)$$

Если в зависимость (25) подставить значения длительностей этапов  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$  в соответствии с выражениями (29), (30) и (31), то зависимость для электроэнергии, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, принимает вид

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \\
 & + R_{я} \cdot \left\{ I_{доп}^2 \cdot \left[ \frac{J\omega_{доп}}{C_M I_{доп} - M_{co}} + \frac{1}{4} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4^2 \right] - \right. \\
 & - I_{доп} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right) \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4^2 - \\
 & - \frac{M_{co}}{C_M} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right) \cdot 2 \cdot \frac{J\omega_{доп}}{C_M I_{доп} - M_{co}} + \frac{1}{3} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right)^2 \times \\
 & \times \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4^2 + 4 \cdot \frac{J^2 \omega_{доп}^2}{(C_M I_{доп} - M_{co})^2} \cdot \frac{1}{t_4} \right] + \\
 & \left. + \frac{M_{co}^2}{C_M^2} \cdot \left[ \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J\omega_{доп}}{C_M I_{доп} - M_{co}} + \frac{1}{3} t_4 - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{4} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4^2 + \frac{1}{96} \cdot \frac{(C_M I_{доп} - M_{co})^3}{J^3 \omega_{доп}^3} \cdot t_4^4 \right] \right\}. \tag{32}
 \end{aligned}$$

Определим частную производную зависимости электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от длительности четвертого этапа и приравняем её к нулю

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial W}{\partial t_4} = & R_{я} \cdot \left\{ I_{доп}^2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4 - \right. \\
 & - I_{доп} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right) \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4 + \\
 & + \frac{1}{3} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right)^2 \cdot \left[ \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4 - 4 \cdot \frac{J^2 \omega_{доп}^2}{(C_M I_{доп} - M_{co})^2} \cdot \frac{1}{t_4} \right] + \\
 & \left. + \frac{M_{co}^2}{C_M^2} \cdot \left[ \frac{1}{3} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J\omega_{доп}} \cdot t_4 + \frac{1}{24} \cdot \frac{(C_M I_{доп} - M_{co})^3}{J^3 \omega_{доп}^3} \cdot t_4^3 \right] \right\} = 0. \tag{33}
 \end{aligned}$$

После преобразований

$$\frac{1}{8} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})^3}{J^3 \omega_{\text{доп}}^3} \cdot [M_{\text{со}}^2 \cdot t_4^2 - 4J^2 \omega_{\text{доп}}^2] \cdot t_4^3 + \quad (34)$$

$$+ [M_{\text{со}}^2 \cdot t_4^2 - 4J^2 \omega_{\text{доп}}^2] = 0.$$

Из уравнения (34) следует, что при

$$t_{4\text{экстр}} = 2 \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}; \quad (35)$$

якорная цепь электропривода потребляет минимально возможное значение электроэнергии за цикл

$$\begin{aligned} W_{\min} = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \\ & + R_{\text{я}} \cdot \left\{ I_{\text{доп}}^2 \cdot \left[ \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} \right] - \right. \\ & - 2 I_{\text{доп}} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} - 2 \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \times \\ & \times \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{1}{3} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \times \\ & \times \left[ 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} + 2 \cdot \frac{M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \right] + \\ & + \frac{M_{\text{со}}^2}{C_M^2} \cdot \left[ \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} - \right. \\ & \left. - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} + \frac{1}{6} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})^3}{M_{\text{со}}^3} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} \right] \left. \right\}. \quad (36) \end{aligned}$$

Для параметров диаграммы для больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода, обеспечивающего минимально возможное потребление электроэнергии за цикл, справедливы соотношения:

$$t_{1\text{экстр}} = \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}; \quad (37)$$

$$t_{2\text{экстр}} = 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}; \quad (38)$$

$$t_{3\text{экстр}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - \frac{4}{3} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} + \frac{1}{6} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})^3}{M_{\text{со}}^3} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}; \quad (39)$$

$$T_{\text{ц.экстр}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}} + \frac{1}{6} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})^3}{M_{\text{со}}^3} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}; \quad (40)$$

$$I_{\text{min.экстр}} = 0; \quad (41)$$

$$\omega_{\text{max.экстр}}^{(1)} = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J}; \quad (42)$$

$$\omega_{\text{min.экстр}}^{(1)} = -\frac{M_{\text{со}}}{J}. \quad (43)$$

Если  $t_{3\text{экстр}} = 0$ , то угол поворота исполнительного органа электропривода достигает экстремального граничного значения

$$\varphi_{\text{экстр.гр}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_M^3 I_{\text{доп}}^3}{M_{\text{со}}^3} \cdot \frac{4M_{\text{со}} - C_M I_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}^2}{M_{\text{со}}}. \quad (44)$$

При этом экстремальное граничное значение длительности цикла равно

$$T_{\text{ц.экстр.гр}} = \frac{C_M^2 I_{\text{доп}}^2}{M_{\text{со}}^2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}. \quad (45)$$

В таблице 5 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода с моментом сопротивления  $M_{\text{со}} = 6,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Таблица 5

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$T_{\text{ц.экстр}},$ с	$t_3,$ с	$W_{\text{min}},$ Дж
$559 \frac{451}{1875}$	$5 \frac{173}{375}$	0	$4369 \frac{1}{15}$
3200	$21 \frac{3019}{3125}$	$16 \frac{4732}{9375}$	$22936 \frac{68}{75}$

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:  $I_{\text{max.экстр}} = 8 \text{ А}$ ;

$$I_{min. \text{экстр}} = 0 \text{ А}; \quad \omega_{max. \text{экстр}}^{(1)} = 75 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad \omega_{min. \text{экстр}}^{(1)} = -125 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad t_{1\text{экстр}} = 1 \frac{137}{375} \text{ с};$$

$$t_{2\text{экстр}} = 1 \frac{67}{125} \text{ с}; \quad t_{4\text{экстр}} = 2,56 \text{ с}.$$

В таблице 6 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода с моментом сопротивления  $M_{co} = 7,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

Таблица 6

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$T_{ц \text{экстр}},$ с	$t_{3\text{экстр}},$ с	$W_{min},$ Дж
$539 \frac{95}{243}$	$5 \frac{31}{45}$	0	$5259 \frac{5}{81}$
3200	$22 \frac{386}{1215}$	$16 \frac{764}{1215}$	$28206 \frac{22}{27}$

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:  $I_{max. \text{экстр}} = 8 \text{ А};$

$$I_{min. \text{экстр}} = 0 \text{ А}; \quad \omega_{max. \text{экстр}}^{(1)} = 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad \omega_{min. \text{экстр}}^{(1)} = -150 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad t_{1\text{экстр}} = 2 \frac{38}{45} \text{ с};$$

$$t_{2\text{экстр}} = \frac{32}{45} \text{ с}; \quad t_{4\text{экстр}} = 2 \frac{2}{15} \text{ с}.$$

### Выводы

В зависимости от соотношения момента сопротивления и максимально допустимого момента используется одна из диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода, обеспечивающая минимально возможное потребление электроэнергии.

Если момент сопротивления электропривода не превышает половину максимально допустимого момента, то целесообразно использовать оптимальную по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмму перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением скорости электропривода.

Если момент сопротивления электропривода превышает половину максимально допустимого момента, то целесообразно использовать оптимальную по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмму перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Добробаба Ю.П., Луценко А.Ю. Управление энергосберегающими позиционными электроприводами с постоянным моментом сопротивления:

учеб. пособие / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар: Изд. ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2015. – 108с.

## REFERENCES

1. Dobrobaba Yu.P., Lutsenko A.Yu. Upravlenie energosberegayushchimi pozitsionnymi elektroprivodami s postoyannym momentom soprotivleniya: ucheb. posobie / Kuban. gos. tekhnol. un-t.- ~ Краснодар: Izd. FGBOU VPO «KubGTU», 2015. 108s.

### *DIRECT CURRENT DRIVE WITH A CONSTANT MOMENT OF RESISTANCE, AT THE MINIMUM POSSIBLE VALUE OF ELECTRIC POWER AT LARGE DISPLACEMENTS EXECUTIVE BODY*

**YU.P. DOBROBABA, G.A. KOSHKIN, A.A. IVANYUK**

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,  
e-mail: solist\_4321@mail.ru*

The optimum for minimum electricity consumption chart movements of the executive body of the electric DC constant torque resistance limited by the speed of the drive should be used to achieve the lowest possible energy consumption in managing large movements of the executive body of the electric DC with constant torque resistance, if the resistance moment electric drive does not exceed half of the maximum permissible moment. The optimum for minimum electricity consumption chart movements of the executive body of DC electric drive with constant torque resistance limited the maximum value of the anchor chain and electric motor speed of the motor current should be used to achieve the lowest possible energy consumption in the management of large movements of the executive body of the DC electric drive with a constant torque if the torque electric drive resistance exceeds half the maximum torque. Developed software to determine the parameters for the two diagrams with large movements of the executive body of the drive, which consumes the minimum possible value of electricity.

**Key words:** electric drive, relocation of the executive body, the lowest possible energy consumption.