

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

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

*Кубанский государственный технологический университет,  
350002, 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 без ограничений его координат целесообразно использовать для достижения минимально возможного потребления электроэнергии при управлении малыми 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 ограничением максимального значения тока якорной цепи электродвигателя целесообразно использовать для достижения минимально возможного потребления электроэнергии при управлении малыми 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 обеих диаграмм при малых 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 диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничения его координат. Данная диаграмма используется при малых 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  $\varphi_{кон}$ ; ток якорной цепи электродвигателя  $I_{я}$  линейно уменьшается от максимального значения  $I_{max}$  до минимального значения  $I_{min}$ ; угловая скорость параболически изменяется с начала от

нулевого значения до максимального значения  $\omega_{max}$ , а затем от максимального значения  $\omega_{max}$  до нулевого значения [1].

Для оптимальной по минимуму потребляемой электроэнергии диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничения его координат, справедливы следующие соотношения [1]:

$$I_{max} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} + J \cdot \omega_{max}^{(1)}]; \quad (1)$$

$$I_{min} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} - J \cdot \omega_{max}^{(1)}]; \quad (2)$$

$$\omega_{max} = \sqrt{\frac{3}{8} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) \cdot \omega_{max}^{(1)}}; \quad (3)$$

$$T_{ц} = \sqrt{6 \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{max}^{(1)}}}, \quad (4)$$

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

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

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

$J$  – момент инерции электропривода, кг·м<sup>2</sup>.

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

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 \cdot T_{ц} + \frac{1}{3} J^2 \cdot [\omega_{max}^{(1)}]^2 \cdot T_{ц} \right\}, \quad (5)$$

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

Из зависимости (4) следует, что

$$\omega_{max}^{(1)} = 6 \cdot \frac{(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})}{T_{ц}^2}. \quad (6)$$

Если в зависимость (5) подставить максимальное значение угловой скорости в соответствии с выражением (6), то зависимость для электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл, принимает вид

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{со} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left[ M_{со}^2 \cdot T_{ц} + 12J^2 \cdot \frac{(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})^2}{T_{ц}^3} \right]. \quad (7)$$

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

$$\frac{\partial W}{\partial T_{ц}} = \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left[ M_{со}^2 - 36J^2 \cdot \frac{(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})^2}{T_{ц}^4} \right] = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что при

$$T_{ц \text{ экстр}} = \sqrt{6 \cdot \frac{J}{M_{со}} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})}. \quad (9)$$

Якорная цепь электропривода потребляет минимально возможное значение электроэнергии за цикл

$$W_{min} = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{со} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{4}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{со} \cdot \sqrt{6M_{со}J \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})}. \quad (10)$$

Для параметров диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничений его координат, обеспечивающей минимально возможное потребление электроэнергии за цикл, справедливы соотношения:

$$\omega_{max.экстр}^{(3)} = \frac{M_{со}}{J}; \quad (11)$$

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

$$I_{min.экстр} = 0; \quad (13)$$

$$\omega_{max.экстр} = \sqrt{\frac{3}{8} \cdot \frac{M_{со}}{J} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})}. \quad (14)$$

На минимально допустимое значение перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода ограничения не накладывається, оно может иметь сколь угодно малое значение.

При увеличении значения перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода увеличивается максимальное значение угловой скорости электропривода  $\omega_{max}$ . Значение перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода  $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ , при котором максимальное значение угловой скорости электропривода  $\omega_{max}$  достигает максимально допустимого значения  $\omega_{доп}$ , является максимально допустимым (граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода  $\varphi_{гр}$ ) для рассматриваемой диаграммы.

Экстремальное граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода равно

$$\varphi_{экстр.гр} = \frac{8}{3} \cdot \frac{J \omega_{доп}^2}{M_{со}}. \quad (15)$$

При этом экстремальное граничное значение длительности цикла равно

$$T_{ц. экстр. гр} = 4 \cdot \frac{J \omega_{доп}}{M_{со}} \tag{16}$$

В данной работе рассматривается электропривод постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, имеющий следующие параметры:  $C_e = 1,25 \frac{В \cdot с}{рад}$ ;  $C_M = 1,25 В \cdot с$ ;  $R_я = 5 Ом$ ;  $J = 0,05 кг \cdot м^2$ . На контролируемые координаты электропривода наложены ограничения: максимально допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя,  $U_{доп} = 250 В$ ; максимально допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя  $I_{доп} = 8 А$ ; максимально допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}$ .

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

Таблица 1

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ , рад	$T_{ц экстр}$ , с	$\omega_{max. экстр}$ , $\frac{рад}{с}$	$W_{min}$ , Дж
0	0	0	0
25	2,4494897	15,30931	47,579931
50	3,4641016	21,650635	85,59401
75	4,2426406	26,516504	122,03427
100	4,8989794	30,618621	157,65986
150	6	37,5	227,5
200	6,9282032	43,30127	296,18802
250	7,7459666	48,412291	364,13977
300	8,4852813	53,033008	431,56853
400	9,7979589	61,237243	565,31972
500	10,954451	68,465319	698,02966
600	12	75	830
700	12,961481	81,009258	961,40987
800	13,856406	86,60254	1092,376
900	14,696938	91,855865	1222,9795
1000	15,491933	96,824583	1353,2795
1200	16,970562	106,06601	1613,137
1400	18,330302	114,56439	1872,202
1600	19,595917	122,47448	2130,6394
1800	20,784609	129,90381	2388,564
2000	21,908902	136,93063	2646,0593
2200	22,97825	143,61406	2903,1883
2400	24	150	3160
2600	24,979991	156,12494	3416,5332
2730	25,6	160	3584

При этом остальные параметры диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:

$$\omega_{max.экстр} = 25 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; I_{max.экстр} = 2 \text{ А}; I_{min.экстр} = 0 \text{ А}.$$

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

Таблица 2

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}),$ рад	$T_{ц\ экстр},$ с	$\omega_{max. экстр},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$W_{min},$ Дж
0	0	0	0
25	1,7320508	21,650635	108,68802
50	2,4494897	30,618621	190,31972
75	3	37,5	267,5
100	3,4641016	43,30127	342,37604
150	4,2426406	53,033008	488,13707
200	4,8989794	61,237243	630,63944
250	5,4772255	68,465319	771,05933
300	6	75	910
400	6,9282032	86,60254	1184,752
500	7,7459666	96,824583	1456,5591
600	8,4852813	106,06601	1726,2741
700	9,1651513	114,56439	1994,404
800	9,7979589	122,47448	2261,2789
900	10,392304	129,90381	2527,1281
1000	10,954451	136,93063	2792,1186
1200	12	150	3320
1365	12,8	160	3754

При этом остальные параметры диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:

$$\omega_{max.экстр} = 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; I_{max.экстр} = 4 \text{ А}; I_{min.экстр} = 0 \text{ А}.$$

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

Таблица 3

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}),$ рад	$T_{ц\ экстр},$ с	$\omega_{max. экстр},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$W_{min},$ Дж
1	2	3	4
0	0	0	0
25	1,4142135	26,51	178,60281
50	2	37,516504	307,5

Окончание таблицы 3

1	2	3	4
75	2,4494897	45,927932	428,21938
100	2,8284271	53,033008	544,70561
150	3,4641016	64,951905	770,34609
200	4	75	990
250	4,4721359	83,852549	1205,8281
300	4,8989794	91,855865	1418,9387
400	5,6568542	106,06601	1839,4112
500	6,3245553	118,58541	2254,4733
600	6,9282032	129,90381	2665,6921
700	7,4833147	140,31215	3073,9988
800	8	150	3480
900	8,4852813	159,09902	3884,1168
910	8	160	3925

При этом остальные параметры диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:

$$\omega_{max.экстр} = 75 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; I_{max.экстр} = 6 \text{ А}; I_{min.экстр} = 0 \text{ А}.$$

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

Таблица 4

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ , рад	$T_{ц экстр}$ , с	$\omega_{max. экстр}$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$W_{min}$ , Дж
0	0	0	0
25	1,2247448	30,618621	255,63945
50	1,7320508	43,30127	434,75208
75	2,1213203	53,033008	601,27415
100	2,4494897	61,237243	761,27889
150	3	75	1070
200	3,4641016	86,60254	1369,5041
250	3,8729833	96,824583	1663,1182
300	4,2426406	106,06601	1952,5483
400	4,8989794	122,47448	2522,5578
500	5,4772255	136,93063	3084,2373
600	6	150	3640
682	6,4	160	4096

При этом остальные параметры диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:

$$\omega_{max.экстр} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; I_{max.экстр} = 8 \text{ А}; I_{min.экстр} = 0 \text{ А}.$$

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 максимального допустимого тока  $I_{доп}$ .

Таким образом, оптимальная по максимуму потребляемой энергии диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничений его координат применима для достижения минимально возможного потребления электроэнергии за цикл при выполнении условия

$$M_{со} \leq \frac{1}{2} C_M I_{доп}. \quad (17)$$

Если выполняется условие

$$\frac{1}{2} C_M I_{доп} \leq M_{со}, \quad (18)$$

то необходимо использовать оптимальную по минимуму потребляемой электроэнергии диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением максимального значения тока якорной цепи электродвигателя. Данная диаграмма используется при малых перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления. При этом диаграмма состоит из двух этапов. На первом этапе ток якорной цепи электродвигателя имеет максимально допустимое значение  $I_{доп}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода линейно



увеличивается от нулевого значения до значения  $\omega_1$ ; угол поворота изменяется от начального значения  $\varphi_{\text{нач}}$  до значения  $\varphi_1$  [1]. Длительность первого этапа равна  $t_1$ . На втором этапе ток якорной цепи электродвигателя линейно уменьшается от максимально допустимого значения  $I_{\text{доп}}$  до минимального значения  $I_{\text{мин}}$ ; угловая скорость исполнительного органа электропривода параболически изменяется с начала от значения  $\omega_1$  до максимального значения  $\omega_{\text{max}}$ , а затем от максимального значения  $\omega_{\text{max}}$  до нулевого значения; угол поворота изменяется от значения  $\varphi_1$  до конечного значения [1]. Длительность второго этапа равна  $t_2$ .

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

$$I_{\text{max}} = I_{\text{доп}}; \quad (19)$$

$$I_{\text{min}} = 2 \frac{M_{\text{со}}}{C_{\text{М}}} \cdot \frac{(t_1 + t_2)}{t_2} - I_{\text{доп}} \cdot \frac{2t_1 + t_2}{t_2}; \quad (20)$$

$$\omega_{\text{max}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{C_{\text{М}} I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \frac{(2t_1 + t_2)^2}{t_1 + t_2}; \quad (21)$$

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

$$\omega_{\text{min}}^{(1)} = -\frac{C_{\text{М}} I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \frac{2t_1 + t_2}{t_2}; \quad (23)$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \\
 & + R_{\text{я}} \cdot \left[ I_{\text{доп}} \cdot \left( 2 \cdot \frac{M_{\text{со}}}{C_M} - I_{\text{доп}} \right) \cdot (t_1 + t_2) + \right. \\
 & \left. + \frac{4}{3} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \cdot \frac{(t_1 + t_2)^2}{t_2} \right].
 \end{aligned} \tag{25}$$

Для оптимальной по минимуму потребляемой электроэнергии диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением максимального значения тока якорной цепи электродвигателя справедливо уравнение

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \left( \frac{1}{2} t^2 + \frac{2}{3} t_1 t_2 + \frac{1}{6} t_2^2 \right). \tag{26}$$

Из системы двух уравнений (24) и (26) следует, что

$$t_1 = 3 \cdot \frac{J}{T_{\text{ц}}} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - \frac{1}{2} T_{\text{ц}}; \tag{27}$$

$$t_2 = \frac{3}{2} T_{\text{ц}} - 3 \cdot \frac{J}{T_{\text{ц}}} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}. \tag{28}$$

Если в зависимость (25) подставить значения длительностей этапов  $t_1$  и  $t_2$  в соответствии с выражениями (27) и (28), то зависимость для электроэнергии, потребляемой якорной цепью за цикл, принимает вид

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \\
 & + R_{я} \cdot \left[ I_{доп} \cdot \left( 2 \cdot \frac{M_{co}}{C_M} - I_{доп} \right) \cdot T_{ц} + \right. \\
 & \left. + \frac{8}{9} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right)^2 \cdot \frac{T_{ц}^3}{T_{ц}^2 - 2J \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}}} \right].
 \end{aligned} \tag{29}$$

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

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial W}{\partial T_{ц}} = & R_{я} \cdot \left[ I_{доп} \cdot \left( 2 \cdot \frac{M_{co}}{C_M} - I_{доп} \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{8}{9} \cdot \left( I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right)^2 \cdot \frac{3T_{ц}^3 \cdot \left( T_{ц}^2 - 2J \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}} \right) - 2T_{ц}^4}{\left( T_{ц}^2 - 2J \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}} \right)^2} \right] = 0.
 \end{aligned} \tag{30}$$

После преобразований

$$\begin{aligned}
 & (2M_{co} + C_M I_{доп}) \cdot (4M_{co} - C_M I_{доп}) \cdot T_{ц \text{ экстр}}^4 - \\
 & - 12 \cdot \left( 4M_{co}^2 - 2M_{co} \cdot C_M I_{доп} + C_M^2 I_{доп}^2 \right) \cdot J \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}} \cdot T_{ц \text{ экстр}}^2 + \\
 & + 36C_M I_{доп} \cdot (2M_{co} - C_M I_{доп}) \cdot J^2 \cdot \frac{(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})^2}{(C_M I_{доп} - M_{co})^2} = 0.
 \end{aligned} \tag{31}$$

Из уравнения (31) следует, что при

$$T_{ц \text{ экстр}} = \sqrt{\frac{6C_M I_{доп}}{4M_{co} - C_M I_{доп}} \cdot J \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}}} \tag{32}$$

якорная цепь электропривода потребляет минимально возможное значение электроэнергии за цикл

$$W_{min} = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{1}{3} R_{я} I_{доп} \cdot \sqrt{6 I_{доп} \cdot \left( 4 \cdot \frac{M_{co}}{C_M} - I_{доп} \right)} \cdot J \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}}. \quad (33)$$

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

$$t_{1экстр} = 3 \cdot \frac{J}{T_{ц. экстр}} \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}} - \frac{1}{2} T_{ц. экстр}; \quad (34)$$

$$t_{2 экстр} = \frac{3}{2} T_{ц. экстр} - 3 \cdot \frac{J}{T_{ц. экстр}} \cdot \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{C_M I_{доп} - M_{co}}; \quad (35)$$

$$I_{min} = 0;$$

$$\omega_{max. экстр} = \frac{1}{4} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot \frac{(T_{ц. экстр} + t_{1экстр})^2}{T_{ц. экстр}}; \quad (36)$$

$$\omega_{max. экстр}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J}; \quad (37)$$

$$\omega_{min. экстр} = -\frac{M_{co}}{J}. \quad (38)$$

Зависимость (36) представима в виде

$$\omega_{max. экстр} = \sqrt{6} \cdot \frac{M_{co}}{C_M I_{доп}} \cdot \sqrt{\frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{4 M_{co} - C_M I_{доп}} \cdot \frac{M_{co}}{C_M I_{доп}} \cdot \frac{M_{co}}{J}} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}). \quad (39)$$

Экстремальное граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода равно

$$\varphi_{\text{экстр. гр}} = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_M^3 I_{\text{доп}}^3}{M_{\text{со}}^3} \cdot \frac{4M_{\text{со}} - C_M I_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}^2}{M_{\text{со}}}. \quad (40)$$

При этом экстремальное граничное значение длительности цикла равно

$$T_{\text{ц. экстр. гр}} = 4 \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{M_{\text{со}}}. \quad (41)$$

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	$t_{1\text{экстр}}$ , с	$t_{2\text{экстр}}$ , с	$\omega_{\text{max, экстр}}$ , <del>рад</del> с	$W_{\text{min}}$ , Дж
0	0	0	0	0	0
25	1,1547005	0,2886752	0,8660253	33,829119	341,00208
50	1,6329931	0,4082484	1,2247447	47,841598	573,77889
75	2	0,5	1,5	58,59375	788,75
100	2,309401	0,5773503	1,7320507	67,658233	994,50413
150	2,8284271	0,7071068	2,1213203	82,864068	1390,0483
200	3,2659862	0,8164967	2,4494895	95,683192	1772,5578
250	3,6514836	0,912871	2,7386126	106,97705	2146,7373
300	4	1	3	117,1875	2515
400	4,6188021	1,1547006	3,4641015	135,31646	3239,0083
500	5,1639777	1,2909946	3,8729831	151,28841	3951,2364
<del>451</del> 559	<del>173</del> 5375	<del>137</del> 1375	<del>12</del> 4125	160	4369

При этом остальные параметры диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:

$$I_{\text{max.экстр}} = 8 \text{ А}; \quad I_{\text{min.экстр}} = 0 \text{ А}; \quad \omega_{\text{max.экстр}}^{(1)} = 75 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad \omega_{\text{min.экстр}}^{(1)} = -125 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

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

Таблица 6

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ , рад	$T_{\text{ц экстр}}$ , с	$t_{1\text{экстр}}$ , с	$t_{2\text{экстр}}$ , с	$\omega_{\text{max, экстр}}$ , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$W_{\text{min}}$ , Дж
0	0	0	0	0	0
25	1,2247448	0,6123724	0,6123724	34,445947	448,77888
50	1,7320508	0,8660254	0,8660254	48,713928	744,50413
75	2,1213203	1,0606601	1,060661	59,662133	1015,0483
100	2,4494897	1,2247448	1,2247448	68,891897	1272,5578
150	3	1,5	1,5	84,375	1765
200	3,4641016	1,7320508	1,7320508	97,427857	2239,0083
250	3,8729833	1,9364916	1,9364916	108,92765	2701,2364
300	4,2426406	2,1213203	2,1213203	119,32426	3155,0966
400	4,8989794	2,4494897	2,4494897	137,78379	4045,1156
500	5,4772255	2,7386127	2,7386127	154,04696	4918,4747
<del>95</del> 539 <del>243</del>	<del>31</del> 5 <del>45</del>	<del>30</del> 2 <del>45</del>	<del>30</del> 2 <del>45</del>	160	5259

При этом остальные параметры диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода имели постоянные значения:

$$I_{\text{max.экстр}} = 8 \text{ А}; I_{\text{min.экстр}} = 0 \text{ А}; \omega_{\text{max. экстр}}^{(1)} = 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{min. экстр}}^{(1)} = -150 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

### Вывод

Вид диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, обеспечивающей минимально возможное потребление электроэнергии, зависит от соотношения момента сопротивления электропривода и максимально допустимого момента.

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 без ограничений его координат.

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 ограничением максимального значения тока якорной цепи электродвигателя.

#### 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. ~ Krasnodar: Izd. FGBOU VPO «KubGTU», 2015. 108s.

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

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

*Kuban State Technological University,  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350002;  
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 without limitation its coordinates should be used to achieve the lowest possible consumption of electricity in the management of small movements of the executive body of the electric DC 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 of the motor current should be used to achieve the lowest possible energy consumption in the management of small 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 small 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.