

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ДИАГРАММ ДЛЯ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЗАВИСЯЩИМ ОТ СКОРОСТИ МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ****DEVELOPMENT OF ENERGY SAVING DIAGRAMS FOR SMALL MOVEMENTS OF THE EXECUTIVE BODY OF THE ELECTRIC DC DEPENDING ON THE SPEED OF THE MOMENT OF RESISTANCE**

Добробаба Юрий Петрович  
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yuriy Petrovitch  
Cand.Tech.Sci., professor

Луценко Артём Юрьевич  
аспирант  
*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*

Lutsenko Artyom Yurievich  
postgraduate student  
*Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia*

Разработаны энергосберегающие диаграммы на малые перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. Найдены параметры представленных диаграмм, а также определены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать потребляемую электроприводом электроэнергию

Developed energy saving chart on small movements of the executive body electric DC drive with speed-dependent of the movement of resistance. The parameters presented diagrams and identified analytical dependences, allowing to calculate the consumption of electric energy

Ключевые слова: ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ДИАГРАММА, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН

Keywords: ENERGY SAVING DIAGRAM, EXECUTIVE BODY

В статье [1] рассмотрено управление перемещением исполнительного органа электропривода переменного тока с моментом сопротивления, зависящим от скорости.

В настоящей статье управление при малых перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления предлагается реализовать в соответствии с энергосберегающими диаграммами:

- без ограничений его координат (диаграмма приведена на рисунке 1);
- с ограничением максимального значения тока якорной цепи электродвигателя (диаграмма приведена на рисунке 2);
- с ограничениями максимального и минимального значений тока якорной цепи электродвигателя (диаграмма приведена на рисунке 3).

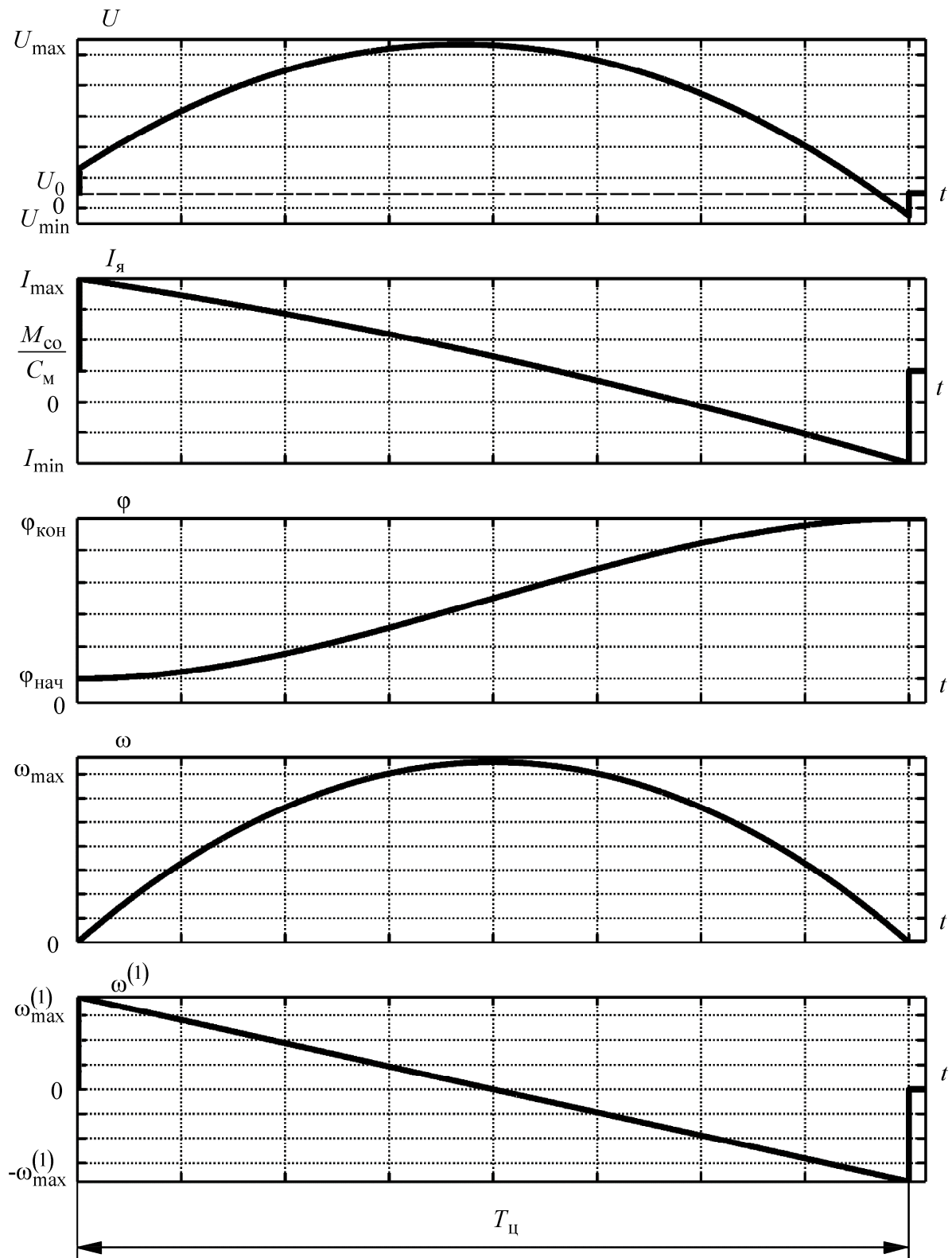


Рисунок 1

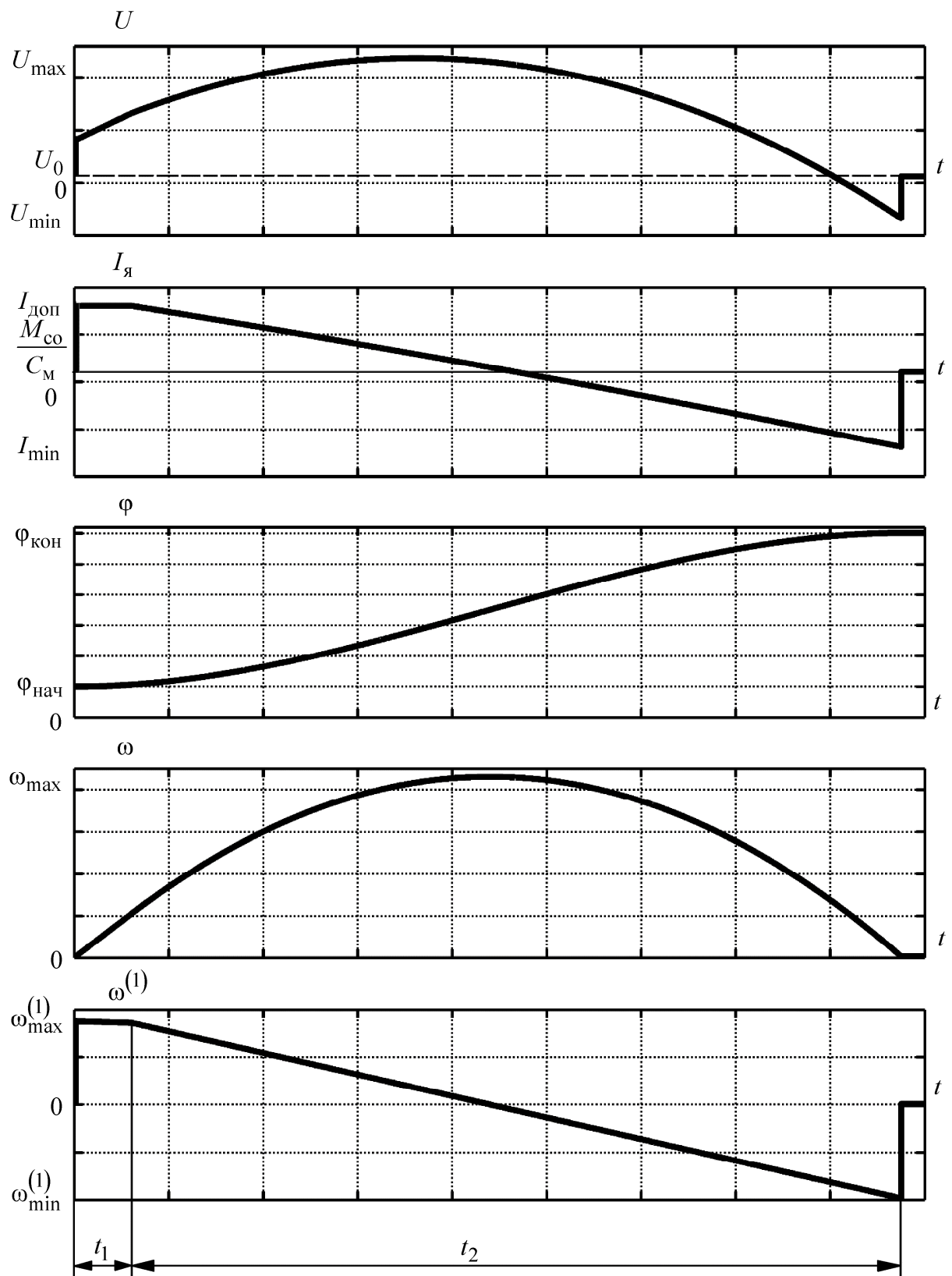


Рисунок 2

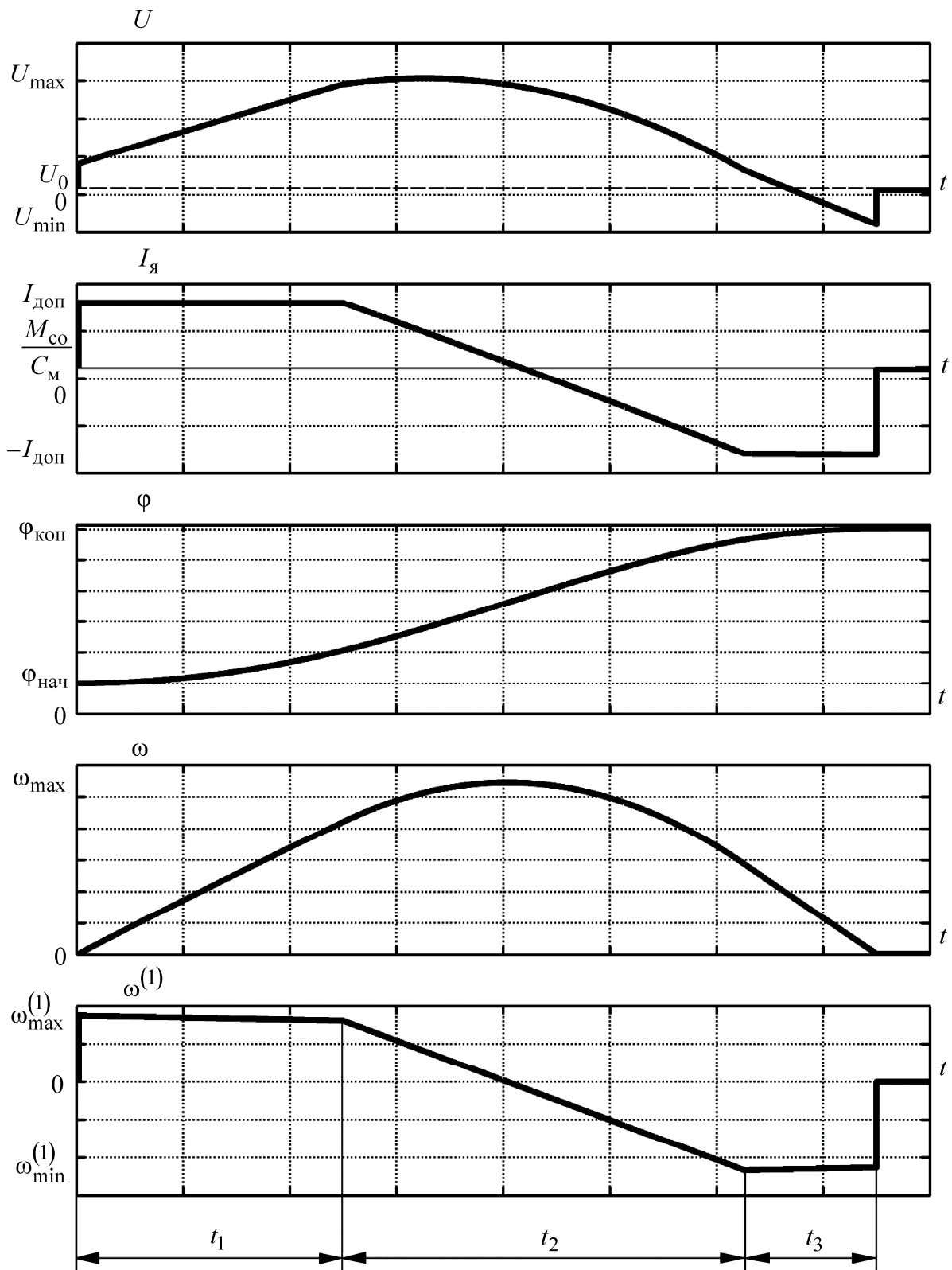


Рисунок 3

На рисунках приняты следующие обозначения

- $U$  – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $U_{\max}$  – максимальное значение напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $U_{\min}$  – минимальное значение напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $U_0$  – начальное значение напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $I_{\text{я}}$  – ток якорной цепи электродвигателя, А;
- $I_{\max}$  – максимальное значение тока якорной цепи электродвигателя, А;
- $I_{\min}$  – минимальное значение тока якорной цепи электродвигателя, А;
- $I_{\text{доп}}$  – допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А;
- $M_{\text{со}}$  – постоянный по величине момент сопротивления электропривода, Н·м;
- $C_{\text{м}}$  – коэффициент пропорциональности между током и электромагнитным моментом электродвигателя, В·с;
- $\Phi$  – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\Phi_{\text{нач}}$  – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\Phi_{\text{кон}}$  – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\omega$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;
- $\omega_{\max}$  – максимальное значение скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;
- $\omega^{(1)}$  – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ ;
- $\omega_{\max}^{(1)}$  – максимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ ;
- $\omega_{\min}^{(1)}$  – минимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ ;

- $T_{ц}$  – длительность цикла перемещения, с;  
 $t_1$  – длительность первого этапа, с;  
 $t_2$  – длительность второго этапа, с;  
 $t_3$  – длительность третьего этапа, с.

Для энергосберегающей диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления без ограничения его координат справедливы следующие зависимости:

$$\omega_{\min}^{(2)} = -2 \cdot \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{T_{ц}}; \quad (1)$$

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

$$I_{\max} = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left[ M_{\text{со}} + J \cdot \omega_{\max}^{(1)} \right]; \quad (3)$$

$$I_{\min} = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left[ M_{\text{со}} - J \cdot \omega_{\max}^{(1)} \right]; \quad (4)$$

$$\omega_{\max} = \sqrt{\frac{3}{8} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \cdot \omega_{\max}^{(1)}}, \quad (5)$$

где  $\omega_{\min}^{(2)}$  – минимальное значение второй производной скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ ;

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

Зависимости тока якорной цепи электродвигателя от времени и напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, от времени имеют вид:

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left[ M_{\text{со}} + K_{\text{с}} \cdot \omega_{\max}^{(1)} \cdot \left( t - \frac{t^2}{T_{ц}} \right) + J \omega_{\max}^{(1)} \cdot \left( 1 - 2 \cdot \frac{t}{T_{ц}} \right) \right]; \quad (6)$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\max}^{(1)} \cdot \left( t - \frac{t^2}{T_{ц}} \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left[ M_{\text{со}} + K_{\text{с}} \cdot \omega_{\max}^{(1)} \cdot \left( t - \frac{t^2}{T_{ц}} \right) + \right.$$

$$+ J \omega_{\max}^{(1)} \cdot \left[ 1 - 2 \cdot \frac{t}{T_{\text{ц}}} \right], \quad (7)$$

где  $K_c$  – коэффициент пропорциональности между скоростью и моментом сопротивления электропривода, Н·м·с / рад;

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

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

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(1)} \cdot \left[ \frac{1}{6} M_{\text{со}} \cdot T_{\text{ц}}^2 + \frac{1}{30} K_c \omega_{\max}^{(1)} \cdot T_{\text{ц}}^3 \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 \cdot T_{\text{ц}} + \frac{1}{3} M_{\text{со}} K_c \omega_{\max}^{(1)} \cdot T_{\text{ц}}^2 + \frac{1}{30} K_c^2 \cdot \left[ \omega_{\max}^{(1)} \right]^2 \cdot T_{\text{ц}}^3 + \right. \\ \left. + \frac{1}{3} J^2 \cdot \left[ \omega_{\max}^{(1)} \right]^2 \cdot T_{\text{ц}} \right\}. \quad (8)$$

Если в зависимость (8) подставить значения длительности цикла перемещения, определяемое по формуле (2), то электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{\sqrt{6}}{5} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot K_c \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^{\frac{3}{2}} \times \\ \times \left[ \omega_{\max}^{(1)} \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ \sqrt{6} M_{\text{со}}^2 \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \omega_{\max}^{(1)} \right]^{\frac{1}{2}} + \right. \\ + 2 M_{\text{со}} K_c \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{\sqrt{6}}{5} K_c^2 \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^{\frac{3}{2}} \cdot \left[ \omega_{\max}^{(1)} \right]^{\frac{1}{2}} + \\ \left. + \frac{\sqrt{6}}{3} \cdot J^2 \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^{\frac{1}{2}} \cdot \left[ \omega_{\max}^{(1)} \right]^{\frac{3}{2}} \right\}. \quad (9)$$

Анализ зависимости (9) показывает, что при

$$\omega_{\max. \text{экстр}}^{(1)} = \sqrt{\frac{M_{\text{со}}^2}{J^2} + \frac{1}{100} \cdot \frac{K_c^2}{J^2} \cdot \left(\frac{C_e C_M}{R_{\text{я}} J} + \frac{K_c}{J}\right)^2} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^2 - \frac{1}{10} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot \left(\frac{C_e C_M}{R_{\text{я}} J} + \frac{K_c}{J}\right) \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \quad (10)$$

якорная цепь электропривода при движении в соответствии с этой диаграммой потребляет минимально возможное количество электроэнергии.

При уменьшении максимального значения первой производной скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\max}^{(1)}$  по сравнению с его экспериментальным значением  $\omega_{\max. \text{экстр}}^{(1)}$  увеличивается длительность цикла и увеличивается потребляемая якорной цепью электропривода электроэнергия.

При увеличении максимального значения первой производной скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\max}^{(1)}$  по сравнению с его экспериментальным значением  $\omega_{\max. \text{экстр}}^{(1)}$  уменьшается длительность цикла и увеличивается потребляемая якорной цепью электропривода электроэнергия.

При увеличении максимального значения первой производной скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\max}^{(1)}$  увеличивается максимальное значение тока якорной цепи электродвигателя  $I_{\max}$ . При достижении максимального тока якорной цепи  $I_{\max}$  допустимого значения тока якорной цепи электродвигателя  $I_{\text{доп}}$  следует использовать энергосберегающую диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления с ограничением максимального значения тока якорной цепи электродвигателя.

Для энергосберегающей диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления с ограничением максимального значения тока якорной цепи электродвигателя справедливы зависимости:

$$\omega_{\min}^{(2)} = 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c t_2^2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c t_2^2} - 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J t_2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1}; \quad (11)$$



$$\begin{aligned}
 (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = & \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot t_1 - \\
 & - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} - \frac{2}{3} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 + \\
 & + \frac{2}{3} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot t_2 + \frac{1}{6} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2^2; \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_{\text{max}} = & \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) + \\
 & + \frac{1}{4} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \frac{t_2^2}{\frac{J}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - \frac{J}{K_c} + t_2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1}; \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{min}} = & \frac{1}{C_M} \cdot \left[ M_{\text{со}} - (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \right. \\
 & \left. + 2 \cdot \frac{J \cdot (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})}{K_c t_2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 2 \cdot \frac{J \cdot (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})}{K_c t_2} \right]; \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J}; \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 \omega_{\text{min}}^{(1)} = & 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c t_2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c t_2} - \\
 & - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1}; \quad (16)
 \end{aligned}$$

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2. \quad (17)$$

Из системы, состоящей из уравнений (12) и (17), определяются длительности первого и второго этапов  $t_1$  и  $t_2$ .

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна

$$W = C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left[ t_1 - \frac{J}{K_c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \left( \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{1}{6} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \cdot t_2 \Bigg] + \\
 & + \frac{1}{4} \cdot C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2^2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \right. \\
 & \left. + 2 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 2 \cdot \frac{J}{K_c} - 2t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \times \\
 & \times \left( 1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{1}{3} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) + \frac{1}{5} \cdot C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \times \\
 & \times \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot \left( e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \times \\
 & \times \left( \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{1}{4} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \cdot t_2 + \\
 & + R_{\text{я}} \cdot \left[ I_{\text{доп}}^2 \cdot (t_1 + t_2) + I_{\text{доп}} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \times \right. \\
 & \left. \times \left( \frac{1}{3} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2^2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + 2 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 2 \cdot \frac{J}{K_c} - \frac{4}{3} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - \frac{2}{3} \cdot t_2 \right) + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{3} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \cdot \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + 2 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot \frac{1}{t_2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - \right. \right. \\
 & \left. \left. - 2 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot \frac{1}{t_2} - 2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \cdot t_2 + \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \times \right. \\
 & \left. \times \left( \frac{3}{10} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2^2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{J}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - \frac{J}{K_c} - \frac{4}{5} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - \frac{1}{5} t_2 \right) \times \right. \\
 & \left. \times \left( e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \right]. \tag{18}
 \end{aligned}$$

При дальнейшем уменьшении длительности цикла  $T_{ц}$  минимальное значение тока якорной электродвигателя достигает допустимого значения тока якорной цепи электродвигателя со знаком «минус»  $-I_{доп}$ . При этом следует использовать энергосберегающую диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления с ограничениями максимального и минимального значений тока якорной цепи электродвигателя.

Для энергосберегающей диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления с ограничениями максимального и минимального значений тока якорной цепи электродвигателя справедливы зависимости:

$$\omega_{\min}^{(2)} = 2 \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{K_c t_2^2} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} - 4 \cdot \frac{C_M I_{доп}}{K_c t_2^2} - 2 \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{J t_2} \times$$

$$\times e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} + 2 \cdot \frac{C_M I_{доп} + M_{со}}{K_c t_2^2} \cdot e^{\frac{K_c \cdot t_3}{J}}; \quad (19)$$

$$(C_M I_{доп} - M_{со}) \cdot \left( 2 \cdot \frac{J}{K_c} - t_2 \right) \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} - 4 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot C_M I_{доп} +$$

$$+ (C_M I_{доп} + M_{со}) \cdot \left( 2 \cdot \frac{J}{K_c} + t_2 \right) \cdot e^{\frac{K_c \cdot t_3}{J}} = 0; \quad (20)$$

$$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{K_c} \cdot t_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{K_c} \cdot t_2 - \frac{C_M I_{доп} + M_{со}}{K_c} \cdot t_3 +$$

$$+ \frac{1}{6} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \cdot t_2^2 - \frac{2}{3} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{K_c} \times$$

$$\times e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \cdot t_2 + \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{K_c} \cdot t_2 -$$

$$- 2 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{доп}}{K_c} + \frac{1}{3} \cdot \frac{C_M I_{доп} + M_{со}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_3}{J}} \cdot t_2 +$$

$$+ \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{доп} + M_{со}}{K_c} \cdot e^{\frac{K_c \cdot t_3}{J}}; \quad (21)$$

$$\omega_{\min}^{(1)} = -\frac{C_M I_{доп} + M_{со}}{J} \cdot e^{\frac{K_c \cdot t_3}{J}}; \quad (22)$$

$$\omega_{\max} = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \right) + \frac{1}{4} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \frac{t_2^2}{\frac{J}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} - \frac{J}{K_c} + t_2} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}}; \quad (23)$$

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3. \quad (24)$$

Из системы, состоящей из уравнений (20), (21) и (24), определяются длительности первого, второго и третьего этапов  $t_1$ ,  $t_2$  и  $t_3$ .

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна

$$\begin{aligned} W = & C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left[ t_1 - \frac{J}{K_c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \right) \right] + \\ & + C_e \cdot \left\{ \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \right) \cdot \left( \frac{1}{3} t_2 - \frac{J}{K_c} \right) - \right. \\ & - \frac{2}{3} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot I_{\text{доп}} \cdot t_2 - \\ & - \left[ \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} - 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \cdot t_2 + \right. \\ & + \left. \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{\frac{K_c \cdot t_3}{J}} \right] \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left( \frac{1}{15} t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{J}{K_c} \right) + \\ & + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \right) \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \times \\ & \times \left[ \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2^2 + 2 \cdot \frac{J}{K_c} - 2t_2 \right) + \frac{1}{3} \cdot \left( 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \right) \cdot t_2 \right] + \\ & + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-2 \cdot \frac{K_c \cdot t_1}{J}} \times \\ & \times \left[ \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2^2 + 2 \cdot \frac{J}{K_c} - 2t_2 \right) + \frac{1}{4} \cdot \left( 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \right) \cdot t_2 \right] \cdot t_2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left[ \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{K_c} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 + \right. \\
 & \left. + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{\frac{K_c}{J} \cdot t_3} \right] \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \times \\
 & \times \left[ \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2^2 + 2 \cdot \frac{J}{K_c} - 2t_2 \right) + \frac{1}{5} \cdot \left( 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \right) \cdot t_2 \right] + \\
 & + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \left( I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \cdot e^{\frac{K_c}{J} \cdot t_3} \cdot \left( \frac{1}{2} t_2 + \frac{J}{K_c} \right) + \\
 & + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \left( I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{\frac{K_c}{J} \cdot (t_3 - t_1)} \cdot \left( \frac{1}{4} t_2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{J}{K_c} \right) \cdot t_2 + \\
 & + \left[ \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{K_c} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 + \right. \\
 & \left. + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{\frac{K_c}{J} \cdot t_3} \right] \cdot \left( I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{\frac{K_c}{J} \cdot t_3} \cdot \left( \frac{1}{5} t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{J}{K_c} \right) \left. \right\} + \\
 & + C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{K_c} \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left[ t_3 + \frac{J}{K_c} \cdot \left( 1 - e^{\frac{K_c}{J} \cdot t_3} \right) \right] + \\
 & + R_{\text{я}} I_{\text{доп}}^2 \cdot t_1 + R_{\text{я}} \cdot \left\{ I_{\text{доп}}^2 \cdot \left( \frac{7}{15} t_2 + \frac{4}{3} \cdot \frac{J^2}{K_c^2} \cdot \frac{1}{t_2} \right) - \right. \\
 & - I_{\text{доп}} \cdot \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \left[ \left( \frac{4}{3} t_2 + \frac{8}{3} \cdot \frac{J^2}{K_c^2} \cdot \frac{1}{t_2} - 2 \cdot \frac{J}{K_c} \right) + \right. \\
 & \left. \left. + \left( 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \right) \cdot \left( \frac{2}{15} t_2 + \frac{J}{K_c} \right) \right] - I_{\text{доп}} \cdot \left( I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{\frac{K_c}{J} \cdot t_3} \times \right. \\
 & \times \left( \frac{2}{15} t_2 + \frac{J}{K_c} + \frac{8}{3} \cdot \frac{J^2}{K_c^2} \cdot \frac{1}{t_2} \right) + \left( I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \cdot e^{-2 \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_1} \times \\
 & \times \left[ \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{J}{K_c} - 2 \right)^2 + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot \frac{1}{t_2} - 2 \right) \times \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left[ \left( 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \right) + \frac{1}{5} \cdot \left( 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \right)^2 \right] \cdot t_2 + \left( I_{\text{доп}}^2 - \frac{M_{\text{со}}^2}{C_M^2} \right) \cdot e^{\frac{K_c}{J} \cdot (t_3 - t_1)} \times \\ & \times \left[ \left( \frac{K_c}{J} \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{J}{K_c} \cdot \frac{1}{t_2} - 2 \right) \cdot \left( \frac{1}{2} t_2 + \frac{4}{3} \cdot \frac{J}{K_c} \right) + \left( 1 - \frac{K_c}{J} \cdot t_2 \right) \cdot \left( \frac{2}{5} t_2 + \frac{J}{K_c} \right) \right] + \\ & + \left( I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \cdot e^{2 \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_3} \cdot \left( \frac{1}{5} t_2 + \frac{J}{K_c} + \frac{4}{3} \cdot \frac{J^2}{K_c^2} \cdot \frac{1}{t_2} \right) \left. \right\} + R_{\text{я}} I_{\text{доп}} \cdot t_3. \quad (25) \end{aligned}$$

Для рассмотренных диаграмм, обеспечивающих малые перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления, необходимо выполнение следующего условия – максимальное значение скорости исполнительного органа электропривода не должно превышать максимально допустимого значения скорости.

#### Выводы

Определены параметры энергосберегающих диаграмм для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

Найдены условия существования для каждой энергосберегающей диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

Определены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать потребляемую электроприводом электроэнергию при перемещении его исполнительного органа в соответствии с предлагаемыми диаграммами движения.

#### Список литературы

1 Добробаба Ю.П., Луценко А.Ю., Миронюк П.Г. Управление энергосберегающим позиционным электроприводом переменного тока с моментом сопротивления, зависящим от скорости в виде полинома первой степени / Научный журнал КубГАУ, №86(02), 2013. Ссылка на интернет-ресурс: <http://ej.kubagro.ru/2013/02/pdf/43.pdf>.

#### References

1 Dobrobaba Ju.P., Lucenko A.Ju., Mironjuk P.G. Upravlenie jenergo-sberegajushhim pozicionnym jelektroprivodom peremennogo toka s momentom soprotivlenija, zavisjashhim ot skorosti v vide polinoma pervoj stepeni / Nauchnyj zhurnal KubGAU, №86(02), 2013. Ssylka na internet-resurs: <http://ej.kubagro.ru/2013/02/pdf/43.pdf>.