

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ДИАГРАММ ДЛЯ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЗАВИСЯЩИМ ОТ СКОРОСТИ МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ**DEVELOPMENT OF ENERGY SAVING DIAGRAMS FOR LARGE 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
РИНЦ SPIN-код = 4946-0809
РИНЦ Author ID = 662496

Dobrobaba Yuriy Petrovitch
Cand.Tech.Sci., professor
RSCI SPIN-code = 4946-0809
RSCI Author ID = 662496

Луценко Артём Юрьевич
аспирант
РИНЦ SPIN-код = 9722-4281
РИНЦ Author ID = 789253

Lutsenko Artyom Yurieovich
postgraduate student
RSCI SPIN-code = 9722-4281
RSCI Author ID = 789253

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

В последние годы в России уделяется большое внимание теоретическим и практическим вопросам энергосбережения. Так как электроприводы потребляют около 70 % вырабатываемой электроэнергии, то наиболее существенная экономия достигается при использовании регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока. В настоящей статье для позиционного электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления разработаны три энергосберегающие диаграммы для больших перемещений: с ограничением скорости электропривода; с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода; с ограничениями максимального и минимального значений тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода. Разработано математическое обеспечение для определения параметров энергосберегающих диаграмм для больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. Для рассмотренных энергосберегающих диаграмм, обеспечивающих большие перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления, необходимо выполнение следующего условия – максимальное значение скорости исполнительного органа электропривода должно быть равно максимально допустимому значению скорости. Определены аналитические зависимости, позволяющие рассчитать потребляемую электроприводом электроэнергию при перемещении его исполнительного органа в соответствии с предлагаемыми диаграммами. Реализация разработанного управления позиционными электроприводами постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления приведет к энергосбережению

In recent years, Russia has paid great attention to the theoretical and practical aspects of conservation. Since electric drives consume about 70% of electricity generated, the most substantial savings achieved by using variable speed drives AC and DC. In this article, for the positional DC drive with speed-dependent resistance torque we have developed three energy-saving diagrams for large movements: with a speed limit of the drive; restricted maximum current anchor chain and speed electric motor; restricted maximum and minimum values of the current anchor chain of the motor and the speed of the drive. We have developed software to determine the parameters of energy saving diagrams for large movements of the executive body of the electric DC depending on the speed torque resistance. For the considered energy saving diagrams, which provide large movement of the executive body of the electric DC, depending on the speed of the moment of resistance, it is necessary to provide the following condition – the maximum speed of the executive body of the drive must be equal to the maximum allowable speed value. We have also defined analytical dependences, allowing calculating the consumption of the electric power drive by moving its executive body, in accordance with the proposed diagrams. Realization of the developed positional control DC motor with speed-dependent torque resistance will lead to energy savings

Ключевые слова: ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ДИАГРАММА, ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН

Keywords: ENERGY SAVING DIAGRAM, EXECUTIVE BODY

В статье [1] рассмотрены три энергосберегающие диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

В данной статье рассматриваются три энергосберегающие диаграммы для больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления:

- с ограничением скорости электропривода (рисунок 1);
- с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода (рисунок 2);
- с ограничениями максимального и минимального значений тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода (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;
- φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\varphi_{\text{нач}}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\varphi_{\text{кон}}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

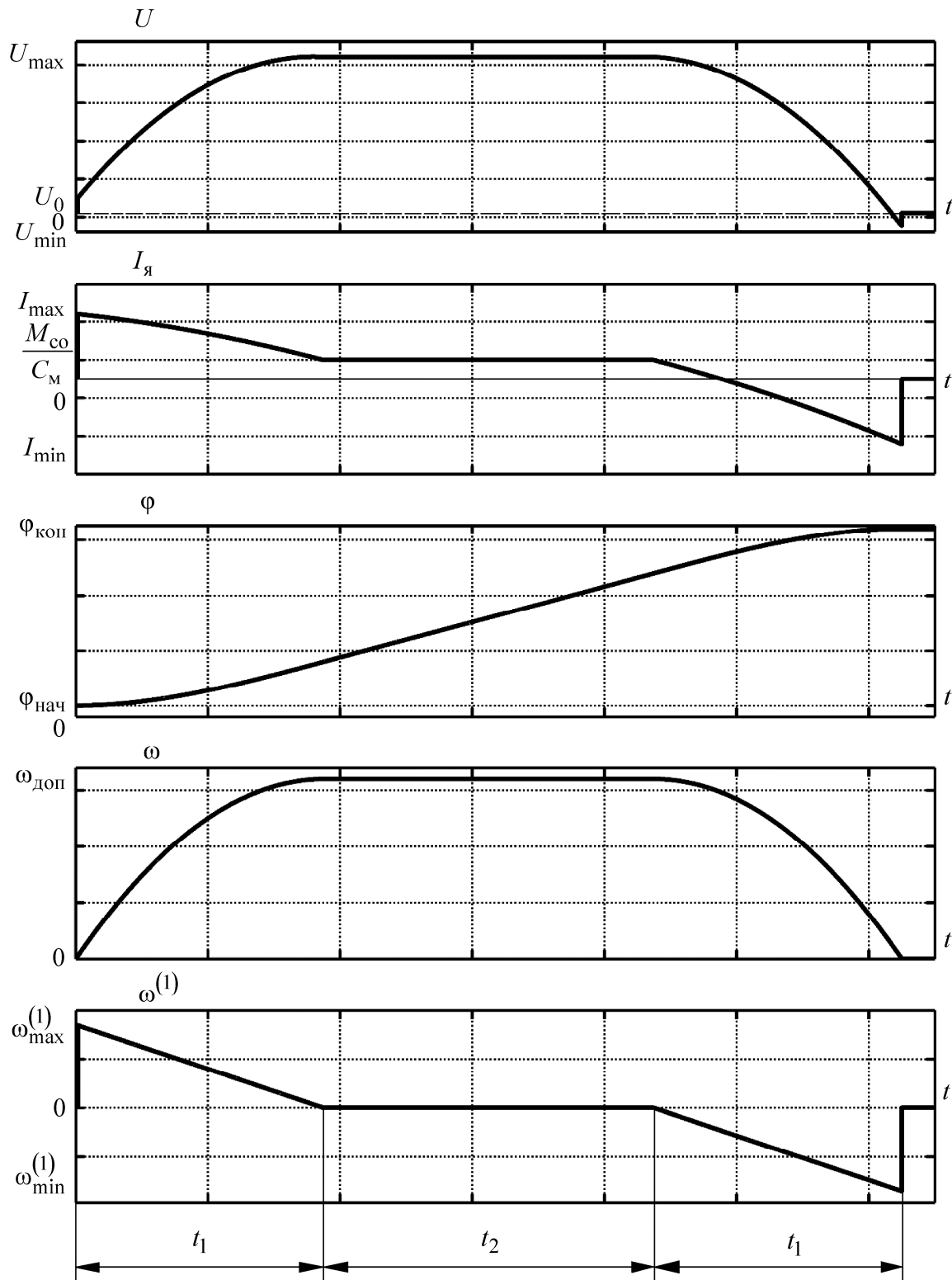


Рисунок 1 – Энергосберегающая диаграмма с ограничением скорости электропривода

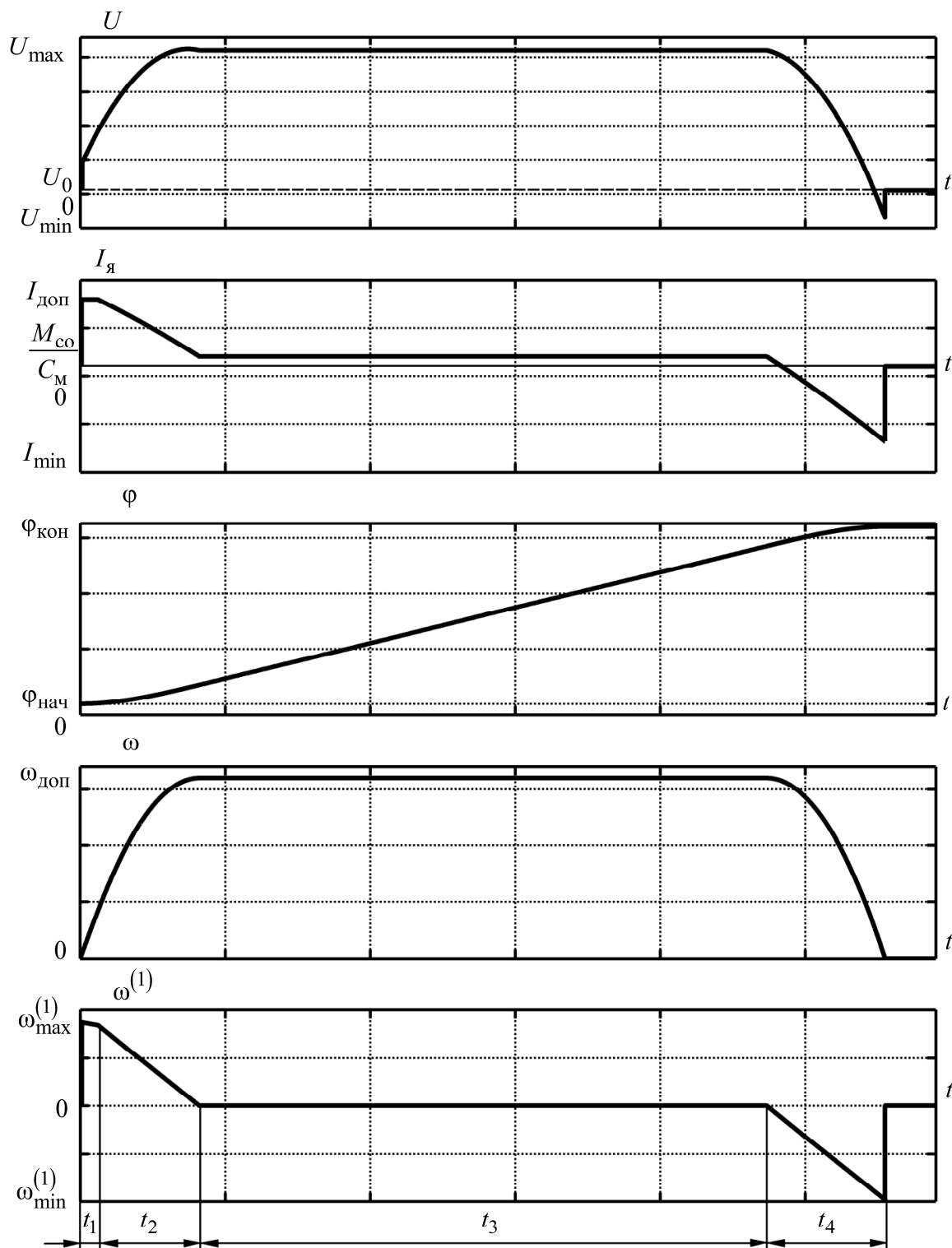


Рисунок 2 – Энергосберегающая диаграмма с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода

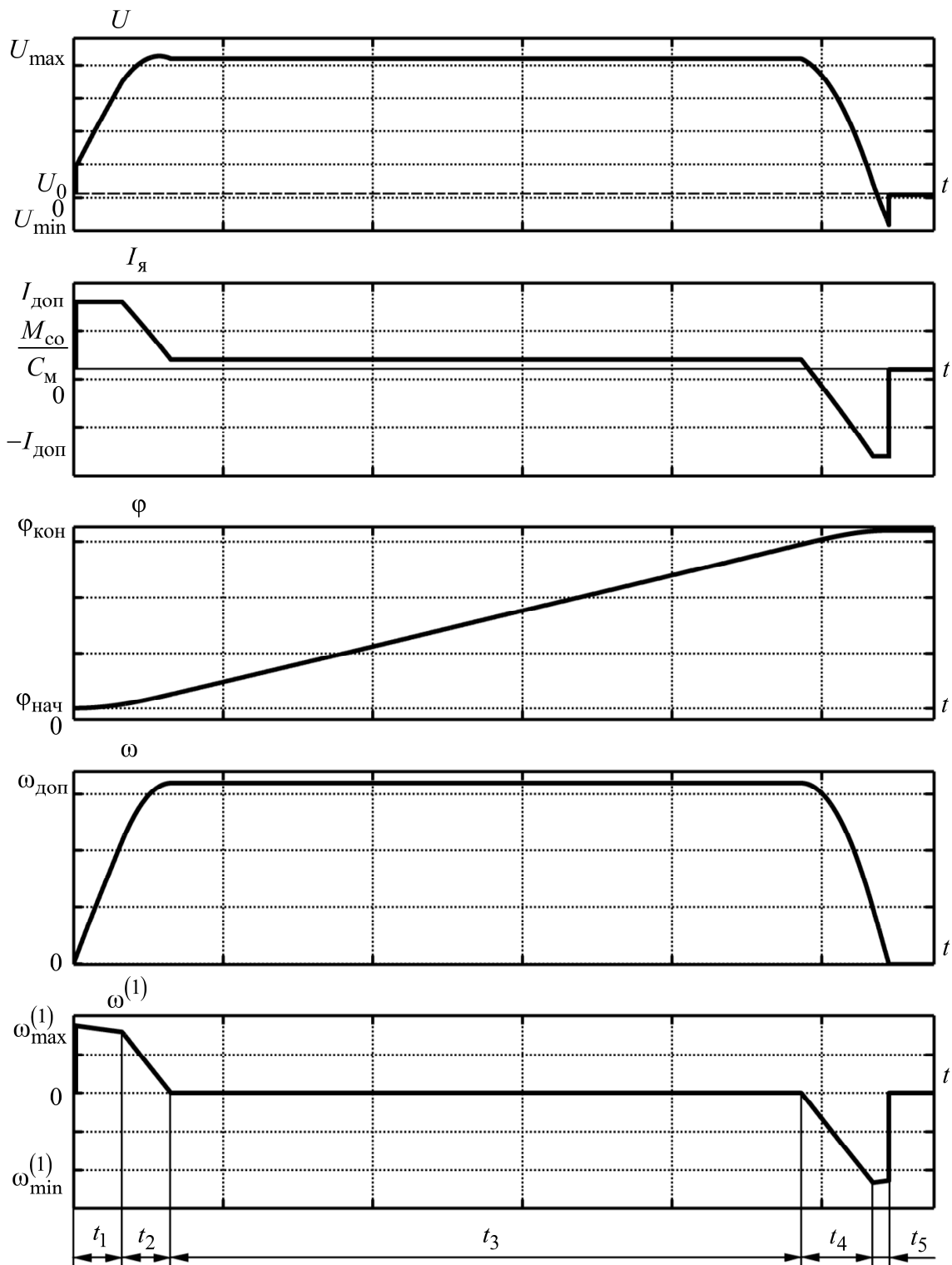


Рисунок 3 - Энергосберегающая диаграмма с ограничениями максимального и минимального значений тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода

- ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
- $\omega_{\text{доп}}$ – допустимое значение скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
- $\omega^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;
- $\omega_{\text{max}}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;
- $\omega_{\text{min}}^{(1)}$ – минимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;
- $T_{\text{ц}}$ – длительность цикла перемещения, с;
- t_1 – длительность первого этапа, с;
- t_2 – длительность второго этапа, с;
- t_3 – длительность третьего этапа, с;
- t_4 – длительность четвертого этапа, с;
- t_5 – длительность пятого этапа, с.

Для энергосберегающей диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления с ограничением скорости электропривода справедливы следующие зависимости:

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{[\omega_{\text{max}}^{(1)}]^2}{\omega_{\text{доп}}}, \quad (1)$$

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

$$\varphi_{\text{кон}} = \varphi_{\text{нач}} + \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^2}{\omega_{\text{max}}^{(1)}} + \omega_{\text{доп}} \cdot t_2, \quad (3)$$

$$t_1 = 2 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{max}}^{(1)}}, \quad (4)$$

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

Из формулы (3) определяется длительность второго этапа

$$t_2 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{max}}^{(1)}}. \quad (5)$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}} \cdot \left(\frac{4}{3} t_1 + t_2 \right) + \frac{C_e}{C_M} \cdot K_c \cdot \omega_{\text{доп}}^2 \left(\frac{16}{15} t_1 + t_2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 \cdot (2t_1 + t_2) + 2M_{\text{со}} K_c \omega_{\text{доп}} \cdot \left(\frac{4}{3} t_1 + t_2 \right) + K_c^2 \omega_{\text{доп}}^2 \cdot \left(\frac{16}{15} t_1 + t_2 \right) + \frac{4}{3} J^2 \omega_{\text{доп}} \omega_{\text{max}}^{(1)} \right\}, \quad (6)$$

где K_c – коэффициент пропорциональности между скоростью и моментом сопротивления электропривода, $\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;

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;

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

Так как $\omega_{\text{доп}} \cdot \left(\frac{4}{3} t_1 + t_2 \right) = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$, то формула (6) принимает вид

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{C_e}{C_M} \cdot K_c \omega_{доп}^2 \cdot \left(\frac{16}{15} t_1 + t_2 \right) + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 \cdot (2t_1 + t_2) + 2M_{co} K_c \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \right. \\
 & \left. + K_c^2 \omega_{доп}^2 \cdot \left(\frac{16}{15} t_1 + t_2 \right) + \frac{4}{3} J^2 \omega_{доп} \omega_{max}^{(1)} \right\}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

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

$$\omega_{min}^{(2)} = - \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J \cdot t_2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1}; \quad (8)$$

$$\omega_{доп} = \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2; \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = & \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{K_c} \cdot (t_1 + t_2) - \\
 & - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{K_c} - \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 + \\
 & + \frac{1}{3} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2^2 - \frac{1}{6} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \times \\
 & \times \frac{t_4^3}{t_2} + \omega_{доп} \cdot (t_3 + t_4). \quad (10)
 \end{aligned}$$

С учетом зависимости (8) значение угловой скорости в конце четвертого этапа равно

$$\omega_4 = \omega_{доп} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \frac{t_4^2}{t_2}. \quad (11)$$

Так как $\omega_4 = 0$, то выражение (11) принимает вид

$$\omega_{\text{доп}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} \quad (12)$$

Для нахождения длительностей этапов t_1 , t_2 , t_3 и t_4 необходимо решить систему уравнений, состоящую из уравнений (9), (10), (12) и

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4. \quad (13)$$

Электроненергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна

$$\begin{aligned} W = & C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left(t_1 - \frac{J}{K_c} + \frac{J}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) - \\ & - C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \times \\ & \times \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{5}{24} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 \right) \cdot t_2 + C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \times \\ & \times \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{3} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{2}{15} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 \right) \cdot t_2^2 + \\ & + C_e \cdot \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_M} + \frac{K_c}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}} \right) \cdot \omega_{\text{доп}} \cdot \left(t_3 + \frac{2}{3} t_4 \right) - \\ & - \frac{1}{15} \cdot C_e \cdot \frac{K_c}{J} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \omega_{\text{доп}} \cdot \frac{t_4^3}{t_2} - \\ & - \frac{1}{4} \cdot C_e \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \omega_{\text{доп}} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} + \\ & + R_{\text{я}} \cdot \left[I_{\text{доп}}^2 \cdot (t_1 + t_2) + \right. \\ & + I_{\text{доп}} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2 - 1 \right) \cdot t_2 + \\ & \left. + \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \cdot e^{-2 \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \left(\frac{2}{15} \cdot \frac{K_c^2}{J^2} \cdot t_2^2 - \frac{5}{12} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2 + \frac{1}{3} \right) \cdot t_2 + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{M_{co}}{C_M} + \frac{K_c}{C_M} \cdot \omega_{доп} \right)^2 \cdot (t_3 + t_4) - \\
 & - \left(\frac{M_{co}}{C_M} + \frac{K_c}{C_M} \cdot \omega_{доп} \right) \cdot \left(I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_4 + 1 \right) \cdot \frac{t_4^2}{t_2} + \left(I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M} \right)^2 \cdot e^{-2 \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_1} \times \\
 & \times \left[\frac{1}{20} \cdot \frac{K_c^2}{J^2} \cdot t_4^2 + \frac{1}{4} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_4 + \frac{1}{3} \right] \cdot \frac{t_4^3}{t_2^2}. \tag{14}
 \end{aligned}$$

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 и скорости электропривода идентична энергосберегающей диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления с ограничениями максимального значения тока якорной цепи электродвигателя и скорости электропривода на первом, втором, третьем и четвертых этапах. Отличие заключается в том, что

$$I_{я4} = -I_{доп}. \tag{15}$$

При этом справедлива зависимость

$$\begin{aligned}
 & (C_M I_{доп} + M_{co}) + K_c \cdot \left(\omega_{доп} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} \right) - \\
 & - (C_M I_{доп} - M_{co}) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \frac{t_4}{t_2} = 0. \tag{16}
 \end{aligned}$$

В конце пятого этапа значение угловой скорости электропривода равно

$$\omega_5 = - \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} - \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{K_c} - \omega_{доп} \right] \times$$

$$\times e^{-\frac{K_c \cdot t_5}{J}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{K_c}. \quad (17)$$

Так как $\omega_5 = 0$, то выражение (17) принимает вид

$$\left[\frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} - \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{K_c} - \omega_{\text{доп}} \right] \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_5}{J}} + \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{K_c} = 0. \quad (18)$$

Значение перемещения исполнительного органа электропривода равно

$$\begin{aligned} (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = & \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot (t_1 + t_2) - \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{K_c} \cdot t_5 - \\ & - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} + \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} - \\ & - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \cdot t_2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \cdot t_2^2 - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} - \frac{1}{6} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \times \\ & \times \frac{t_4^3}{t_2} + \omega_{\text{доп}} \cdot t_3 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_4 + \frac{J}{K_c} \cdot \omega_{\text{доп}}. \quad (19) \end{aligned}$$

Для нахождения длительностей этапов t_1 , t_2 , t_3 , t_4 и t_5 необходимо решить систему уравнений, состоящую из уравнений (9), (16), (18), (19) и

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5. \quad (20)$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна

$$\begin{aligned} W = & C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left(t_1 - \frac{J}{K_c} + \frac{J}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \right) - \\ & - C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_1}{J}} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{5}{24} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 \right) \cdot t_2 + \\
 & + C_e \cdot \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_1} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{3} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{2}{15} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot t_2 \right) \cdot t_2^2 + \\
 & + C_e \cdot \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_M} + \frac{K_c}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}} \right) \cdot \omega_{\text{доп}} \cdot \left(t_3 + \frac{2}{3} t_4 \right) - \\
 & - \frac{1}{15} \cdot C_e \cdot \frac{K_c}{J} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \omega_{\text{доп}} \cdot \frac{t_4^3}{t_2} - \\
 & - \frac{1}{4} \cdot C_e \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \omega_{\text{доп}} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} + \\
 & + C_e \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \frac{t_4^2}{t_2} - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{K_c} - \right. \\
 & \left. - \frac{J}{K_c} \cdot \omega_{\text{доп}} \right] \cdot I_{\text{доп}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_5} \right) + \\
 & + C_e \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{K_c} \cdot I_{\text{доп}} \cdot t_5 + \\
 & + R_{\text{я}} \cdot \left[I_{\text{доп}}^2 \cdot (t_1 + t_2 + t_5) + \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(\frac{2}{3} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2 - 1 \right) \cdot t_2 + \\
 & + \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right)^2 \cdot e^{-2 \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \left(\frac{2}{15} \cdot \frac{K_c^2}{J^2} \cdot t_2^2 - \frac{5}{12} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_2 + \frac{1}{3} \right) \cdot t_2 + \\
 & + \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_M} + \frac{K_c}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}} \right)^2 \cdot (t_3 + t_4) - \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_M} + \frac{K_c}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}} \right) \times \\
 & \times \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_M} \right) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \frac{K_c}{J} \cdot t_4 + 1 \right) \cdot \frac{t_4^2}{t_2} +
 \end{aligned}$$

$$+ \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{со}}}{C_{\text{м}}} \right)^2 \cdot e^{-2 \cdot \frac{K_{\text{с}}}{J} \cdot t_1} \cdot \left[\frac{1}{20} \cdot \frac{K_{\text{с}}^2}{J^2} \cdot t_2^2 + \frac{1}{4} \cdot \frac{K_{\text{с}}}{J} \cdot t_4 + \frac{1}{3} \right] \cdot \frac{t_4^3}{t_2^2}. \quad (21)$$

Для рассмотренных энергосберегающих диаграмм, обеспечивающих большие перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления, необходимо выполнение следующего условия – максимальное значение скорости исполнительного органа электропривода должно быть равно максимально допустимому значению скорости.

Выводы

Разработано математическое обеспечение для определения параметров энергосберегающих диаграмм для больших 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 перемещения.

Список литературы

1 Добробаба Ю.П. Разработка энергосберегающих диаграмм для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления/ Добробаба Ю.П., Луценко А.Ю.// Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета (Научный журнал КубГАУ) [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2014. - №10(104). – IDA [article ID]: 1041410119. – Режим доступа: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/119.pdf>.

References

1 Dobrobaba Ju.P. Razrabotka jenergoberegajushhih diagramm dlja malyh peremeshhenij ispolnitel'nogo organa jelektroprivoda postojannogo toka s zavisjashhim ot skorosti momentom soprotivlenija/ Dobrobaba Ju.P., Lucenko A.Ju.// Politematicheskij sete-voj jel-ektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universi-teta (Nauchnyj zhurnal KubGAU) [Jelektronnyj resurs]. – Krasnodar: KubGAU, 2014. - №10(104). – IDA [article ID]: 1041410119. – Rezhim dostupa: <http://ej.kubagro.ru/2014/10/pdf/119.pdf>.