

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ СРЕДНИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ
ЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА**

Ю.П. ДОБРОБАБА, Г.А. КОШКИН, В.А. МАХОВА

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2,
электронная почта: viktorya.mah@yandex.ru*

В статье представлена оптимальная по быстродействию диаграмма при средних перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока, состоящая из пяти этапов. Получены зависимости для определения, на каждом из этапов, электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода постоянного тока, осуществляет средние перемещения исполнительного органа электропривода в соответствии с типовой оптимальной по быстродействию диаграммой.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, средние перемещения исполнительного органа электропривода, электроэнергия.

В настоящее время перемещение исполнительных органов электроприводов осуществляется в соответствии с оптимальными по быстродействию диаграммами. При этом используются три вида типовых диаграмм [1, 2]:

- для малых перемещений с ограничением второй производной скорости электропривода (состоит из трех этапов);
- для средних перемещений с ограничениями по первой и второй производным скорости электропривода (состоит из пяти этапов);
- для больших перемещений с ограничениями скорости электропривода и ее первой и второй производных (состоит из семи этапов).

В данной работе предполагается определить энергетические характеристики электропривода постоянного тока при средних перемещениях его исполнительного органа.

На рисунке 1 представлена типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода, состоящая из пяти этапов.

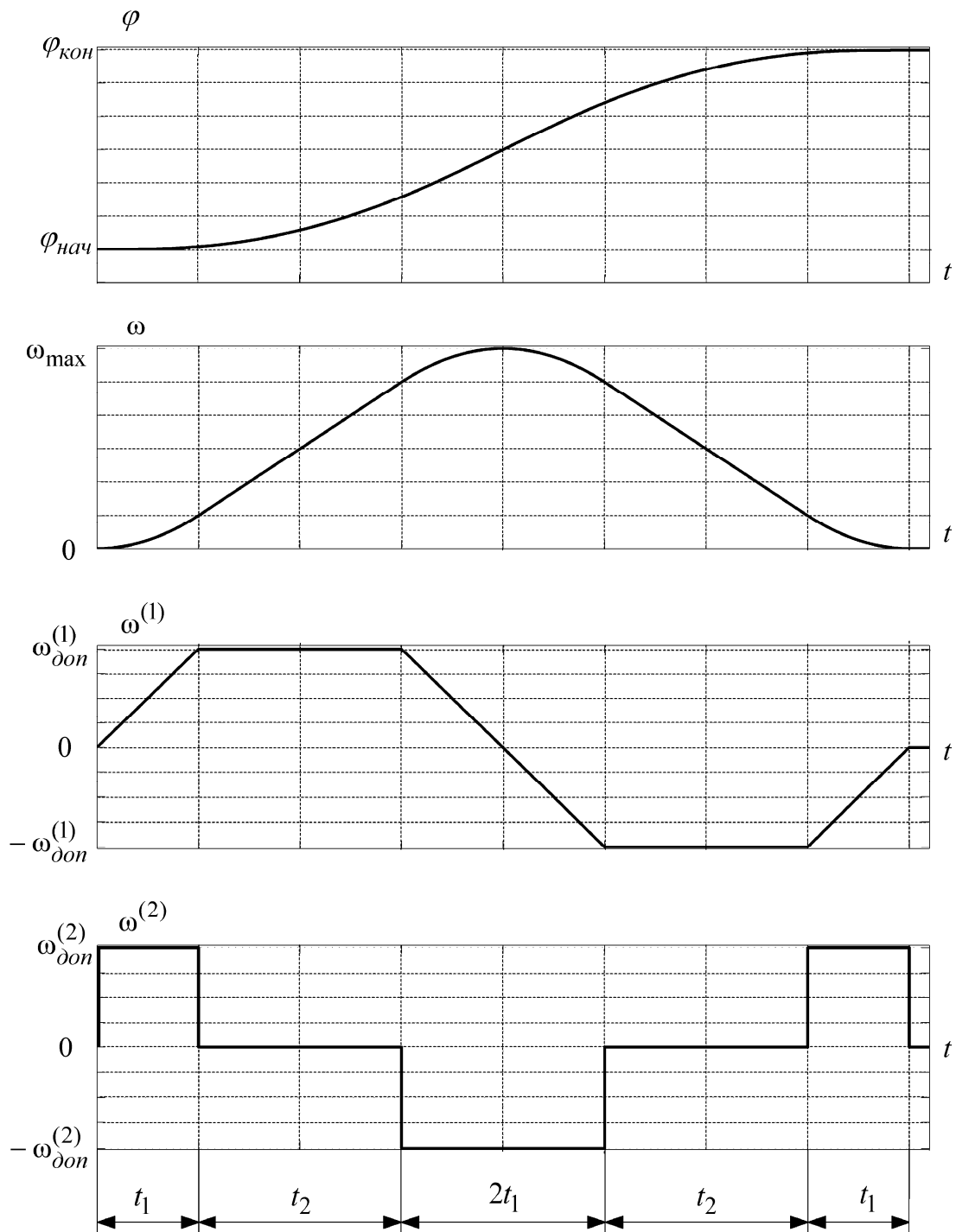


Рисунок 1 — Типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода.

На первом и пятом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{дон}^{(2)}$; на втором и четвертом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю; на третьем этапе

вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком «минус» $-\omega_{\text{дон}}^{(2)}$. Длительность первого и пятого этапов равна t_1 ; длительность второго и четвертого этапов равна t_2 ; длительность третьего этапа равна $2t_1$. На втором этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{дон}}^{(1)}$; на четвертом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком «минус» $-\omega_{\text{дон}}^{(1)}$. В момент времени $(2t_1 + t_2)$ угловая скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения ω_{max} . За время цикла $T_{\text{ц}} = 4t_1 + 2t_2$ исполнительный орган электропривода перемещается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для типовой оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, представленной на рисунке, справедливы следующие соотношения:

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}};$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{дон}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} \right]^2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}};$$

$$T_{\text{ц}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{дон}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} \right]^2} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}};$$

$$\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{дон}}^{(1)} \cdot \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{дон}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} \right]^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\left[\omega_{\text{дон}}^{(1)} \right]^2}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}.$$

Область существования типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа электропривода:

$$\varphi_{зр.1} \leq (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) \leq \varphi_{зр.2},$$

$$\text{где } \varphi_{зр.1} = 8 \cdot \frac{[\omega_{доп}^{(2)}]^4}{[\omega_{доп}^{(3)}]^3};$$

$$\varphi_{зр.2} = \omega_{доп} \cdot \left[\frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп}^{(1)}} + \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}} \right];$$

$\omega_{доп}$ – максимально допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $рад / с^2$.

Определим аналитические зависимости координат электропривода от времени при средних перемещениях его исполнительного органа в соответствии с типовой оптимальной по быстродействию диаграммой.

Этап 1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{доп}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{доп}^{(2)} \cdot t;$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \frac{1}{6} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t^3;$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} + J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t];$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{доп}^{(2)};$$

$$U(t) = \frac{1}{2} C_e \omega_{доп}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{co} + J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{доп}^{(2)},$$

где C_e – коэффициент пропорциональности между скоростью и ЭДС двигателя;

C_m – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя;

$R_я$ – сопротивление якорной цепи электродвигателя;

$L_я$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя;

J – момент инерции электропривода;

M_c – момент сопротивления электропривода.

Зависимость мощности, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени на первом этапе имеет вид

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_e}{C_m} \cdot \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left[M_{co} \cdot t^2 + J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t^3 \right] + \\ + \frac{R_я}{C_m^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + 2M_{co} J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t + J^2 \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t^2 \right\} + \\ + \frac{L_я J}{C_m^2} \cdot \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t \right].$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за первый этап

$$W_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_m} \cdot J \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^4 + \\ + \frac{R_я}{C_m^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 + \frac{R_я}{C_m^2} \cdot M_{co} \cdot J \cdot \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_я}{C_m^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 + \\ + \frac{L_я J}{C_m^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_я J^2}{C_m^2} \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.$$

Этап 2. В интервале времени $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$:

$$\omega^{(2)}(t) = 0;$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1;$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^2 + \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1);$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \frac{1}{6} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2;$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 \right];$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 \right].$$

Зависимость мощности, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени на втором этапе имеет вид

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) \right] + J\omega_{доп}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - t_1) \right] \right\} + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + 2M_{co}J\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(1)} \right]^2 \cdot t_1^2 \right\}.$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за второй этап

$$W_2 = \frac{C_e}{C_M} M_{co} \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 t_2.$$

Этап 3. В интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (3t_1 + t_2)$:

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{доп}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 - \omega_{доп}^{(2)}(t - t_1 - t_2);$$

$$\omega(t) = \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \omega_{доп}^{(2)} (t - t_1 - t_2)^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \omega_{доп}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{доп}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^3.$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{co} + J\omega_{доп}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)] \right\};$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_m} \cdot \omega_{дон}^{(2)};$$

$$U(t) = C_e \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 \right] + \\ + \frac{R_{я}}{C_m} \cdot \left\{ M_{co} + J \omega_{дон}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)] \right\} - \frac{L_{я} J}{C_m} \cdot \omega_{дон}^{(2)}.$$

Зависимость мощности, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени на третьем этапе имеет вид

$$P(t) = \frac{C_e}{C_m} \cdot \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 \right] + \right. \\ \left. + J \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^3 \right] \right\} + \\ + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + 2 M_{co} J \omega_{дон}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)] + \right. \\ \left. + J^2 \cdot \left[\omega_{дон}^{(2)} \right]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2 t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) + (t - t_1 - t_2)^2 \right] \right\} - \\ - \frac{L_{я} J}{C_m^2} \cdot \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} + J \omega_{дон}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)] \right\}.$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за третий этап

$$W_3 = \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{co} \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left(\frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) + \\ + 2 \cdot \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{дон}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 - 2 \cdot \frac{L_{я} J}{C_m^2} \cdot M_{co} \omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1.$$

Этап 4. В интервале времени $(3t_1 + t_2) \leq t \leq (3t_1 + 2t_2)$:

$$\omega^{(2)}(t) = 0;$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1;$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2);$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \\ & + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \\ & - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2. \end{aligned}$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \right];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \right].$$

Зависимость мощности, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени на четвертом этапе имеет вид

$$\begin{aligned} P(t) = & \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) \right] - \right. \\ & \left. - J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) \right] \right\} + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 - 2 M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 \right\}. \end{aligned}$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за четвертый этап

$$\begin{aligned} W_4 = & \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) - \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_2 - 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 t_2. \end{aligned}$$

Этап 5. В интервале времени $(3t_1 + 2t_2) \leq t \leq (4t_1 + 2t_2)$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\text{доп}}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2);$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) + \\ & + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) - \\ & - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3. \end{aligned}$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2)] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)};$$

$$\begin{aligned} U(t) = & C_e \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 \right] + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2)] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}. \end{aligned}$$

Зависимость мощности, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени на пятом этапе имеет вид

$$\begin{aligned} P(t) = & \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 \right]^2 + \right. \\ & + J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 \right] \right\} + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2)] + \right. \end{aligned}$$

$$+ J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + (t - 3t_1 - 2t_2)^2 \right] \Big\} + \\ + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2) \right] \right\}.$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за пятый этап

$$W_5 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^4 + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 + \\ + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \cdot \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.$$

Зависимость суммарной электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, за цикл

$$W = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot \left(4t_1 + 2t_2 \right) + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3} t_1^3 + 2t_1^2 t_2 \right).$$

Так как $\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$, то

$$W = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot \left(4t_1 + 2t_2 \right) + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3} t_1^3 + 2t_1^2 t_2 \right).$$

Так как $\left(4t_1 + 2t_2 \right) = T_{\text{ц}}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot T_{\text{ц}} +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right).$$

Так как $\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 = \omega_{доп}^{(1)}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{со} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{со}^2 \cdot T_{ц} + \\ + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(1)} \right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3} t_1 + 2 t_2 \right).$$

Первое слагаемое в зависимости суммарной электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, за цикл соответствует полезной энергии, а сумма второго и третьего слагаемых соответствует энергии тепловых потерь.

В статье рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

- коэффициент пропорциональности между скоростью и ЭДС двигателя

$$C_e = 1,25 \frac{B \cdot c}{рад};$$

- коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя

$$C_M = 1,25 B \cdot c;$$

- сопротивление якорной цепи электродвигателя $R_{я} = 5 \text{ Ом};$

- индуктивность якорной цепи $L_{я} = 0,1 \text{ Гн};$

- момент инерции электропривода $J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$

Момент сопротивления электропривода равен $M_{со} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

На угловую скорость электропривода и ее первую и вторую производные накладываются следующие ограничения:

$$-\omega_{доп} \leq \omega(t) \leq \omega_{доп};$$

$$-\omega_{доп}^{(1)} \leq \omega^{(1)}(t) \leq \omega_{доп}^{(1)};$$

$$-\omega_{доп}^{(2)} \leq \omega^{(2)}(t) \leq \omega_{доп}^{(2)},$$

где $\omega_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\text{рад}/\text{с}$.

$$\text{При этом } \omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \omega_{\text{доп}}^{(1)} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{доп}}^{(2)} = 400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}.$$

Для такого электропривода справедливы следующие граничные значения угла поворота исполнительного органа $\varphi_{\text{зр.1}} = 6,4 \text{ рад}$ и $\varphi_{\text{зр.2}} = 352 \text{ рад}$.

Типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока, приведенная на рисунке, имеет следующие параметры:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 38,4 \text{ рад}; t_1 = 0,2 \text{ с}; t_2 = 0,4 \text{ с}; T_{\text{ц}} = 1,6 \text{ с};$$

$$\omega_{\text{max}} = 48 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; W = 96 + 32 + 54 \frac{46}{75} = 182 \frac{46}{75} \text{ Дж}.$$

Полученная зависимость позволяет определить электроэнергию, потребляемую якорной цепью электропривода постоянного тока, который осуществляет средние перемещения исполнительного органа электропривода в соответствии с типовой оптимальной по быстродействию диаграммой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. Л. : Изд-во «Энергия», 1971. 144 с.
2. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М. : Изд-во «Энергия», 1976. 488 с.

REFERENCES

1. Petrov YU.P. Optimalnoe upravlenie elektricheskim privodom s uchetom ogranicheniy po nagrevu. L. : Izd-vo «Energiya», 1971. 144 s.
2. Sokolov M.M. Avtomatizirovannyu elektroprivod bshchepromyshlennykh mekhanizmov. M. : Izd-vo «Energiya», 1976. 488 s.

*DETERMINATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF ELECTRIC
DRIVES DIRECT CURRENT WITH AVERAGE DISPLACEMENTS
OF ITS EXECUTIVE BODY*

YU.P. DOBROBABA, G.A. KOSHKIN, V.A. MAKHOVA

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072,
e-mail: viktorya.mah@yandex.ru*

The article presents the optimum performance chart with average displacements of the Executive body of DC electric drive, consisting of five stages. Obtained dependences for determination at each stage of the electricity consumed by the anchor chain of the electric drive of a direct current, provides the average movement of electric drives Executive authority in accordance with the model of the optimal diagram.

Key words: automatic control system, DC drive, the average movement of electric drives Executive authority, electricity, electric drive.