

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ БОЛЬШИХ
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*

Для достижения максимально возможной производительности промышленных механизмов перемещение их исполнительных органов осуществляется в соответствии с типовыми оптимальными по быстродействию диаграммами. В статье представлена оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока, состоящая из семи этапов. Получены зависимости, позволяющие определить электроэнергию, потребляемой якорной цепью электропривода постоянного тока, осуществляющего большие перемещения исполнительного органа электропривода в соответствии с типовой оптимальной по быстродействию диаграммой, на каждом из этапов.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, большие 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 больших перемещениях его исполнительного органа.

На рисунке представлена типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода, состоящая из семи этапов. На первом и седьмом этапах вторая производная

угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{дон}^{(2)}$; на втором, четвертом и шестом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю; на третьем и пятом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком «минус» $-\omega_{дон}^{(2)}$. Длительность первого, третьего, пятого и седьмого этапов равна t_1 ; длительность второго и шестого этапов равна t_2 ; длительность четвертого этапа равна t_3 . На втором этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{дон}^{(1)}$. На четвертом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю; на шестом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком «минус» $-\omega_{дон}^{(1)}$. На четвертом этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{дон}$. За время цикла $T_{ц} = 4t_1 + 2t_2 + t_3$ исполнительный орган электропривода перемещается от начального значения угла поворота $\varphi_{нач}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{кон}$.

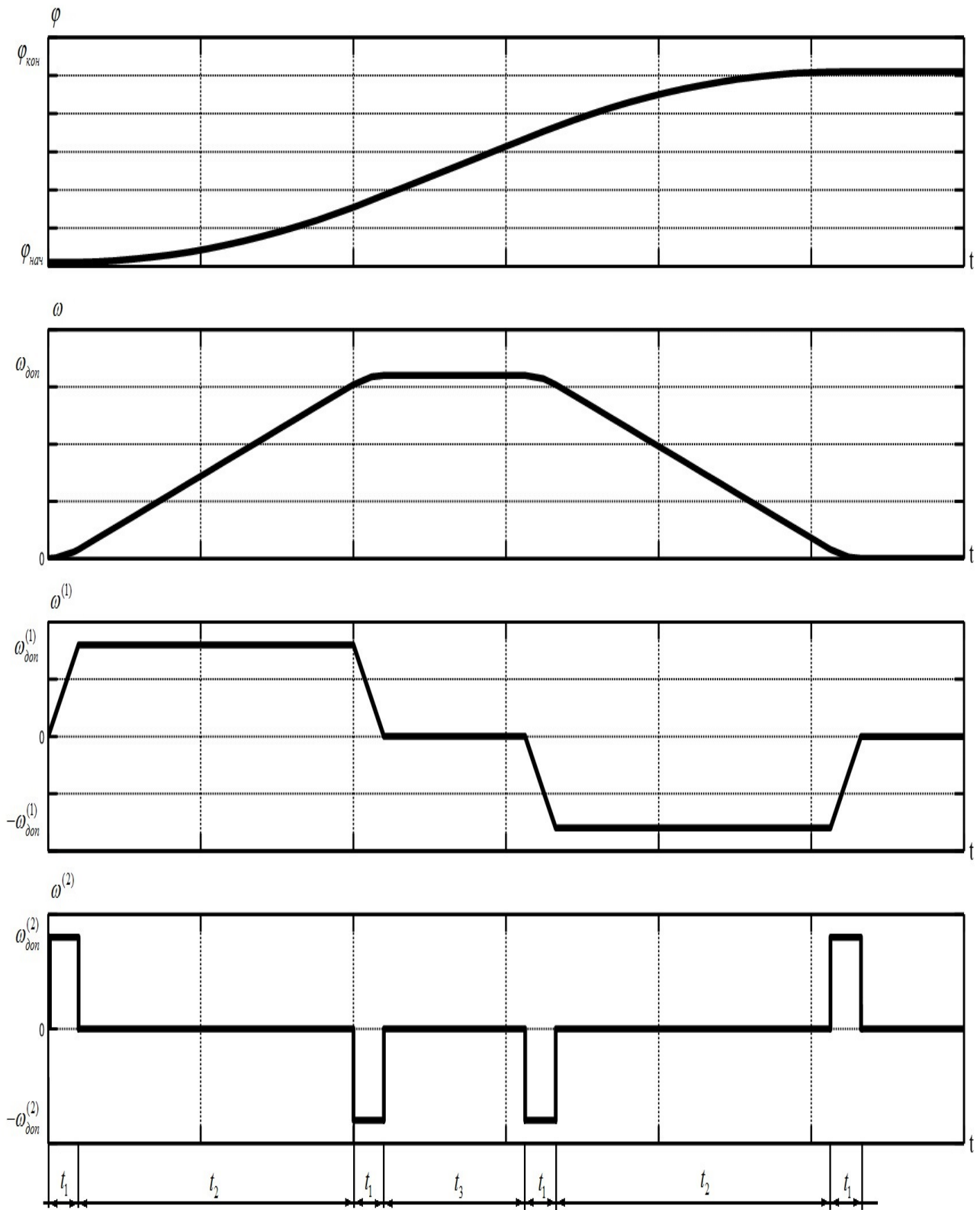


Рисунок 1 — Типовая оптимальная по быстрдействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода

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

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

$$t_2 = \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп}^{(1)}} - \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$t_3 = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} - \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп}^{(1)}} - \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$T_{ц} = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} + \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп}^{(1)}} + \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}}.$$

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

$$\varphi_{гр.2} \leq (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}), \text{ где}$$

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

Определим аналитические зависимости координат электропривода от времени при больших 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_{co} – момент сопротивления электропривода.

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

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

$$+ \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + 2M_{co} J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t + J^2 \cdot [\omega_{доп}^{(2)}]^2 \cdot t^2 \right\} +$$

$$+ \frac{L_{я} J}{C_m^2} \cdot \omega_{доп}^{(2)} \cdot [M_{co} + J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t].$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за первый этап

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

$$\begin{aligned}
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} \cdot J \cdot \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 + \\
 & + \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

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

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

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за второй этап

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

$$+\frac{R_{я}}{C_{м}^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{R_{я}}{C_{м}^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{R_{я}}{C_{м}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 t_2.$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 & + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + 2M_{co}J\omega_{дон}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)] + \right. \\
 & \quad \left. + J^2 \cdot [\omega_{дон}^{(2)}]^2 \cdot [t_1^2 - 2t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) + (t - t_1 - t_2)^2] \right\} - \\
 & \quad - \frac{L_{я}J}{C_m^2} \cdot \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} + J\omega_{дон}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)] \right\}.
 \end{aligned}$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за третий этап

$$\begin{aligned}
 W_3 = & \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{co}\omega_{дон}^{(2)} \cdot \left(\frac{5}{6}t_1^3 + t_1^2t_2 \right) + \\
 & + \frac{C_e}{C_m} \cdot J \cdot [\omega_{дон}^{(2)}]^2 \cdot \left(\frac{3}{8}t_1^4 + \frac{1}{2}t_1^3t_2 \right) + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co}J \omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{дон}^{(2)}]^2 \cdot t_1^3 - \\
 & - \frac{L_{я}J}{C_m^2} \cdot M_{co}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я}J^2}{C_m^2} \cdot [\omega_{дон}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

Этап 4. В интервале времени $(2t_1 + t_2) \leq t \leq (2t_1 + t_2 + t_3)$:

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

$$\omega^{(1)}(t) = 0;$$

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

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) = & \varphi_{нач} + \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2 \right) + \\
 & + \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2);
 \end{aligned}$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_m} \cdot M_{co};$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) + \frac{R_{я}}{C_m} \cdot M_{co}.$$

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

$$P(t) = \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{co} \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co}^2.$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за четвертый этап

$$W_4 = \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{co} \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot t_3 + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_3.$$

Этап 5. В интервале времени $(2t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (3t_1 + t_2 + t_3)$:

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{доп}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3);$$

$$\omega(t) = \omega_{доп}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{1}{2} \omega_{доп}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \\ + \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \\ - \frac{1}{6} \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3; \end{aligned}$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_m} \cdot \left[M_{co} - J \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) \right];$$

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

$$U(t) = C_e \omega_{don}^{(2)} \cdot \left[(t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + \\ + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} - J \omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) \right] - \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{don}^{(2)}.$$

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

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{don}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[(t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] - \right. \\ \left. - J \omega_{don}^{(2)} \cdot \left[(t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] \right\} + \\ + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 - 2 M_{co} J \omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) + \right. \\ \left. + J^2 \cdot \left[\omega_{don}^{(2)} \right]^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 \right\} - \\ - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot \omega_{don}^{(2)} \cdot \left[M_{co} - J \omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) \right].$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за пятый этап

$$W_5 = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{5}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{don}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right) + \\ + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{don}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 - \\ - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \cdot \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{don}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.$$

Этап 6. В интервале времени $(3t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (3t_1 + 2t_2 + t_3)$:

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

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

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3);$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \\ & + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) - \\ & - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2; \end{aligned}$$

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$\begin{aligned} U(t) = & C_e \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) \right] + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \right]. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} P(t) = & \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) \right] - \right. \\ & - J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) \right] \left. \right\} + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 - 2 M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 \right\}. \end{aligned}$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за шестой этап

$$\begin{aligned} W_6 = & \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) - \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_2 - 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 t_2. \end{aligned}$$

Этап 7. В интервале времени $(3t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (4t_1 + 2t_2 + t_3)$:

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3);$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3; \end{aligned}$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{сo}} + J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)] \right\};$$

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

$$\begin{aligned} U(t) = C_e \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{сo}} + J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} P(t) = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{сo}} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \right. \\ + J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \\ \left. \left. - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] \right\} + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{сo}}^2 + 2M_{\text{сo}} J \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)] \right\} + \end{aligned}$$

$$+J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \\ + \frac{L_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{сo}} + J \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) \right] \right\}.$$

Энергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за седьмой этап

$$W_7 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{сo}} \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^4 + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{сo}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{сo}} J \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 + \\ + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{сo}} \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.$$

Зависимость суммарной электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, за цикл

$$W = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{сo}} \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{сo}}^2 \cdot \left(4t_1 + 2t_2 + t_3 \right) + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3} t_1^3 + 2t_1^2 t_2 \right).$$

Так как $\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$, то

$$W = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{сo}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{сo}}^2 \cdot \left(4t_1 + 2t_2 + t_3 \right) + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{дон}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3} t_1^3 + 2t_1^2 t_2 \right).$$

Так как $\left(4t_1 + 2t_2 + t_3 \right) = T_{\text{ц}}$, то

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

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

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

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

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

$$C_e = 1,25 \frac{B \cdot c}{\text{рад}};$$

- коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя

$$C_{\text{м}} = 1,25 B \cdot c;$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Для такого электропривода справедливо следующие граничное значение угла поворота исполнительного органа $\varphi_{\text{зр.2}} = 352 \text{ рад}$.

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

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 500 \text{ рад}; \quad t_1 = 0,2 \text{ с}; \quad t_2 = 1,8 \text{ с}; \quad t_3 = 0,925 \text{ с};$$

$$T_{\text{ц}} = 5,325 \text{ с};$$

$$W = 1250 + 106,5 + 197 \frac{73}{75} = 1554 \frac{71}{150} \text{ Дж}.$$

Полученная зависимость позволяет определить электроэнергию, потребляемую якорной цепью электропривода постоянного тока, который осуществляет большие 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. Avtomatizirovannyy elektroprivod obshchepromyshlennykh mekhanizmov. M. : Izd-vo «Energiya», 1976. 488 s.

*DETERMINATION OF ENERGY CHARACTERISTICS OF ELECTRIC DRIVES
DIRECT CURRENT WITH LARGE 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*

To achieve the maximum possible performance of industrial installations move their Executive bodies shall be in accordance with the model the optimum performance diagrams. The article presents the optimum diagramme on speed for large movements of the Executive body of DC electric drive, consisting of seven stages. The dependences, allowing to determine the electricity consumed in the anchor chain of the electric drive of a direct current, carrying large movement of electric drives Executive authority in accordance with the typical optimum speed diagram at each stage.

Key words: DC drive, large movement of electric drives Executive authority, electricity.