УДК 62

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ

♦♦♦♦♦

RESEARCH OF ENERGY CHARACTERISTICS OF SOFT WARE CONTROLLED OPTIMUM IN TERMS OF SPEED ELECTRIC ACTUATORS

Добробаба Юрий Петрович
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет

Dobrobaba Yury Petrovich
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor of Department of Power Supply Industrial Enter Prises,
Kuban State Technological University

Сальников Кирилл Игоревич
студент,
Кубанский государственный технологический университет

Salnikov Kirill Igorevich
Student,
Kuban State Technological University

Бондарев Михаил Николаевич
студент,
Кубанский государственный технологический университет

Bondarev Mikhail Nikolaevich
Student,
Kuban State Technological University

Аннотация. Исследованы энергетические характеристики программно-управляемых оптимальных по быстродействию электроприводов. Диаграмма состоит из семи этапов. Выявлена зависимость потребляемой электроприводом энергии от второй производной угловой скорости.

Annotation. The energy characteristics of software controlled optimum in terms of speed electric actuators. The diagram has seven stages. The dependence of the energy consumed by the electric drive on the second derivative of the angular velocity is revealed.

Ключевые слова: энергетические характеристики, программно-управляемых, второй производной угловой скорости, семиэтапная диаграмма.

Keywords: energy characteristics, software controlled, second derivative of the angular velocity, seven-stage diagram.

В монографии [1] подробно проанализированы оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электроприводов:

– для малых перемещений, состоящей из 3 этапов;
– для средних перемещений, состоящей из 5 этапов;
– для больших перемещений, состоящей из 7 этапов.

При этом рассматривались только механические координаты.

В данной работе проводится исследование энергетических характеристик программно-управляемых оптимальных по быстродействию электроприводов с целью выявить зависимость потребляемой электроприводом энергии от второй производной угловой скорости.

Для больших перемещений существуют такие значения перемещений, которые постоянны для всех диаграмм при различных значениях второй производной угловой скорости. Предлагается провести исследования для больших перемещений электропривода.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода (механические координаты). На рисунке приняты следующие обозначения:

φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;

ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

$\omega^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;

$\omega^{(2)}$– вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$;

t – время, с;

$\varphi_{\text{нач}}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

$\varphi_{\text{кон}}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

$\omega_{\text{доп}}$ – допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

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

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

t_1 – длительность первого, третьего, пятого и седьмого этапов;

t_2 – длительность второго и шестого этапов;

t_3 – длительность четвёртого этапа.

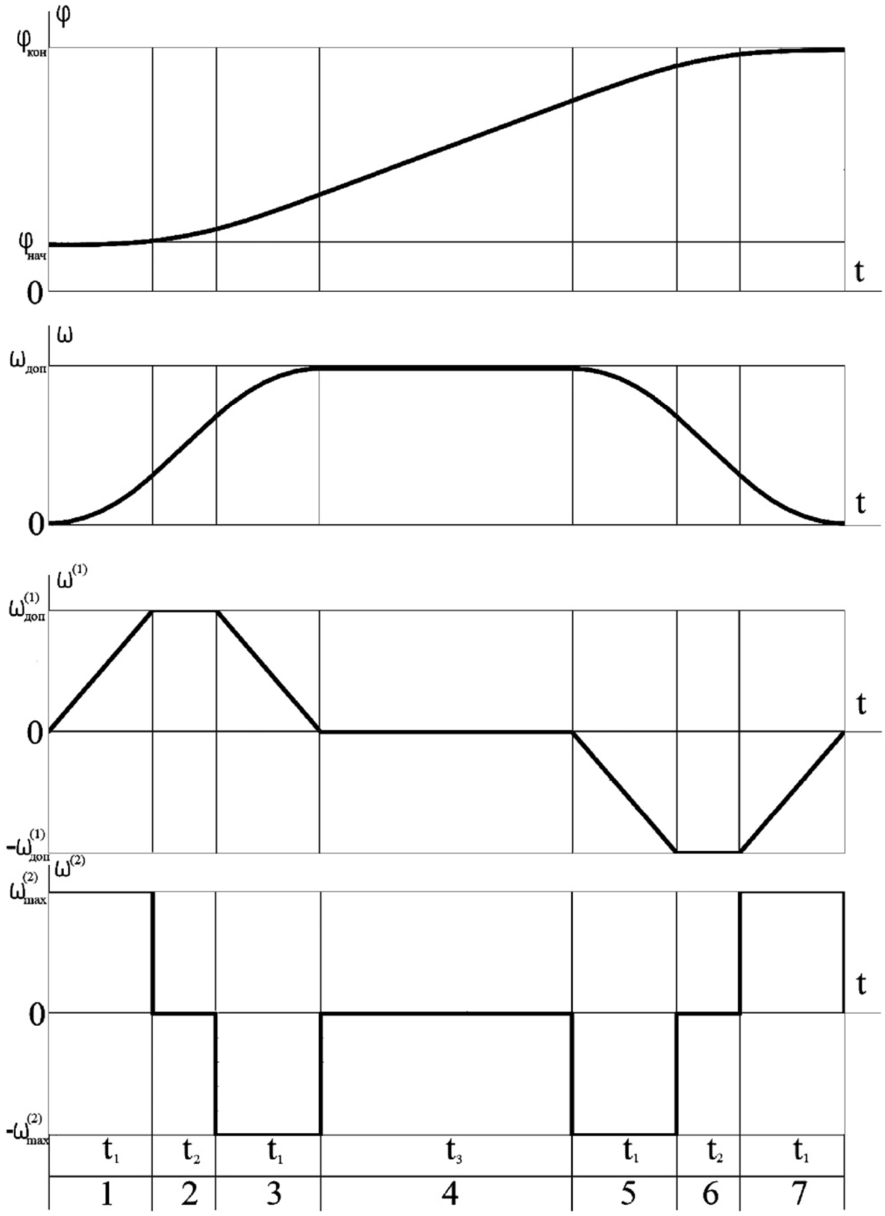

Рисунок 1 – Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода (механические координаты)

На рисунке 2 представлены оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода (электрические координаты). На рисунке приняты следующие обозначения:

U – напряжение, приложенное к якорной цепи электропривода, В;

$\mathrm{I}_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электропривода, А;

$\mathrm{U}_{\text{доп}}$ – допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электропривода, В;

$\mathrm{I}_{\text{доп}}$ – допустимое значениетока якорной цепи электропривода, А;

$\mathrm{C}_{\text{М}}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя, В·с;

M_{CO} – момент сопротивления электропривода, Н·м;

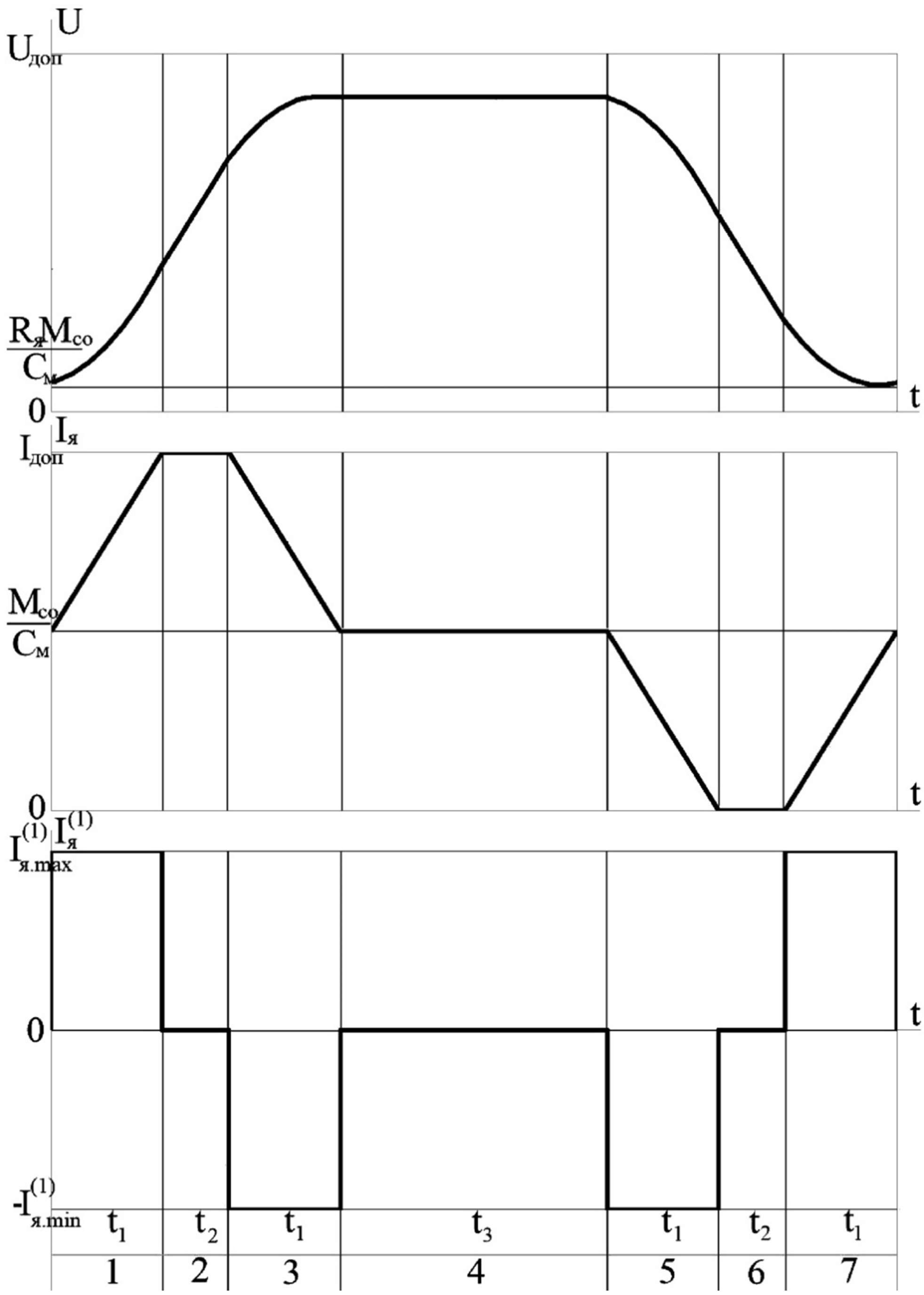

Рисунок 2 – Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода (электрические координаты)

Для данного электропривода справедливо соотношение

$$\omega_{доп}^{(1)} = \frac{C_M \cdot I_{доп} - M_{CO}}{J}.$$

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

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

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

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

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

$$I_я(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot t\right];$$

$$I_я^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)};$$

$$U(t) = \frac{1}{2}C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{R_я}{C_M} \cdot \left[M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot t\right] + \frac{L_я J}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)};$$

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left[M_{CO} \cdot t^2 + J\omega_{max}^{(2)} \cdot t^3\right] + \frac{R_я}{C_M^2} \times$$

$$\times \left\{M_{CO}^2 + 2M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t^2\right\} + \frac{L_я J}{C_M^2} \cdot \omega_{max}^{(2)} \left[M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot t\right];$$

$$W_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^4 + \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 +$$

$$+ \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_я}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^3 + \frac{L_я J}{C_M^2} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_я J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^2.$$

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

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

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

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

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

$$I_я(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1\right];$$

$$I_я^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1)\right] + \frac{R_я}{C_M} \cdot \left[M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1\right];$$

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{M_{CO} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1)\right] + J\omega_{max}^{(2)} \times\right.$$

$$\left.\times \left[\frac{1}{2}t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - t_1)\right]\right\} + \frac{R_я}{C_M^2} \cdot \left\{M_{CO}^2 + 2M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^2\right\};$$

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

$$+ \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{R_я}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^2 t_2.$$

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

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

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

$$\omega(t) = \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) + \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2}\omega_{max}^{(2)} \times (t - t_1 - t_2)^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2\right) + \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) \times$$
$$\times (t - t_1 - t_2) + \frac{1}{2}\omega_{max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6}\omega_{max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^3;$$

$$I_я(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)]\right\};$$

$$I_я^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)};$$

$$U(t) = C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) + t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^2\right] +$$
$$+ \frac{R_я}{C_M} \cdot \left\{M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)]\right\} - \frac{L_яJ}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)};$$

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{M_{CO} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) + t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) -\right.\right.$$
$$\left.- \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^2\right] + J\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^3 + t_1^2t_2\right) + \left(\frac{1}{2}t_1^2 - t_1t_2\right) \times\right.$$
$$\left.\left.\times (t - t_1 - t_2) - \frac{3}{2}t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^3\right\} +\right.$$
$$+ \frac{R_я}{C_M^2} \cdot \left\{M_{CO}^2 + 2M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)] + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \times\right.$$
$$\left.\times [t_1^2 - 2t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) + (t - t_1 - t_2)^2]\right\} - \frac{L_яJ}{C_M^2} \cdot \omega_{max}^{(2)} \times$$
$$\times \left\{M_{CO} + J\omega_{max}^{(2)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)]\right\};$$

$$W_3 = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{5}{6}t_1^3 + t_1^2t_2\right) + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot \left(\frac{3}{8}t_1^4 + \frac{1}{2}t_1^2t_2\right) +$$
$$+ \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 + \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_я}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^3 -$$
$$- \frac{L_яJ}{C_M^2} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_яJ^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^2.$$

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

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

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

$$\omega(t) = \omega_{max}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1t_2);$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2\right) + \omega_{max}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1t_2) \times (t - 2t_1 - t_2);$$

$$I_я(t) = \frac{1}{C_M} \cdot M_{CO};$$

$$I_я^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1t_2) + \frac{R_я}{C_M} \cdot M_{CO};$$

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1t_2) + \frac{R_я}{C_M} \cdot M_{CO}^2;$$

$$W_4 = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot (t_1^2t_3 + t_1t_2t_3) + \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_3.$$

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

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

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

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

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3\right) +$$

$$+\omega_{max}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{6}\omega_{max}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3;$$

$$I_я(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{CO} - J\omega_{max}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)\right];$$

$$I_я^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)};$$

$$U(t) = C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[(t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2\right] +$$

$$+\frac{R_я}{C_M} \cdot \left[M_{CO} - J\omega_{max}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)\right] - \frac{L_я J}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)};$$

$$P(t) = C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{M_{CO} \cdot \left[(t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2\right] -\right.$$

$$\left.-J\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[(t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3\right]\right\} +$$

$$+\frac{R_я}{C_M^2}\left\{M_{CO}^2 - 2M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \times\right.$$

$$\left.\times (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2\right\} - \frac{L_я J}{C_M^2} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left[M_{CO} - J\omega_{max}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)\right];$$

$$W_5 = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{5}{6}t_1^3 + t_1^2 t_2\right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot \left(\frac{3}{8}t_1^4 + \frac{1}{2}t_1^3 t_2\right) +$$

$$+\frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 - \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_я}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^3 -$$

$$-\frac{L_я J}{C_M^2} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_я J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^2.$$

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

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

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

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

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3\right) +$$

$$+\omega_{max}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 \times (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2;$$

$$I_я(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{CO} - J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1\right];$$

$$I_я^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 t_2\right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)\right] + \frac{R_я}{C_M} \cdot \left[M_{CO} - J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1\right];$$

$$P(t) = C_e\omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{M_{CO} \cdot \left[\frac{1}{2}(t_1^2 + t_1 t_2) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)\right] -\right.$$

$$\left.-J\omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^3 + t_1^2 t_2\right) - t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)\right]\right\} +$$

$$+\frac{R_я}{C_M^2}\left\{M_{CO}^2 - 2M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^2\right\};$$

$$W_6 = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO}\omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 {t_2}^2\right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \times$$

$$\times \left(\frac{1}{2}t_1^3 t_2 + \frac{1}{2}t_1^2 {t_2}^2\right) + \frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_2 - 2\frac{R_я}{C_M^2} \cdot M_{CO}J\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{R_я}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)}\right]^2 \cdot t_1^2 t_2.$$

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

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

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

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

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega^{(2)}_{max} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3\right) +$$

$$+\frac{1}{2}\omega^{(2)}_{max} \cdot {t_1}^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2}\omega^{(2)}_{max} \cdot t_1 \times$$

$$\times (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6}\omega^{(2)}_{max} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3;$$

$$I_я(t) = \frac{1}{C_М} \cdot \left\{M_{CO} - J\omega^{(2)}_{max} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)]\right\};$$

$$I^{(1)}_я(t) = \frac{J}{C_М} \cdot \omega^{(2)}_{max};$$

$$U(t) = C_e\omega^{(2)}_{max} \cdot \left[\frac{1}{2}{t_1}^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2}(t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2\right] +$$

$$+\frac{R_я}{C_М} \cdot \left\{M_{CO} - J\omega^{(2)}_{max} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)]\right\} - \frac{L_я J}{C_М} \cdot \omega^{(2)}_{max};$$

$$P(t) = C_e\omega^{(2)}_{max} \cdot \left\{M_{CO} \cdot \left[\frac{1}{2}{t_1}^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) +\right.\right.$$

$$\left.\left.+\frac{1}{2}(t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2\right] + \frac{R_я}{C_М^2}\right\{M_{CO}^2 + 2M_{CO}J\omega^{(2)}_{max} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)] +$$

$$+J^2 \cdot \left[\omega^{(2)}_{max}\right]^2 \cdot \left[{t_1}^2 - 2t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2\right]\} + \frac{L_я J}{C_М^2} \cdot \omega^{(2)}_{max} \cdot \{M_{CO} +$$

$$\left.+J\omega^{(2)}_{max} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)]\right\};$$

$$W_7 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_М} \cdot M_{CO}\omega^{(2)}_{max} \cdot t_1^3 - \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_М} \cdot J \cdot \left[\omega^{(2)}_{max}\right]^2 \cdot t_1^4 + \frac{R_я}{C_М^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 -$$

$$-\frac{R_я}{C_М^2} \cdot M_{CO}J\omega^{(2)}_{max} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_я}{C_М^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega^{(2)}_{max}\right]^2 \cdot t_1^3 + \frac{L_я J}{C_М^2} \cdot M_{CO}J\omega^{(2)}_{max} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_я J^2}{C_М^2} \cdot \left[\omega^{(2)}_{max}\right]^2 \cdot t_1^2.$$

Электроэнергия, потреблённая якорной цепью электропривода за цикл:

$$W = \frac{C_e}{C_М} \cdot M_{CO}\omega^{(2)}_{max} \cdot (2t_1^2 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) +$$

$$+\frac{R_я}{C_М^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot (4t_1 + 2t_1 + t_3) + \frac{R_я}{C_М^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega^{(2)}_{max}\right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3}t_1^3 + 2t_1^2 t_2\right).$$

Так как $\omega^{(2)}_{max} \cdot (2t_1^2 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) = (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ и

$(4t_1 + 2t_1 + t_3) = T_ц$, то

$$W = \frac{C_e}{C_М} \cdot M_{CO}\omega^{(2)}_{max} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_я}{C_М^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot T_ц + \frac{R_я}{C_М^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega^{(2)}_{max}\right]^2 \cdot \left(\frac{4}{3}t_1^3 + 2t_1^2 t_2\right),$$

где $T_ц$ – время цикла, с.

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

$$C_e = 1{,}25\ \frac{В \cdot с}{рад};\ C_М = 1{,}25\ В \cdot с;\ R_я = 5\ Ом;\ L_я = 0{,}1\ Гн;\ J = 0{,}05\ кг \cdot м^2,$$

где C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью электродвигателя и его ЭДС, $\frac{В \cdot с}{рад}$;

$R_я$ – активное сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;

$L_я$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн;

J – момент инерции электропривода, $кг \cdot м^2$;

На контролируемые координаты электропривода наложены ограничения:

$$U_{доп} = 250 \text{ В};\ I_{доп} = 8 \text{ А};\ \omega_{доп} = 160\ \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Момент сопротивления равен $M_{CO} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

При этом первая производная угловой скорости электродвигателя равна

$$\omega_{доп}^{(1)} = 100\ \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

В работе выполнен численный эксперимент, результаты которого приведены в таблице 1. При этом перемещение исполнительного органа имело постоянное значение $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 800$ рад.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента

$\omega_{max}^{(2)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	t_1, с	t_2, с	t_3, с	$T_ц$, с	$\varphi_{гр.2}$, рад	Q_1, Дж	W_1, Дж
62,5	1,6	0	1,8	8,2	512	$826\frac{2}{3}$	$4826\frac{2}{3}$
80	1,25	0,35	2,15	7,85	456	$817\frac{1}{3}$	$4817\frac{1}{3}$
100	1	0,6	2,4	7,6	416	$810\frac{2}{3}$	$4810\frac{2}{3}$
125	0,8	0,8	2,6	7,4	384	$805\frac{1}{3}$	$4805\frac{1}{3}$
160	0,625	0,975	2,775	7,225	356	$800\frac{2}{3}$	$4800\frac{2}{3}$
200	0,5	1,1	2,9	7,1	336	$797\frac{1}{3}$	$4797\frac{1}{3}$
250	0,4	1,2	3,0	7,0	320	$794\frac{2}{3}$	$4794\frac{2}{3}$
320	0,3125	1,2875	3,0875	6,9125	306	$792\frac{1}{3}$	$4792\frac{1}{3}$
400	0,25	1,35	3,15	6,85	296	$790\frac{2}{3}$	$4790\frac{2}{3}$
500	0,2	1,4	3,2	6,8	288	$789\frac{1}{3}$	$4789\frac{1}{3}$
625	0,16	1,44	3,24	6,76	281,6	$788\frac{4}{15}$	$4788\frac{4}{15}$
800	0,125	1,475	3,275	6,725	276	$787\frac{1}{3}$	$4817\frac{1}{3}$
1000	0,1	1,5	3,3	6,7	272	$786\frac{2}{3}$	$4786\frac{2}{3}$

Выводы

Анализ полученных результатов показывает, что при увеличении второй производной угловой скорости исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода, уменьшается потребляемая электроэнергия.

Литература

1. Добробаба Ю.П., Хорцев А.Л. Особо точный позиционный электропривод постоянного тока: монография. – Краснодар : Изд-во ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2014. – 104 с.

References

1. Dobrobaba Yu.P., Khortsev A.L. Particularly accurate positional direct current electric drive: monograph. – Krasnodar : Publishing house of FGBOU VO «KubGTU», 2014. – 104 p.