

*ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕЦИЗИОННОГО ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА*

**Ю.П. ДОБРОБАБА, Г.А. КОШКИН, В.П. СИНЮК**

*Кубанский государственный технологический университет,  
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;  
электронная почта: VITALI771@yandex.ru*

В статье представлена оптимальная по быстродействию диаграмма при малых перемещениях исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока, состоящая из шести этапов. Определены аналитические зависимости координат электропривода на каждом этапе перемещения. Получена аналитическая зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

**Ключевые слова:** прецизионный электропривод, малые перемещения исполнительного органа электропривода, электроэнергия.

Система автоматического регулирования (САР) перемещения исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока представима системой дифференциальных уравнений четвертого порядка [1]. Ранее в статье [2] разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электроприводов переменного тока (силовая часть которых описывается системой дифференциальных уравнений четвертого порядка). Предлагается использовать эту диаграмму для прецизионных позиционных электроприводов постоянного тока.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока с ограничением третьей производной скорости. На первом, третьем и пятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению  $\omega_{\text{доп}}^{(3)}$ ; на втором, четвертом и шестом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус  $-\omega_{\text{доп}}^{(3)}$ . Длительность первого,

третьего, четвертого и шестого этапов равна  $t_1$ ; длительность второго и пятого этапов равна  $2t_1$ . В моменты времени  $t_1$  и  $7t_1$  вторая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}^{(2)}$ ; в моменты времени  $3t_1$  и  $5t_1$  вторая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус  $-\omega_{\max}^{(2)}$ . В момент времени  $2t_1$  первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}^{(1)}$ ; в моменты времени  $6t_1$  первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус  $-\omega_{\max}^{(1)}$ . В момент времени  $4t_1$  скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}$ . Угол поворота (перемещение) увеличивается от начального значения угла поворота  $\varphi_{\text{нач}}$  до конечного значения угла поворота  $\varphi_{\text{кон}}$ .

Для диаграммы справедливы соотношения:

$$t_1 = 4\sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(3)}}}; T_{\text{ц}} = 8t_1; \omega_{\max}^{(2)} = 4\sqrt{\frac{1}{8}(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \cdot [\omega_{\text{доп}}^{(3)}]^3};$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \sqrt{\frac{1}{8}(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \omega_{\max} = 4\sqrt{\frac{1}{32}(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^3 \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)}}.$$

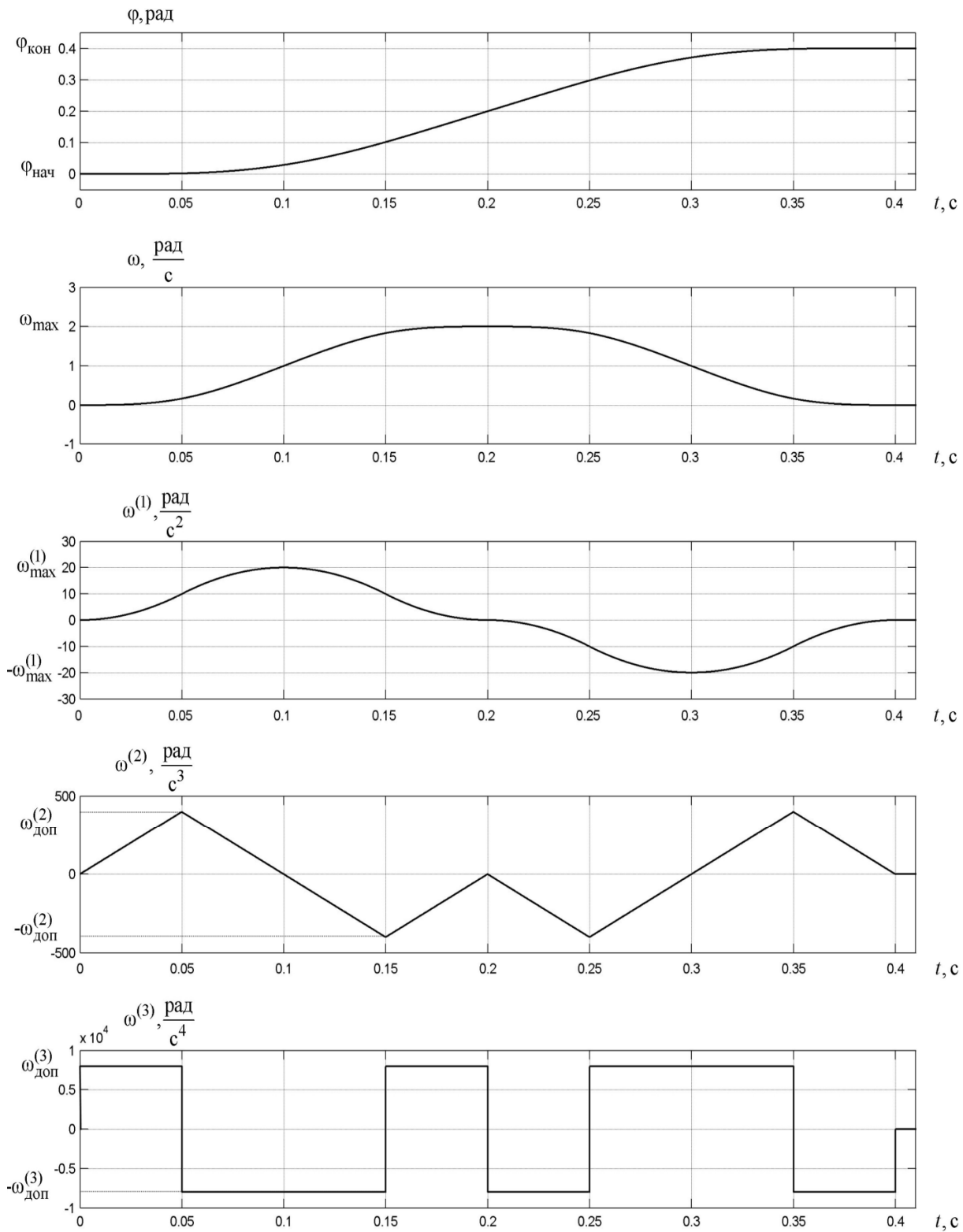


Рисунок 1

Оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока с ограничением третьей производной скорости справедлива при выполнении условия

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq 8 \cdot \frac{[\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^4}{[\omega_{\text{доп}}^{(3)}]^3}.$$

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

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)};$$

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t;$$

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

$$\omega(t) = \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t^4;$$

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t;$$

$$U(t) = \frac{1}{6} C_{\text{е}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[ M_{\text{со}} + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t^2 \right] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t;$$

$$P(t) = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ M_{\text{со}} \cdot t^3 + \frac{1}{2} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t^5 \right] +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t^2 + \frac{1}{4} J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t^4 \right\} +$$

$$+ \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ M_{\text{со}} \cdot t + \frac{1}{2} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t^3 \right];$$

$$W_1 = \frac{1}{24} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{72} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4,$$

где  $I_{\text{я}}$  – ток якорной цепи электропривода, А;

$I_{\text{я}}^{(1)}$  – первая производная тока якорной цепи электропривода, А;

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

$P$  – мощность, потребляемая якорной цепью электропривода, Вт;

$W$  – электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, Дж.

Этап 2. В интервале времени  $t_1 \leq t \leq 3t_1$ :

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)};$$

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

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

$$\omega(t) = \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 -$$

$$-\frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - t_1)^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{4} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 +$$

$$+ \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - t_1)^4;$$

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - t_1)];$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} (t - t_1)^3 \right] +$$

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

$$+ \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - t_1)];$$

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[ \frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right] + \right. \\
 & + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{12} t_1^5 + \frac{5}{12} t_1^4 \cdot (t - t_1) + \frac{2}{3} t_1^3 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{6} t_1^2 \cdot (t - t_1)^3 - \right. \\
 & \left. \left. - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - t_1)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - t_1)^5 \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2 M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right] + \right. \\
 & + J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ \frac{1}{4} t_1^4 + t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 - t_1 \cdot (t - t_1)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - t_1)^4 \right] \left. \right\} + \\
 & + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot [t_1 - (t - t_1)] + \right. \\
 & \left. + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^3 \right] \right\} ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_2 = & 2 \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{5}{3} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 + \\
 & + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 + \frac{10}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{43}{30} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 .
 \end{aligned}$$

Этап 3. В интервале времени  $3t_1 \leq t \leq 4t_1$ :

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} ;$$

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

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

$$\begin{aligned}
 \omega(t) = & \frac{11}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \\
 & + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^3 ;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \frac{49}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{11}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 3t_1) + \frac{1}{4} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1)^2 - \\
 & - \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1)^3 + \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^4 ;
 \end{aligned}$$

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1)];$$

$$U(t) = C_{\text{е}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{11}{6}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1)^3 \right] +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1)^2 \right] \right\} +$$

$$+ \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1)];$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[ \frac{11}{6}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1)^3 \right] + \right.$$

$$+ J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{11}{12}t_1^5 - \frac{19}{12}t_1^4 \cdot (t - 3t_1) + \frac{1}{6}t_1^3 \cdot (t - 3t_1)^2 + \frac{5}{6}t_1^2 \cdot (t - 3t_1)^3 - \right.$$

$$\left. \left. - \frac{5}{12}t_1 \cdot (t - 3t_1)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - 3t_1)^5 \right] \right\} +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1)^2 \right] + \right.$$

$$+ J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ \frac{1}{4}t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 3t_1) + \frac{3}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1)^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1)^3 + \right.$$

$$\left. \left. + \frac{1}{4} \cdot (t - 3t_1)^4 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1)] + \right.$$

$$\left. + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2}t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{3}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1)^3 \right] \right\};$$

$$W_3 = \frac{47}{24} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{23}{72} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 -$$

$$- \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}}J^2}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.$$

Этап 4. В интервале времени  $4t_1 \leq t \leq 5t_1$ :

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)};$$

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1);$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1)^2;$$

$$\omega(t) = 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1)^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + 4\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 4t_1) - \frac{1}{24}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1)^4;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left[ M_{\text{со}} - \frac{1}{2}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1)^2 \right];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1);$$

$$U(t) = C_{\text{е}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ 2t_1^3 - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1)^3 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[ M_{\text{со}} - \frac{1}{2}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1)^2 \right] -$$

$$-\frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1);$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[ 2t_1^3 - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1)^3 \right] - \frac{1}{2}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ 2t_1^3 \cdot (t - 4t_1)^2 - \right. \right.$$

$$\left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1)^5 \right\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 - M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1)^2 + \frac{1}{4}J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot (t - 4t_1)^4 \right\} -$$

$$-\frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ M_{\text{со}} \cdot (t - 4t_1) - \frac{1}{2}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1)^3 \right];$$

$$W_4 = \frac{47}{24} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{23}{72} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 -$$

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

Этап 5. В интервале времени  $5t_1 \leq t \leq 7t_1$ :

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)};$$

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1);$$



$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1) + \frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1)^2;$$

$$\omega(t) = \frac{11}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1) - \frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1)^2 + \frac{1}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1)^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{143}{24}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{11}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 5t_1) - \frac{1}{4}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1)^2 - \frac{1}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1)^3 + \frac{1}{24}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1)^4;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1)^2 \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1)];$$

$$U(t) = C_{\text{e}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{11}{6}t_1^3 - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 5t_1)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1)^3 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1)^2 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1)];$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[ \frac{11}{6}t_1^3 - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 5t_1)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1)^3 \right] + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{11}{12}t_1^5 - \frac{19}{12}t_1^4 \cdot (t - 5t_1) + \frac{5}{3}t_1^3 \cdot (t - 5t_1)^2 + \frac{1}{6}t_1^2 \cdot (t - 5t_1)^3 - \frac{5}{12}t_1 \cdot (t - 5t_1)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - 5t_1)^5 \right] \right\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2M_{\text{co}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1)^2 \right] + J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ \frac{1}{4}t_1^4 + t_1^3 \cdot (t - 5t_1) + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1)^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - 5t_1)^4 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1)] + \right.$$

$$+ J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1) - \frac{3}{2}t_1 \cdot (t - 5t_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1)^3 \right] \};$$

$$W_5 = 2 \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{5}{3} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 +$$

$$+ 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{10}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{43}{30} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5.$$

Этап 6. В интервале времени  $7t_1 \leq t \leq 8t_1$ :

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)};$$

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1);$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1)^2;$$

$$\omega(t) = \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1)^2 -$$

$$- \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1)^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{191}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 7t_1) -$$

$$- \frac{1}{4} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1)^3 -$$

$$- \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1)^4;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1)^2 \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1)];$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{6}t_1^3 - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 7t_1) + \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 7t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1)^3 \right] +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1)^2 \right] \right\} +$$

$$+ \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1)];$$

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[ \frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1)^3 \right] + \right. \\
 & + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{12} t_1^5 + \frac{5}{12} t_1^4 \cdot (t - 7t_1) - \frac{5}{6} t_1^3 \cdot (t - 7t_1)^2 + \frac{5}{6} t_1^2 \cdot (t - 7t_1)^3 - \right. \\
 & \left. \left. - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - 7t_1)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - 7t_1)^5 \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1)^2 \right] + \right. \\
 & + J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ \frac{1}{4} t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 7t_1) + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1)^2 - t_1 \cdot (t - 7t_1)^3 + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{4} \cdot (t - 7t_1)^4 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot [t_1 - (t - 7t_1)] + \right. \\
 & \left. + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1)^3 \right] \right\}; \\
 W_6 = & \frac{1}{24} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{1}{72} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.
 \end{aligned}$$

Электрoэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна:

$$W = 8 \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + 8 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 + \frac{46}{15} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5.$$

Так как  $8\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ , то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + 8 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 + \frac{46}{15} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5.$$

Так как  $8t_1 = T_{\text{ц}}$ , то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot T_{\text{ц}} + \frac{46}{15} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5.$$

В статье рассматриваются электропривод, имеющие следующие параметры:

$$C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}; R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}; L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}; J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

На допустимые значения угловой скорости и её первой, второй и третьей производных наложены ограничения:

$$\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \omega_{\text{доп}}^{(1)} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{доп}}^{(2)} = 400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \omega_{\text{доп}}^{(3)} = 8000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}.$$

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

При этом граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равно:

$$\varphi_{\text{гр.1}} = 8 \cdot \frac{400^4}{8000^3} = 0,4 \text{ рад}.$$

В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода: определены значения длительности этапа  $t_1$ ; длительности цикла  $T_{\text{ц}}$ ; максимальные значения второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}^{(2)}$ ; максимальные значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}^{(1)}$ ; максимальные значения угловой скорости исполнительного органа электропривода  $\omega_{\text{max}}$ ; значения электроэнергии  $W$ , потребляемой якорной цепью электропривода за цикл, для различных значений заданного перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ .

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента прецизионного электропривода

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$t_1, \text{с}$	$T_{\text{ц}}, \text{с}$	$\omega_{\text{max}}^{(2)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	$\omega_{\text{max}}^{(1)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	$\omega_{\text{max}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$W, \text{Дж}$
0,025	0,025	0,2	200	5	0,25	$4 \frac{467}{6000}$
0,1	0,035355339	0,282842712	282,8427125	10	0,707106781	5,993592681
0,2	0,042044821	0,336358566	336,3585661	14,14213562	1,189207115	7,433471243
0,3	0,046530243	0,372241944	372,2419436	17,32050808	1,611854898	8,537301461
0,4	0,05	0,4	400	20	2	$9 \frac{184}{375}$

Представленная на рисунке 1 оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода имеет следующие параметры:  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 0,4 \text{ рад}$ ;  $t_1 = 0,05 \text{ с}$ ;  $T_{\text{ц}} = 0,4 \text{ с}$ ;  $\omega_{\text{max}}^{(2)} = 400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ ;

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = 20 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{max}} = 2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; W = 9 \frac{184}{375} \text{ Дж}.$$

На рисунке 2 приведена зависимость длительности цикла  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения исполнительного органа электропривода  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ .

На рисунке 3 приведена зависимость электроэнергии  $W$ , потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ .

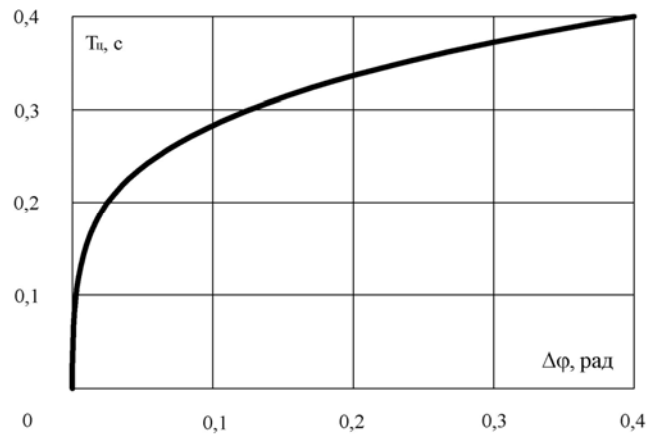


Рисунок 2

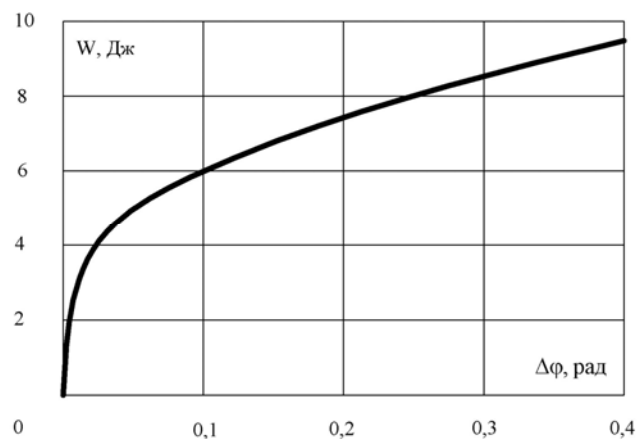


Рисунок 3

В результате проведённого исследования определена аналитическая зависимость электроэнергии  $W$ , потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

#### ЛИТЕРАТУРА

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

2. Добробаба Ю.П., Шпилев А.А., Мурлина Е.А. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для малых перемещений электроприводов переменного тока // Известия вузов. Пищевая технология.-2009.№ 5-6. – С. 99-101.

## REFERENCES

1. Osobo tochnyy pozitsionnyy elektroprivod postoyannogo toka: monografiya / Dobrobaba Yu. P., Khortsev A. L. – Krasnodar: Izd-vo FGBOU VPO "KubGTU", 2014. – 104 s.

2. Dobrobaba Yu.P., Shpilev A.A., Murlina E.A. Razrabotka optimalnoy po bystrodeystviyu diagrammy dlya malykh peremeshcheniy elektroprivodov peremennogo toka // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya. – 2009. – № 5-6. – S. 99-101.

*DETERMINATION OF THE POWER CHARACTERISTIC OF  
PRECISION DC ELECTRIC DRIVE FOR SMALL MOVEMENT  
ITS EXECUTIVE BODY*

**YU.P. DOBROBABA, G.A. KOSHKIN, V.P. SINYUK**

*Kuban State Technological University  
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;  
e-mail: VITALI771@yandex.ru*

In this article submitted optimum speed diagrams for small movement of executive body of precision dc electric drive, which consist of 6 stage. The analytical dependences of electric drive's coordinates on every stage are defined. The analytical dependences of electric power, consumed by anchor circuit, on specified movement of electric drive's executive body and it parameters are gotten.

**Key words:** precision electric drive, small movement of executive body of electric drive, electric power.