

*ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕЦИЗИОННОГО ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ СРЕДНИХ 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 средних перемещениях исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока, состоящая из четырнадцати этапов. Для каждого этапа перемещения выведены аналитические зависимости координат электропривода. Определена аналитическая зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

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

В монографии [1] показано, что система автоматического регулирования (САР) перемещения исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока описывается системой дифференциальных уравнений четвёртого порядка. Ранее в статье [2] для электроприводов переменного тока (силовая часть которых представима системой дифференциальных уравнений четвёртого порядка) разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений его исполнительного органа. В данной работе предлагается использовать эту диаграмму для прецизионных позиционных электроприводов постоянного тока.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока с ограничением первой, второй и третьей производных скорости. На первом, седьмом, десятом и двенадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению  $\omega_{\text{доп}}^{(3)}$ ; на третьем, пятом, восьмом и четырнадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому

значению со знаком минус  $-\omega_{\text{доп}}^{(3)}$ ; на втором, четвертом, шестом, девятом, одиннадцатом и тринадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. Длительность первого, третьего, пятого, седьмого, восьмого, десятого, двенадцатого и четырнадцатого этапов равна  $t_1$ ; длительность второго, шестого, девятого и тринадцатого этапов равна  $t_2$ ; длительность четвертого и одиннадцатого этапов равна  $t_3$ . На втором и тринадцатом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению  $\omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ; на шестом и девятом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус  $-\omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ; на четвертом и одиннадцатом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. На четвертом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению  $\omega_{\text{доп}}^{(1)}$ ; на одиннадцатом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус  $-\omega_{\text{доп}}^{(1)}$ . В момент времени  $(4t_1 + 2t_2 + t_3)$  скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\text{max}}$ . Угол поворота (перемещение) увеличивается от начального значения угла поворота  $\varphi_{\text{нач}}$  до конечного значения угла поворота  $\varphi_{\text{кон}}$ .

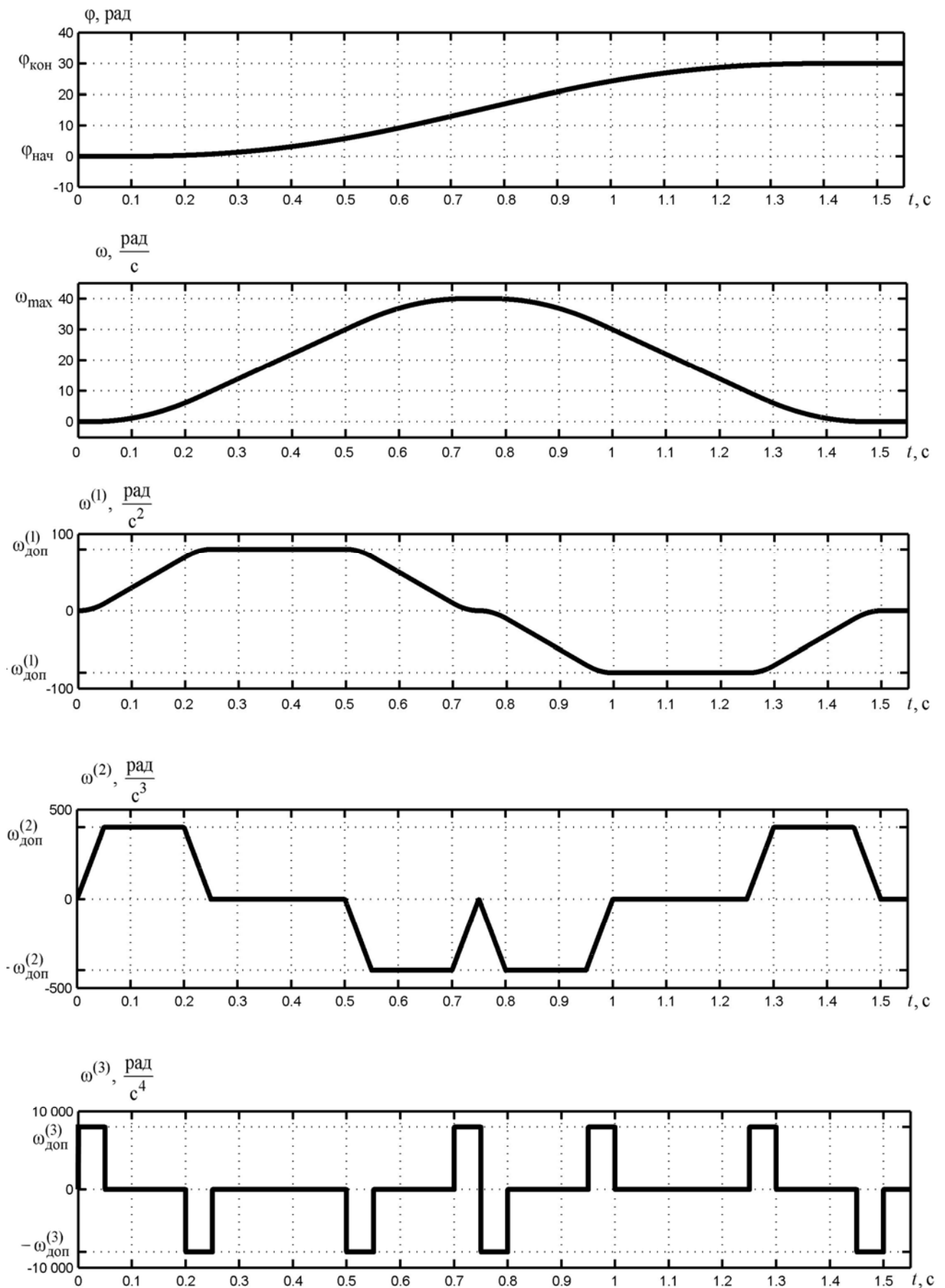


Рисунок 1

Для диаграммы справедливы соотношения:

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

$$t_3 = \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \right]^2} - \frac{3}{2} \cdot \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \right];$$

$$T = 8t_1 + 4t_2 + 2t_3; \omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}^{(1)} \cdot (2t_1 + t_2 + t_3).$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением первой, второй и третьей производных скорости справедлива при выполнении условий:

$$\varphi_{\text{гр.2}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \varphi_{\text{гр.3}},$$

$$\text{где } \varphi_{\text{гр.2}} = 2\omega_{\text{доп}}^{(1)} \cdot \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \right]^2;$$

$$\varphi_{\text{гр.3}} = \omega_{\text{доп}} \cdot \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \right].$$

Зависимости механических координат электропривода от времени получены в статье [2], поэтому в данной работе они не представлены.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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;

$C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью

исполнительного органа электропривода и ЭДС электродвигателя,  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;

$C_M$  – коэффициент пропорциональности между током и электромагнитным моментом электродвигателя, В · с;

$R_{\text{я}}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;

$L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной цепи электропривода, Гн;

$J$  – момент инерции электропривода, кг · м<sup>2</sup>.

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

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

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

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

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

$$W_2 = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{1}{6} t_1^3 t_2 + \frac{1}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) + \\ + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{12} t_1^5 t_2 + \frac{5}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^4 \right) + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) + \\ + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 t_2 + \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right).$$

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

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

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

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \left( \frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} (t - t_1 - t_2)^3 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)];$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[ \left( \frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \left( \frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} (t - t_1 - t_2)^3 \right] + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{12} t_1^5 + \frac{5}{12} t_1^4 t_2 + \frac{3}{4} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{5}{12} t_1^4 + \frac{3}{2} t_1^3 t_2 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \left( \frac{2}{3} t_1^3 + \frac{5}{4} t_1^2 t_2 - \frac{1}{4} t_1 t_2^2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{1}{6} \cdot t_1^2 - \frac{2}{3} t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2)^3 - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - t_1 - t_2)^5 \right] \right\} + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2 M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \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^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ \left( \frac{1}{4} t_1^4 + t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 \right) + \left( t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{1}{2} t_1^2 - t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - t_1 - t_2)^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 - t_1 - t_2)] + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left( \frac{1}{2} t_1^2 - t_1 t_2 \right) \cdot (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\};$$

$$W_3 = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{13}{24} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{35}{72} t_1^6 + \frac{17}{12} t_1^5 t_2 + \right. \\ \left. + \frac{17}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{43}{60} t_1^5 + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \\
 & + \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right).
 \end{aligned}$$

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

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

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

$$\begin{aligned}
 P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[ \left( t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2) \right] + \right. \\
 \left. + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( t_1^5 + \frac{5}{2} t_1^4 t_2 + 2 t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 \right) + (t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2) \cdot (t - 2t_1 - t_2) \right] \right\} + \\
 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2 M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) + J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2) \right\}
 \end{aligned}$$

;

$$\begin{aligned}
 W_4 = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( t_1^3 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 t_3^2 \right) + \\
 + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( t_1^5 t_3 + \frac{5}{2} t_1^4 t_2 t_3 + 2 t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 + \frac{1}{2} t_1^4 t_3^2 + \right. \\
 \left. + t_1^3 t_2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3^2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_3 + 2 \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) + \\
 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^4 t_3 + 2 t_1^3 t_2 t_3 + t_1^2 t_2^2 t_3).
 \end{aligned}$$

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

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



$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3);$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ (t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3);$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[ \left( t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( t_1^5 + \frac{5}{2} t_1^4 t_2 + 2 t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 + t_1^4 t_3 + 2 t_1^3 t_2 t_3 + t_1^2 t_2^2 t_3 \right) + (t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot \left( t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{2}{3} (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{12} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^5 \right] \right\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2 M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ (t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ (t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2) - (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{4} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^4 \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] \right\};$$

$$W_5 = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{35}{24} t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{85}{72} t_1^6 + \frac{37}{12} t_1^5 t_2 + \frac{29}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 + \frac{5}{6} t_1^5 t_3 + \frac{11}{6} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{43}{60} t_1^5 + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right).$$

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) \right] \right\};$$

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

$$U(t) = C_{\text{е}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2 + t_1^2t_3 + t_1t_2t_3 \right) + \left( \frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[ \left( \frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2 + t_1^2t_3 + t_1t_2t_3 \right) + \left( \frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{11}{12}t_1^5 + \frac{37}{12}t_1^4t_2 + \frac{11}{4}t_1^3t_2^2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^3 + \frac{1}{2}t_1^4t_3 + \frac{3}{2}t_1^3t_2t_3 + t_1^2t_2^2t_3 \right) + \left( -\frac{19}{12}t_1^4 - \frac{3}{2}t_1^3t_2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^2 - t_1^3t_3 - t_1^2t_2t_3 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) - \left( \frac{3}{4}t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] \right\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) \right] + J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ \left( \frac{1}{4}t_1^4 + t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 \right) - (t_1^3 + 2t_1^2t_2) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) + t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot t_1 + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{1}{2}t_1^3 + t_1^2t_2 \right) - t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) \right] \right\};$$

$$\begin{aligned}
 W_6 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left( \frac{11}{6} t_1^3 t_2 + \frac{11}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{5}{6} t_1 t_2^3 + t_1^2 t_2 t_3 + t_1 t_2^2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{11}{12} t_1^5 t_2 + \frac{55}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{7}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{3}{8} t_1^2 t_2^4 + \frac{1}{2} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot (t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1 t_2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2).
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 I_{я}(t) = & \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{co} + J \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] \right\} \\
 I_{я}^{(1)}(t) = & \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{доп}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left\{ M_{co} + J \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] \right\} + \\
 & + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{доп}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[ \left( \frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} t_1 (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \\
 & + J \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left[ \left( \frac{11}{12} t_1^5 + \frac{3}{2} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^4 t_3 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 t_3 \right) - \right. \\
 & \left. - \left( \frac{19}{12} t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \right. \\
 & \left. + \left( \frac{1}{6} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{5}{6} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \right. \\
 & \left. - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^5 \right] \left. \right\} + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & +2M_{\text{co}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ \frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \\
 & + J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[ \frac{1}{4}t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{3}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \right. \\
 & \left. - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \right] + \\
 & + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)] + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[ -\frac{1}{2}t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{3}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] \right\}; \\
 W_7 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{co}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{47}{24}t_1^4 + 3t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) + \\
 & + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{23}{72}t_1^6 + \frac{1}{2}t_1^5t_2 + \frac{1}{6}t_1^4t_2^2 + \frac{1}{6}t_1^5t_3 + \frac{1}{6}t_1^4t_2t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\
 & - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}}J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.
 \end{aligned}$$

Так как оптимальная по быстродействию диаграмма при средних перемещениях исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока симметрична, то на этапах 8-14 зависимости энергии, потребляемой якорной цепью электродвигателя получены аналогично.

Этап 8. В интервале времени  $(4t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (5t_1 + 2t_2 + t_3)$ :

$$\begin{aligned}
 W_8 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{co}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{47}{24}t_1^4 + 3t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) - \\
 & - \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{23}{72}t_1^6 + \frac{1}{2}t_1^5t_2 + \frac{1}{6}t_1^4t_2^2 + \frac{1}{6}t_1^5t_3 + \frac{1}{6}t_1^4t_2t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\
 & - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}}J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.
 \end{aligned}$$

Этап 9. В интервале времени

$$(5t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (5t_1 + 3t_2 + t_3):$$

$$\begin{aligned} W_9 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left( \frac{11}{6} t_1^3 t_2 + \frac{11}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{5}{6} t_1 t_2^3 + t_1^2 t_2 t_3 + t_1 t_2^2 t_3 \right) - \\ & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{11}{12} t_1^5 t_2 + \frac{55}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{7}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{3}{8} t_1^2 t_2^4 + \frac{1}{2} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 \right) + \\ & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 - \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot (t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2). \end{aligned}$$

Этап 10. В интервале времени  $(5t_1 + 3t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + 3t_2 + t_3)$ :

$$\begin{aligned} W_{10} = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left( \frac{35}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \\ & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{85}{72} t_1^6 + \frac{37}{12} t_1^5 t_2 + \frac{29}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 + \frac{5}{6} t_1^5 t_3 + \frac{11}{6} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 \right) + \\ & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left( \frac{5}{3} t_1^3 + 2t_1^2 t_2 \right) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{43}{60} t_1^5 + \right. \\ & \left. + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right). \end{aligned}$$

Этап 11. В интервале времени  $(6t_1 + 3t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + 3t_2 + 2t_3)$ :

$$\begin{aligned} W_{11} = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left( t_1^3 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 t_3^2 \right) - \\ & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( t_1^5 t_3 + \frac{5}{2} t_1^4 t_2 t_3 + 2t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 + \frac{1}{2} t_1^4 t_3^2 + \right. \\ & \left. + t_1^3 t_2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3^2 \right) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_3 - 2 \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot (t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) + \\ & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^4 t_3 + 2t_1^3 t_2 t_3 + t_1^2 t_2^2 t_3). \end{aligned}$$

Этап 12. В интервале времени  $(6t_1 + 3t_2 + 2t_3) \leq t \leq (7t_1 + 3t_2 + 2t_3)$ :

$$W_{12} = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left( \frac{13}{24} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{35}{72} t_1^6 + \frac{17}{12} t_1^5 t_2 + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{17}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 \Big) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{43}{60} t_1^5 + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \\
 & - \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right).
 \end{aligned}$$

Этап 13. В интервале времени  $(7t_1 + 3t_2 + 2t_3) \leq t \leq (7t_1 + 4t_2 + 2t_3)$ :

$$\begin{aligned}
 W_{13} = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{1}{6} t_1^3 t_2 + \frac{1}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) - \\
 & - \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{12} t_1^5 t_2 + \frac{5}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^4 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 - 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) + \\
 & + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 t_2 - \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right).
 \end{aligned}$$

Этап 14. В интервале времени  $(7t_1 + 4t_2 + 2t_3) \leq t \leq (8t_1 + 4t_2 + 2t_3)$ :

$$\begin{aligned}
 W_{14} = & \frac{1}{24} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{1}{72} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.
 \end{aligned}$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна:

$$W = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left( 8t_1^4 + 16t_1^3 t_2 + 10t_1^2 t_2^2 + 2t_1 t_2^3 + 6t_1^3 t_3 + 9t_1^2 t_2 t_3 + 3t_1 t_2^2 t_3 + t_1^2 t_3^2 + t_1 t_2 t_3^2 \right) +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{со}^2 \cdot (8t_1 + 4t_2 + 2t_3) +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 + 2t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + 2t_1^2 t_2^2 t_3 \right).$$

Так как  $\omega_{доп}^{(3)} \cdot (8t_1^4 + 16t_1^3 t_2 + 10t_1^2 t_2^2 + 2t_1 t_2^3 + 6t_1^3 t_3 + 9t_1^2 t_2 t_3 + 3t_1 t_2^2 t_3 + t_1^2 t_3^2 + t_1 t_2 t_3^2) =$   
 $= (\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ , то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{со} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{со}^2 \cdot (8t_1 + 4t_2 + 2t_3) +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 + 2t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + 2t_1^2 t_2^2 t_3 \right).$$

Так как  $(8t_1 + 4t_2 + 2t_3) = T_{ц}$ , то

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

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 + 2t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + 2t_1^2 t_2^2 t_3 \right).$$

Так как  $\omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1 = \omega_{доп}^{(2)}$ , то

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

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot \left( \frac{46}{15} t_1^3 + \frac{23}{3} t_1^2 t_2 + 6t_1 t_2^2 + \frac{4}{3} t_2^3 + 2t_1^2 t_3 + 4t_1 t_2 t_3 + 2t_2^2 t_3 \right).$$

В статье рассматривается электропривод, имеющие следующие параметры:  $C_e = 1,25 \frac{В \cdot с}{рад}$ ;  $C_M = 1,25 В \cdot с$ ;  $R_{я} = 5 Ом$ ;  $L_{я} = 0,1 Гн$ ;

$$J = 0,05 кг \cdot м^2.$$

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 граничные значения угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равны:

$$\varphi_{\text{гр.2}} = 2 \cdot 80 \cdot \left[ \frac{80}{400} + \frac{400}{8000} \right]^2 = 10 \text{ рад}; \varphi_{\text{гр.3}} = 160 \cdot \left[ \frac{160}{80} + \frac{80}{400} + \frac{400}{8000} \right]^2 = 360 \text{ рад}.$$

В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода: определены значения длительности этапа  $t_3$ ; длительности цикла  $T_{\text{ц}}$ ; 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  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ .

Представленная на рисунке 1 оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода имеет следующие параметры:  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 30 \text{ рад}$ ;  $t_1 = 0,05 \text{ с}$ ;  $t_2 = 0,15 \text{ с}$ ;  $t_3 = 1,75 \text{ с}$ ;  $T_{\text{ц}} = 1,5 \text{ с}$ ;

$$\omega_{\text{max}} = 40 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; W = 149 \frac{64}{375} \text{ Дж}.$$

Длительность первого, третьего, пятого, седьмого, восьмого, десятого, двенадцатого и четырнадцатого этапов:  $t_1 = 0,05 \text{ с}$ . Длительность второго, шестого, девятого и тринадцатого этапов:  $t_2 = 0,15 \text{ с}$ . Длительность четвертого и одиннадцатого этапов:  $t_3 = 0,25 \text{ с}$ .

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



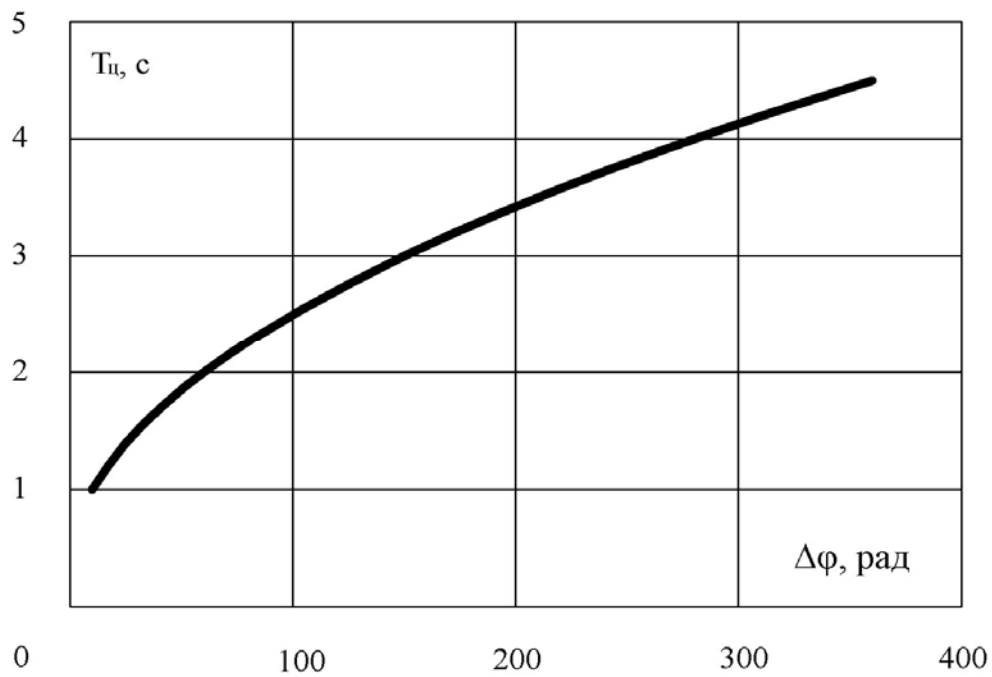


Рисунок 2.

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

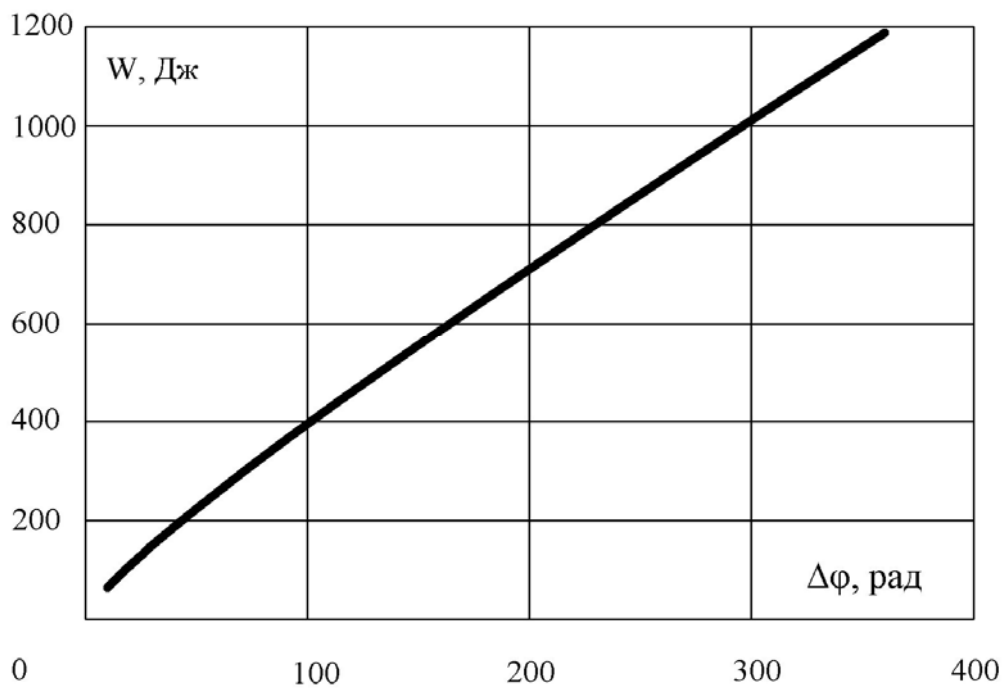


Рисунок 3.

В результате проведенного исследования определены аналитические зависимости электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, на каждом этапе движения и за цикл от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента прецизионного электропривода

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$t_3, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\omega_{\text{max}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$W, \text{ Дж}$
10	0	1	20	$63 \frac{214}{375}$
25	0,197821962	1,395643924	35,82575695	129,240514037
50	0,425390530	1,850781059	54,03124237	224,146278093
75	0,601281209	2,202562419	68,10249676	311,693110898
100	0,75	2,5	80	$395 \frac{139}{375}$
150	1	3	100	$555 \frac{364}{375}$
200	1,211072193	3,422144385	116,8857754	711,027346887
300	1,565521837	4,131043674	145,241747	1011,500976260
360	1,75	4,5	160	$1187 \frac{289}{375}$

## ЛИТЕРАТУРА

1. Добробаба Ю. П., 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 средних перемещений

электроприводов переменного тока // Известия вузов. Пищевая технология. – 2010. – № 2-3. – С. 95-97.

## REFERENCES

1. Dobrobaba Yu. P., 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 srednikh peremeshcheniy elektroprivodov peremennogo toka // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya. – 2010. – № 2-3. – S. 95-97.

### *DETERMINATION OF THE POWER CHARACTERISTIC OF PRECISION DC ELECTRIC DRIVE FOR MEDIUM 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 medium movement of executive body of precision dc electric drive, which consist of 14 stage. The analytical dependences of electric drive's coordinates on every stage are gotten. The analytical dependences of electric power, consumed by anchor circuit, on specified movement of electric drive's executive body and it parameters are defined.

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