

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕЦИЗИОННОГО ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ НЕБОЛЬШИХ 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 приведена оптимальная по быстродействию диаграмма при небольших перемещениях исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока, состоящая из десяти этапов. Для каждого этапа перемещения получены 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, небольшие перемещения исполнительного органа электропривода, электроэнергия.

В монографии [1] показано, что система автоматического регулирования (САР) перемещения исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока представима системой дифференциальных уравнений четвертого порядка. Ранее в статье [2] для электроприводов переменного тока (силовая часть которых описывается системой дифференциальных уравнений четвертого порядка) разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для небольших 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 небольших перемещений исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока с ограничением второй и третьей производных скорости.

На первом, пятом и восьмом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на третьем, шестом и десятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому

значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на втором, четвертом, седьмом и девятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю.

Длительность первого, пятого, шестого и десятого этапов равна t_1 ; длительность третьего и восьмого этапов равна $2t_1$; длительность второго, четвертого, седьмого и девятого этапов равна t_2 .

На втором и девятом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(2)}$; на четвертом и седьмом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(2)}$. В момент времени $(2t_1 + t_2)$ первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $\omega_{\text{max}}^{(1)}$; в моменты времени $(6t_1 + 3t_2)$ первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус $-\omega_{\text{max}}^{(1)}$. В момент времени $(4t_1 + 2t_2)$ скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения ω_{max} . Угол поворота (перемещение) увеличивается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

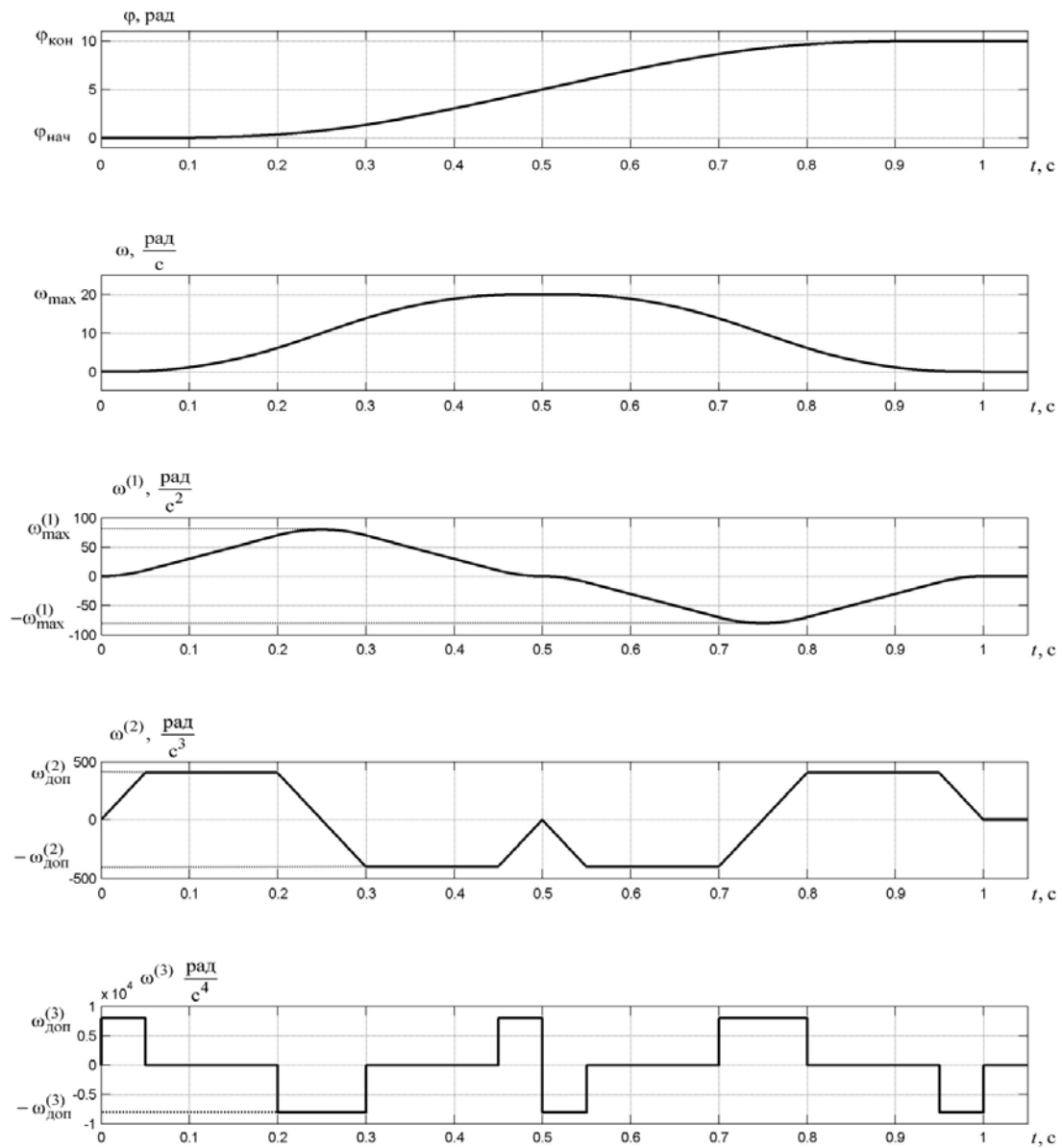


Рисунок – 1

Для диаграммы справедливы соотношения:

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

$$t_2^3 + 5t_1t_2^2 + 8t_1^2t_2 + 4t_1^3 - \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} = 0; \tag{1}$$

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

Уравнение (1) имеет аналитическое решение:

$$t_2 = \sqrt[3]{\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{4\omega_{\text{доп}}^{(2)}}} + \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right]} +$$

$$+ \sqrt[3]{\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{4\omega_{\text{доп}}^{(2)}}} - \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right]} - \frac{5}{3}t_1.$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для небольших перемещений прецизионного позиционного электропривода постоянного тока с ограничением второй и третьей производных скорости справедлива при выполнении условий:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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, $\text{В} \cdot \text{с}$;

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

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

J – момент инерции электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

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

$$\omega^{(3)}(t) = 0;$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 W_2 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 t_2 + \frac{1}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) + \\
 & + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{12} t_1^5 t_2 + \frac{5}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^4 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) + \\
 & + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 t_2 + \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right).
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \omega^{(3)}(t) &= -\omega_{\text{доп}}^{(3)}; \\
 \omega^{(2)}(t) &= \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2); \\
 \omega^{(1)}(t) &= \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2; \\
 \omega(t) &= \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \\
 & + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2)^3; \\
 \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{24} t_1^4 + \frac{1}{6} t_1^3 t_2 + \frac{1}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) + \\
 & + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \\
 & + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2)^2 + \\
 & + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2)^4; \\
 I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 \right] \right\}; \\
 I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - t_1 - t_2)];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e \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_e}{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) + (t_1^3 + 2 t_1^2 t_2) \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\};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_3 = & \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(2 t_1^4 + 3 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 \right) + \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{5}{3} t_1^6 + \frac{9}{2} t_1^5 t_2 + \right. \\
 & \left. + \frac{23}{6} t_1^4 t_2^2 + t_1^3 t_2^3 \right) + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{10}{3} t_1^3 + 4 t_1^2 t_2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{43}{30} t_1^5 + \frac{10}{3} t_1^4 t_2 + 2 t_1^3 t_2^2 \right).
 \end{aligned}$$

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

$$\omega^{(3)}(t) = 0;$$

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

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

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{49}{24} t_1^4 + \frac{19}{6} t_1^3 t_2 + \frac{5}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) + \\ &+ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3; \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned} U(t) &= C_{\text{е}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - \right. \right. \\ &\left. \left. - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \right. \right. \\ &\left. \left. - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{12} t_1^5 + \frac{37}{12} t_1^4 t_2 + \frac{11}{4} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 \right) + \right. \right. \\ &\left. \left. + \left(-\frac{19}{12} t_1^4 - \frac{3}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \left(\frac{3}{4} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \right. \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \Big] \Big\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) \right] + J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{4} t_1^4 + t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 \right) - (t_1^3 + 2t_1^2 t_2) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot t_1 + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) \right] \right\} \\
 ; W_4 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 t_2 + \frac{11}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{5}{6} t_1 t_2^3 \right) + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{11}{12} t_1^5 t_2 + \frac{55}{24} t_1^4 t_2^2 + \right. \\
 & \left. + \frac{7}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{3}{8} t_1^2 t_2^4 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) - \\
 & - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 t_2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2).
 \end{aligned}$$

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

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

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

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

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) -$$

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

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + 4t_1^2 t_2^2 + t_1 t_2^3 \right) +$$

$$+ \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) +$$

$$+ \frac{1}{4} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 +$$

$$+ \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^4;$$

$$\begin{aligned}
 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 - 3t_1 - 2t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 \right] \right\}; \\
 I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2)]; \\
 U(t) &= C_{\text{e}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6}t_1^3 + 3t_1^2t_2 + t_1t_2^2 \right) + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \right. \\
 &+ \left. \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^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 - 3t_1 - 2t_2) + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - 2t_2)]; \\
 P(t) &= \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\left(\frac{11}{6}t_1^3 + 3t_1^2t_2 + t_1t_2^2 \right) + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) - \right. \right. \\
 &- \left. \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 \right] + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{12}t_1^5 + \frac{3}{2}t_1^4t_2 + \frac{1}{2}t_1^3t_2^2 \right) - \right. \\
 &- \left. \left(\frac{19}{12}t_1^4 + 3t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \left(\frac{1}{6}t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \right. \\
 &+ \left. \frac{5}{6}t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 - \frac{5}{12} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^5 \right] \Big\} + \\
 &+ \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 - 3t_1 - 2t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 \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 - 3t_1 - 2t_2) + \frac{3}{2}t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 + \right. \right. \\
 &+ \left. \left. \frac{1}{4} \cdot (t - 3t_1 - 2t_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 - 3t_1 - 2t_2)] + \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 - 2t_2) - \frac{3}{2}t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 \right] \right\}; \\
 W_5 &= \frac{C_{\text{e}}}{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 \right) + \frac{C_{\text{e}}}{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 \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 6. В интервале времени $(4t_1 + 2t_2) \leq t \leq (5t_1 + 2t_2)$:

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

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2);$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2)^2;$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2t_2 + t_1t_2^2) - \frac{1}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2)^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (4t_1^4 + 8t_1^3t_2 + 5t_1^2t_2^2 + t_1t_2^3) + \\ + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2t_2 + t_1t_2^2) \cdot (t - 4t_1 - 2t_2) - \frac{1}{24}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2)^4;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left[M_{\text{со}} - \frac{1}{2}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2)^2 \right];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2);$$

$$U(t) = C_{\text{е}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[(2t_1^3 + 3t_1^2t_2 + t_1t_2^2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2)^3 \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left[M_{\text{со}} - \frac{1}{2}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2)^2 \right] - \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - 2t_2);$$

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

$$W_6 = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{47}{24}t_1^4 + 3t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 \right) - \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{23}{72}t_1^6 + \frac{1}{2}t_1^5t_2 + \frac{1}{6}t_1^4t_2^2 \right) + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 -$$

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

Этап 7. В интервале времени $(5t_1 + 2t_2) \leq t \leq (5t_1 + 3t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = 0;$$

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2);$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2)^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 11t_1^3 t_2 + 6t_1^2 t_2^2 + t_1 t_2^3 \right) + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) - \frac{1}{4} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2)^3;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} - J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) \right] \right\};$$

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

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

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2)^2 \right] - J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{12} t_1^5 + \frac{3}{2} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 \right) + \left(\frac{19}{12} t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) - \frac{3}{4} t_1^3 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2)^2 - \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2)^3 \Big] \Big\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 - 2M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) \right] + \right. \\
 & \left. + J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[\frac{1}{4}t_1^4 + t_1^3 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) + t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2)^2 \right] \right\} - \\
 & - \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot t_1 - J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - 2t_2) \right] \right\}; \\
 W_7 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3t_2 + \frac{11}{4}t_1^2t_2^2 + \frac{5}{6}t_1t_2^3 \right) - \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{11}{12}t_1^5t_2 + \frac{55}{24}t_1^4t_2^2 + \right. \\
 & \left. + \frac{7}{4}t_1^3t_2^3 + \frac{3}{8}t_1^2t_2^4 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t_1^2t_2 + t_1t_2^2) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4}t_1^4t_2 + \frac{1}{2}t_1^3t_2^2 + \frac{1}{3}t_1^2t_2^3 \right) - \\
 & - \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}}J^2}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2).
 \end{aligned}$$

Этап 8. В интервале времени $(5t_1 + 3t_2) \leq t \leq (7t_1 + 3t_2)$:

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

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - 3t_2);$$

$$\begin{aligned}
 \omega^{(1)}(t) = & -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - 3t_2) + \\
 & + \frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - 3t_2)^2;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega(t) = & \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2 \right) - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - 3t_2) - \\
 & - \frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - 3t_2)^2 + \frac{1}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - 3t_2)^3;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{143}{24}t_1^4 + \frac{77}{6}t_1^3t_2 + \frac{35}{4}t_1^2t_2^2 + \frac{11}{6}t_1t_2^3 \right) + \\
 & + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2 \right) \cdot (t - 5t_1 - 3t_2) - \\
 & - \frac{1}{2}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - 3t_2)^2 - \\
 & - \frac{1}{6}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - 3t_2)^3 + \frac{1}{24}\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - 3t_2)^4;
 \end{aligned}$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[-\left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2 \right) - t_1 \cdot (t - 5t_1 - 3t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - 3t_2)^2 \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - 3t_2)];$$

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

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

$$W_8 = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(2t_1^4 + 3t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 \right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{5}{3}t_1^6 + \frac{9}{2}t_1^5t_2 + \frac{23}{6}t_1^4t_2^2 + t_1^3t_2^3 \right) + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} J\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{10}{3}t_1^3 + 4t_1^2t_2 \right) +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{43}{30} t_1^5 + \frac{10}{3} t_1^4 t_2 + 2 t_1^3 t_2^2 \right).$$

Этап 9. В интервале времени $(7t_1 + 3t_2) \leq t \leq (7t_1 + 4t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = 0;$$

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2);$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{191}{24} t_1^4 + \frac{95}{6} t_1^3 t_2 + \frac{39}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1 t_2^3 \right) + \\ + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^3; \end{aligned}$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[- \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) \right] \right\};$$

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

$$\begin{aligned} U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) - \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[- \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + t_1 (t - 7t_1 - 3t_2) \right] \right\} + \\ + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1; \end{aligned}$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) - \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) + \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^2 \Big] + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[- \left(\frac{1}{12} t_1^5 + \frac{5}{12} t_1^4 t_2 + \frac{3}{4} t_1^3 \cdot t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 \right) + \right. \\
 & + \left(\frac{5}{12} t_1^4 + \frac{3}{2} t_1^3 t_2 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) - \left(\frac{3}{4} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^2 + \\
 & + \left. \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^3 \right] \Big\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[- \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \right. \right. \\
 & + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) \Big] + J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[\left(\frac{1}{4} t_1^4 + t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 \right) - \right. \\
 & - \left. \left(t_1^3 + 2t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) + t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2)^2 \right] \Big\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot t_1 + \right. \\
 & + \left. J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[- \left(\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 3t_2) \right] \right\};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_9 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 t_2 + \frac{1}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) - \\
 & - \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{12} t_1^5 t_2 + \frac{5}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^4 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 - 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) + \\
 & + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 t_2 - \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right).
 \end{aligned}$$

Этап 10. В интервале времени $(7t_1 + 4t_2) \leq t \leq (8t_1 + 4t_2)$:

$$\begin{aligned}
 \omega^{(3)}(t) &= -\omega_{\text{доп}}^{(3)}; \\
 \omega^{(2)}(t) &= \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2); \\
 \omega^{(1)}(t) &= -\frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2; \\
 \omega(t) &= \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 - \\
 & - \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^3;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{191}{24} t_1^4 + 16 t_1^3 t_2 + 10 t_1^2 t_2^2 + 2 t_1 t_2^3 \right) + \\ & + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) - \frac{1}{4} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 + \\ & + \frac{1}{6} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^4; \end{aligned}$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 4t_2)];$$

$$\begin{aligned} U(t) = & C_{\text{e}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 - \right. \\ & \left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^3 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 4t_2)]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P(t) = & \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^3 \right] + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{12} t_1^5 + \frac{5}{12} t_1^4 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{5}{6} t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 + \frac{5}{6} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^3 - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^4 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{12} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^5 \right] \right\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2 M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 \right] + J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[\frac{1}{4} t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 - t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^4 \right] \right\} + \\ & + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 4t_2)] + J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^3 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 4t_2)^3 \right] \right\}; \end{aligned}$$

$$W_{10} = \frac{1}{24} \cdot \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{1}{72} \cdot \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 +$$

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

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна:

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(8t_1^4 + 16t_1^3 t_2 + 10t_1^2 t_2^2 + 2t_1 t_2^3 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot (8t_1 + 4t_2) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 \right) .
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot (8t_1 + 4t_2) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 \right) .
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot T_{\text{ц}} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 \right) .
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot T_{\text{ц}} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^3 + \frac{23}{3} t_1^2 t_2 + 6t_1 t_2^2 + \frac{4}{3} t_2^3 \right) .
 \end{aligned}$$

В статье рассматривается 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 граничные значения угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равны:

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

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

В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода: определены значения длительности этапа t_2 ; длительности цикла $T_{\text{ц}}$; максимальные значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_{\text{max}}^{(1)}$; максимальные значения угловой скорости исполнительного органа электропривода ω_{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: $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 10 \text{ рад}; \quad t_1 = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = 0,15 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 1 \text{ с};$

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad \omega_{\text{max}} = 20 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad W = 63 \frac{214}{375} \text{ Дж}.$$

Длительность первого, пятого, шестого и десятого этапов: $t_1 = 0,05 \text{ с}$. Длительность третьего и восьмого этапов: $2t_1 = 0,1 \text{ с}$. Длительность второго, четвёртого, седьмого и девятого этапов $t_3 = 0,15 \text{ с}$.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента прецизионного электропривода

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$t_2, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\omega_{\text{max}}^{(1)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	$\omega_{\text{max}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$W, \text{ Дж}$
0,4	0	0,4	20	2	$9 \frac{184}{375}$
1	0,027225576	0,508902304	30,8902304	3,930027355	14,155721293
2	0,054598909	0,618395636	41,8395636	6,468350886	20,620572074
3	0,073942453	0,695769812	49,5769812	8,623541722	26,509602610
4	0,089393155	0,75757262	55,7572620	10,560043764	32,122989659
5	0,102466393	0,809865572	60,9865572	12,347728258	37,569661311
6	0,113909052	0,855636208	65,5636208	14,024651971	42,902919016
7	0,124151113	0,896604452	69,6604452	15,614466324	48,153262427
8	0,133465527	0,933862108	73,3862108	17,133150379	53,339949691
9	0,142037699	0,968150796	76,8150796	18,592145115	58,475999903
10	0,15	1	80	20	$63 \frac{214}{375}$

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 $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$.

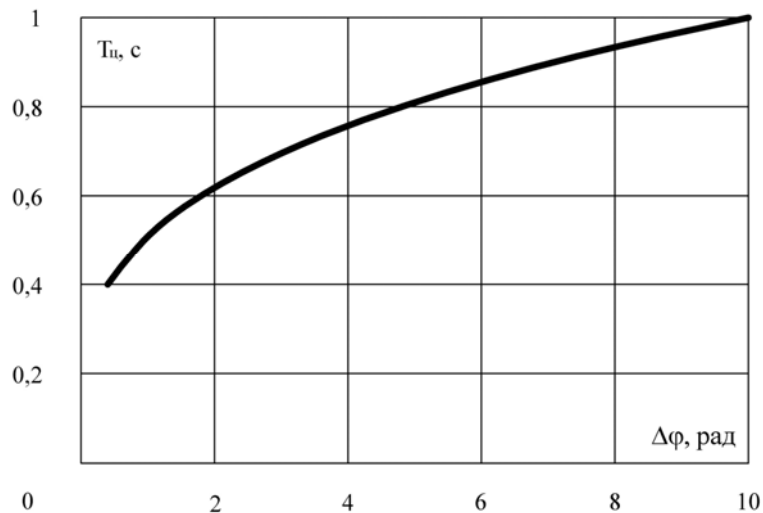


Рисунок 2

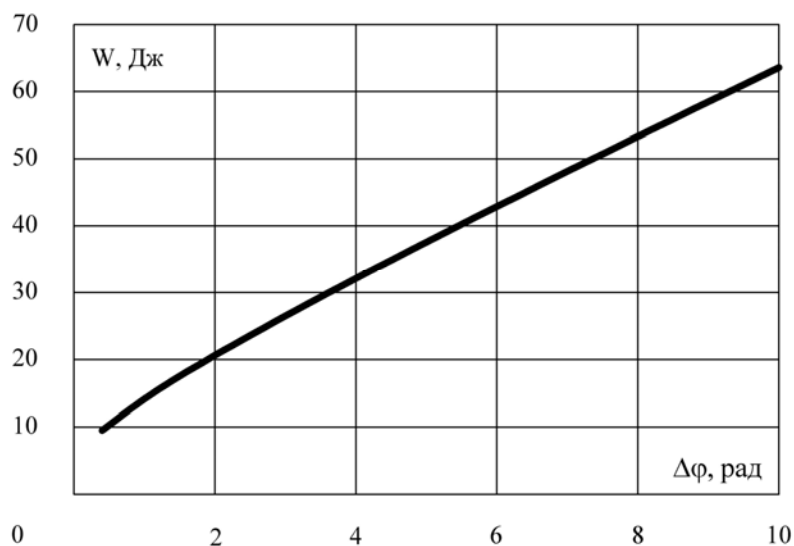


Рисунок 3

В результате проведённого исследования 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.

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. – 2010. – № 1. – С. 84-87.

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. – 2010. – № 1. – S. 84-87.

*DETERMINATION OF THE POWER CHARACTERISTIC OF
PRECISION DC ELECTRIC DRIVE FOR LITTLE 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 little movement of executive body of precision dc electric drive, which consist of 10 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, little movement of executive body of electric drive, electric power.