

УДК 62

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТЕЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ КООРДИНАТ
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ РАЗГОНЕ



INVESTIGATION OF THE DEPENDENCES OF THE CONTROLLED
COORDINATES OF A DC ELECTRIC DRIVE
WITH AN ELASTIC SHAFT LINE ON TIME DURING ACCELERATION

Добробаба Юрий Петрович

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

Зарудний Владимир Юрьевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет

Аннотация. В работе определены аналитические зависимости контролируемых координат электропривода постоянного тока с упругим валопроводом от времени при отработке оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения его исполнительного органа с ограничениями скорости и её первой, второй и четвертых производных, состоящей из двадцати трех этапов. В данной работе рассматриваются первые одиннадцать этапов диаграммы при разгоне исполнительного органа механизма. Установлены зависимости значений максимального тока и максимального напряжения от максимального значения четвертой производной угловой скорости механизма при движении электропривода с максимальным быстродействием.

Ключевые слова: электропривод постоянного тока, упругий валопровод, аналитические зависимости контролируемых координат.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of technical sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of department
of power supply industrial enterprises,
Kuban state technological university

Zarudny Vladimir Yurievich

Student,
Kuban state technological university

Annotation. The paper defines the analytical dependences of the controlled coordinates of a dc electric drive with an elastic shaft line on time when working out the optimal speed diagram of the movement of its executive body with speed limits and its first, second and fourth derivatives, consisting of twenty-three stages. In this paper, we consider the first eleven stages of the diagram when overlocking the executive body of the mechanism. The dependences of maximum current and maximum voltage from the maximum value of the fourth derivative of the angular velocity of the mechanism during the movement of the actuator with maximum speed.

Keywords: DC electric drive, elastic shaft line, analytical dependences of controlled coordinates.

При разработке оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода возникает одна специфическая задача – как определить значение старшей производной угловой скорости механизма? Для решения этой задачи необходимо:

– определить аналитические зависимости тока и напряжения от времени при отработке оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа механизма;

– установить зависимости значений максимального тока и максимального напряжения от максимального значения старшей производной угловой скорости механизма при разгоне электропривода с максимальным быстродействием.

Разгон электропривода состоит из одиннадцати этапов. Четвертая производная скорости механизма $\omega_2^{(4)}$ на этапах первом, пятом, восьмом и десятом принимает максимальное значение $\omega_{\text{Max}}^{(4)}$; на этапах втором, четвертом, седьмом и одиннадцатом принимает максимальное значение со знаком «минус» $\omega_{\text{Max}}^{(4)}$; на этапах третьем, шестом и девятом равна нулю. Длительность первого, второго, четвертого, пятого, седьмого, восьмого, десятого и одиннадцатого этапов равна t_1 ; длительность третьего и девятого этапов равна t_2 ; длительность шестого этапа равна t_3 .

Третья производная угловой скорости механизма $\omega_2^{(3)}$ в моменте времени $t = t_1$ и $t = (7t_1 + 2t_2 + t_3)$ достигает максимального значения $\omega_{\max}^{(3)}$; в моменты времени $(3t_1 + t_2)$ и $(5t_1 + t_2 + t_3)$ достигает максимального значения со знаком «минус» $\omega_{\max}^{(3)}$. Вторая производная угловой скорости механизма $\omega_2^{(2)}$ на третьем этапе равна максимально возможному (допустимому) значению $\omega_{\text{доп}}^{(2)}$; на девятом этапе равна максимально возможному (допустимому) значению со знаком «минус» $\omega_{\text{доп}}^{(2)}$, на шестом этапе равна нулю. Первая производная угловой скорости механизма $\omega_2^{(1)}$ на шестом этапе равна максимально возможному (допустимому) значению $\omega_{\text{доп}}^{(1)}$. Угловая скорость механизма ω_2 увеличивается от нуля до максимально возможного (допустимого) значения $\omega_{\text{доп}}$. Угол поворота механизма φ_2 увеличивается от нуля до максимального значения угла поворота механизма при разгоне $\varphi_{\text{разг}}$.

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

$$\omega_2^{(4)}(t) = \omega_{\max}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t;$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^3;$$

$$\omega_2(t) = \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{120} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{со}} + \frac{1}{6} J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^3;$$

$$M_1^{(1)}(t) = \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^2;$$

$$M_1^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot t;$$

$$M_1^{(3)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)};$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{1}{120} t^5 + \frac{1}{6} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot t^3 \right) + \frac{M_{\text{со}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{1}{24} t^4 + \frac{1}{2} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot t^2 \right);$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{1}{6} t^3 + \frac{J_2}{C_y} \cdot t \right);$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{1}{2} t^2 + \frac{J_2}{C_y} \right);$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^3 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t \right];$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right];$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{1}{24} t^4 + \frac{1}{2} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot t^2 \right) + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^3 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t \right] + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right],$$

- где U – напряжение, приложенное к якорной цепи электропривода, В;
 $I_{\text{Я}}$ – ток якорной цепи электропривода, А;
 ω_1 – угловая скорость якоря двигателя, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
 φ_1 – угол поворота якоря двигателя, рад;
 M_y – упругий момент (момент в валопроводе), Н · м;
 M_{CO} – момент сопротивления электропривода, Н · м;
 C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС двигателя, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;
 C_M – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя, В · с;
 $R_{\text{Я}}$ – сопротивление якорной цепи электропривода, Ом;
 $L_{\text{Я}}$ – индуктивность якорной цепи электропривода, Гн;
 J_1 – момент инерции якоря двигателя, кг · м²;
 J_2 – момент инерции исполнительного органа механизма, кг · м²;
 C_y – жесткость валопровода, $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$.

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

$$\omega_2^{(4)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 - \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - t_1);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - t_1)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - t_1)^3;$$

$$\omega_2(t) = \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - t_1)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{120} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^5 + \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^4 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{12} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{12} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1)^3 + \\ + \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^4 - \frac{1}{120} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - t_1)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{co}} + J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - t_1)];$$

$$M_y^{(3)}(t) = -J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)};$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^4 \cdot \left[\frac{1}{120} t_1^5 + \frac{1}{24} t_1^4 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{12} t_1^3 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{12} t_1^2 \cdot (t - t_1)^3 + \frac{1}{24} t_1 \cdot (t - t_1)^4 - \right. \\ \left. - \frac{1}{120} \cdot (t - t_1)^5 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^4 \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{max}}^4 \cdot \left[\frac{1}{24} t_1^4 + \frac{1}{6} t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - t_1)^4 \right] + \\ + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^4 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right];$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\text{max}}^4 \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^4 \cdot [t_1 - (t - t_1)];$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\text{max}}^4 \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^4;$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right] + \right. \\ \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - t_1)] \right\};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right\};$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{24} t_1^4 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - t_1)^4 \right] + \\ + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right] + \\ + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right] + \right. \\ \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - t_1)] \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right\}.$$

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

$$\omega_2^{(4)}(t) = 0;$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = 0;$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 + \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1);$$

$$\omega_2(t) = \frac{7}{12} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^4 + \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^2;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^5 + \frac{7}{12} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^4 \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 2t_1)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^3;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$M_y^{(2)}(t) = 0;$$

$$M_y^{(3)}(t) = 0;$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{4} t_1^5 + \frac{7}{12} t_1^4 \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} t_1^3 \cdot (t - 2t_1)^2 + \frac{1}{6} t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)];$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)] \right\};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^2 \right] + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)] \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2.$$

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

$$\omega_2^{(4)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2);$$

$$\begin{aligned} \omega_2^{(2)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2; \\ \omega_2^{(1)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3; \\ \omega_2(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4; \\ \varphi_2(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^5 + \frac{7}{12} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 \right) + \\ &+ \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 2t_1 - t_2) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 - \\ &- \frac{1}{120} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^5; \\ M_y(t) &= M_{CO} + J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 \right]; \\ M_y^{(1)}(t) &= J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 \right]; \\ M_y^{(2)}(t) &= -J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2); \\ M_y^{(1)}(t) &= -J_2 \omega_{\max}^{(4)}; \\ \varphi_1(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{1}{4} t_1^5 + \frac{7}{12} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 \right) + \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 2t_1 - t_2) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 - \frac{1}{120} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^5 \right] + \\ &+ \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 \right] + \frac{M_{CO}}{C_y}; \\ \omega_1(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 - \right. \\ &- \left. \frac{1}{24} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 \right]; \\ \omega_1^{(1)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2); \\ \omega_1^{(2)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)}; \end{aligned}$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2) \right\};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right\};$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{24} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4 \right] + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 \right] + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 2t_1 - t_2) \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right\}.$$

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

$$\omega_2^{(4)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 3t_1 - t_2);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{4} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{179}{120} t_1^5 + \frac{25}{12} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 \right) + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{12} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4 + \frac{1}{120} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \right];$$

$$\begin{aligned}
 M_y^{(1)}(t) &= J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right]; \\
 M_y^{(2)}(t) &= J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - t_2)]; \\
 M_y^{(3)}(t) &= J_2 \omega_{\max}^{(4)}; \\
 \varphi_1(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{179}{120} t_1^5 + \frac{25}{12} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 \right) + \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{12} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{24} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4 + \frac{1}{120} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^5 \right] + \\
 &\quad + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \\
 \omega_1(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \cdot t \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4 \right] + \\
 &\quad + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right]; \\
 \omega_1^{(1)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \right] + \\
 &\quad + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - t_2)]; \\
 \omega_1^{(2)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)}; \\
 I_{\text{Я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - t_2)] \right\}; \\
 I_{\text{Я}}^{(1)}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right\};
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4 \right] + \\
 & + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - t_2)] \right\} + \\
 & + \frac{L_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right\}.
 \end{aligned}$$

Этап 6. В интервале времени $(4t_1 + t_2) \leq t \leq (4t_1 + t_2 + t_3)$:

$$\omega_2^{(4)}(t) = 0;$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = 0;$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = 0;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2);$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2);$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_2(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{9}{2} t_1^5 + \frac{55}{12} t_1^4 t_2 + \frac{3}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 \cdot t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 4t_1 - t_2) + \\
 & + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2)^2;
 \end{aligned}$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2);$$

$$M_y^{(1)}(t) = 0;$$

$$M_y^{(2)}(t) = 0;$$

$$M_y^{(3)}(t) = 0;$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_1(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^4 \cdot \left[\left(\frac{9}{2} t_1^5 + \frac{55}{12} t_1^4 t_2 + \frac{3}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 \right) + \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 4t_1 - t_2) + \right. \\
 & \left. + \frac{1}{2} (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^4 \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};
 \end{aligned}$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\max}^4 \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2) \right];$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^4 \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2);$$

$$\omega_1^{(2)}(t)=0;$$

$$I_{\text{Я}}(t)=\frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \right];$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t)=0;$$

$$U(t)=C_e \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2) \right] + \\ + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \right];$$

Этап 7. В интервале времени $(4t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (5t_1 + t_2 + t_3)$:

$$\omega_2^{(4)}(t)=-\omega_{\text{max}}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t)=-\omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3);$$

$$\omega_2^{(2)}(t)=-\frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t)=\omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3;$$

$$\omega_2(t)=\omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) - \\ - \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^4;$$

$$\varphi_2(t)=\varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{9}{2} t_1^5 + \frac{55}{22} t_1^4 t_2 + \frac{3}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 + 4t_1^4 t_3 + 3t_1^3 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \\ + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{120} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^5;$$

$$M_y(t)=M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[(2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t)=-\frac{1}{2} \cdot J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2;$$

$$M_y^{(2)}(t)=-J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3);$$

$$M_y^{(3)}(t)=-J_2 \omega_{\text{max}}^{(4)};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(\tau\tau)=\frac{1}{C_M} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\mu\alpha\xi}^{(4)} \cdot (\tau - 4\tau_1 - \tau_2 - \tau_3)^2 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\mu\alpha\xi}^{(4)} \right];$$

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{9}{2} t_1^5 + \frac{55}{12} t_1^4 t_2 + \frac{3}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 + 4t_1^4 t_3 + 3t_1^3 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \cdot (2t_1^3 + 2t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{120} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^5 \right] + \\ + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[(2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) - \right. \\ \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^4 \right] - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2; \end{aligned}$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[(2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3);$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)};$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[(2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) \right\};$$

$$\begin{aligned} U(t) = C_e \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + (2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) - \right. \\ \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^4 \right] - \frac{1}{2} C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 + \\ + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[(2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] - \right. \\ \left. - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[-\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right]. \end{aligned}$$

Этап 8. В интервале времени $(5t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + t_2 + t_3)$:

$$\omega_2^{(4)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2;$$

$$\begin{aligned} \omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3; \end{aligned}$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{1139}{120} t_1^5 + \frac{97}{12} t_1^4 t_2 + 2t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 + 6t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{12} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4 + \frac{1}{120} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - t_2 - t_3)];$$

$$M_y^{(3)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)};$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{1139}{120} t_1^5 + \frac{97}{12} t_1^4 t_2 + 2t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 + 6t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{12} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 - \frac{1}{24} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4 + \frac{1}{120} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^5 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right];$$

$$\begin{aligned}
 \omega_1^{(1)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 \cdot t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - t_2 - t_3)]; \\
 \omega_1^{(2)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)}; \\
 I_{\text{Я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) \right] - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right\} + \\
 &\quad \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - t_2 - t_3)] \right\}; \\
 I_{\text{Я}}^{(1)}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right\}; \\
 U(t) &= C_e \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4 \right] + \\
 &\quad + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + \\
 &\quad + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) \right] - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right\} + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - t_2 - t_3)] \right\} + \\
 &\quad + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right\}.
 \end{aligned}$$

Этап 9. В интервале времени $(6t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + 2t_2 + t_3)$:

$$\omega_2^{(4)}(t) = 0;$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = 0;$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) - \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 (t - 6t_1 - t_2 - t_3);;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^2;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{65}{4} t_1^5 + \frac{151}{12} t_1^4 t_2 + \frac{5}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 + 8t_1^4 t_3 + 5t_1^3 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^3;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = -J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;;$$

$$M_y^{(2)}(t) = 0;;$$

$$M_y^{(3)}(t) = 0;;$$

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{65}{4} t_1^5 + \frac{151}{12} t_1^4 t_2 + \frac{5}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^2 t_2^3 + 8t_1^4 t_3 + 5t_1^3 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right];$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right] \right\};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = -\frac{1}{C_M} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$U(t) = C_e \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] - C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}}}{C_M} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2.$$

Этап 10. В интервале времени $(6t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (7t_1 + 2t_2 + t_3)$:

$$\omega_2^{(4)}(t) = \omega_{\max}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 - \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{65}{4} t_1^5 + 20t_1^4 t_2 + 8t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 8t_1^4 t_3 + 7t_1^3 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \\ + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 + \\ + \frac{1}{120} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3);$$

$$M_y^{(3)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)};$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3);$$

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{65}{4} t_1^5 + 20 t_1^4 t_2 + 8 t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 8 t_1^4 t_3 + 7 t_1^3 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ & \left. + \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} t_1^3 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{120} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^5 \right] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1(t) = & \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + t_1^3 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{24} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \right] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right]; \end{aligned}$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)};$$

$$\begin{aligned} I_{\text{Я}}(t) = & \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) \right\}; \end{aligned}$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right\};$$

$$\begin{aligned} U(t) = & C_e \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + t_1^3 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \\ & \left. - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{24} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \right] + \\ & + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \\ & + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) \right\} + \\ & + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right\}. \end{aligned}$$

Этап 11. В интервале времени $(7t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (8t_1 + 2t_2 + t_3)$:

$$\omega_2^{(4)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)};$$

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 - \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\frac{1}{2}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 -$$

$$-\frac{1}{6}\omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{191}{24}t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) + \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) -$$

$$-\frac{1}{4}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 -$$

$$-\frac{1}{24}\omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{2881}{120}t_1^5 + 26t_1^4t_2 + 9t_1^3t_2^2 + t_1^2t_2^3 + 10t_1^4t_3 + 8t_1^3t_2t_3 + \frac{3}{2}t_1^2t_2^2t_3 + t_1^3t_2^2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2t_3^2 \right) +$$

$$+ \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{191}{24}t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) +$$

$$+ \frac{1}{12}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{12}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 +$$

$$+ \frac{1}{24}\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4 - \frac{1}{120}\omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2\omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{6}t_1^3 - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \right.$$

$$\left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2\omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2\omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)];$$

$$M_y^{(3)}(t) = -J_2\omega_{\max}^{(4)};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] - \frac{J_1J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right\};$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)};$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_1(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{2881}{120} t_1^5 + 26t_1^4 t_2 + 9t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 10t_1^4 t_3 + 8t_1^3 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\
 &\quad + \left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \\
 &\quad + \frac{1}{12} t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{12} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 + \\
 &\quad \left. + \frac{1}{24} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4 - \frac{1}{120} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^5 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \\
 &\quad \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \\
 \omega_1(t) &= \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \frac{1}{6} t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \\
 &\quad - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \\
 &\quad \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \right] + \\
 &\quad + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right]; \\
 \omega_1^{(1)}(t) &= \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)]; \\
 I_{\text{Я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)] \right\}; \\
 U(t) &= C_e \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \frac{1}{6} t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \\
 &\quad - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \\
 &\quad \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \right] + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \\
 &\quad \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + \\
 &\quad + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)] \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \\
 &\quad \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right\}.
 \end{aligned}$$

Третья производная угловой скорости исполнительного органа механизма в конце первого этапа равна $\omega_{21}^{(3)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1$.

Вторая производная угловой скорости исполнительного органа механизма в конце второго этапа равна $\omega_{22}^{(2)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2$.

Первая производная угловой скорости исполнительного органа механизма в конце пятого этапа равна $\omega_{25}^{(1)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2)$.

Угловая скорость исполнительного органа механизма в конце одиннадцатого этапа равна $\omega_{211} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3)$.

Угол поворота исполнительного органа механизма в конце одиннадцатого этапа равен:

$$\varphi_{211} = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(32t_1^5 + 32t_1^4 t_2 + 10t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 12t_1^4 t_3 + 9t_1^3 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right).$$

Ток якорной цепи электропривода в конце пятого этапа равен

$$I_{Я5} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{CO} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2)].$$

Так как $\omega_{21}^{(3)} = \omega_{\max}^{(3)}$, то $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1$.

Так как $\omega_{22}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, то $\omega_{\text{доп}}^{(2)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2$.

Так как $\omega_{25}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$, то $\omega_{\text{доп}}^{(1)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_2)$.

Так как $\omega_{211} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$, то $\omega_{\text{доп}}^{(1)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (4t_1 + t_2 + t_3)$.

Так как $(\varphi_{211} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{разг}}$, то

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{разг}} &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(32t_1^5 + 32t_1^4 t_2 + 10t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 12t_1^4 t_3 + 9t_1^3 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) = \\ &= \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \left(4t_1 + t_2 + \frac{1}{2} t_3 \right). \end{aligned}$$

Так как $I_{Я5} = I_{\text{доп}}$, то $C_M \cdot I_{\text{доп}} = M_{CO} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2)$, или $C_M \cdot I_{\text{доп}} = M_{CO} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(1)}$.

Таким образом, для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа механизма справедливы зависимости:

$$\begin{aligned} t_1 &= \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}}; \quad t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}}; \quad t_3 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}}; \\ t_{\text{разг}} &= \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}}; \quad \omega_{\max}^{(3)} = \sqrt{\omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot \omega_{\max}^{(4)}}; \quad \varphi_{\text{разг}} = \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot t_{\text{разг}}. \end{aligned}$$

В данной работе рассматривается электропривод постоянного тока с упругим валопроводом имеющий следующие параметры:

$$C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; \quad C_M = 1,25 \text{В} \cdot \text{с}; \quad R_{Я} = 5 \text{Ом}; \quad L_{Я} = 0,1 \text{Гн}; \quad J_1 = 0,025 \text{кг} \cdot \text{м}^2; \quad J_2 = 0,025 \text{кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$C_y = 4 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}; \quad U_{\text{доп}} = 250 \text{В}; \quad I_{\text{доп}} = 8 \text{А}; \quad \omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{\text{доп}}^{(1)} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad \omega_{\text{доп}}^{(2)} = 400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

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

Если $\varphi_{\text{нач}} = 0 \text{ рад}$ и $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 160000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,05 \text{ с}; t_2 = 0,15 \text{ с}; t_3 = 0,25 \text{ с};$
 $t_{\text{разг}} = 1,95 \text{ с}; \omega_{\text{max}}^{(3)} = 8000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}; \varphi_{\text{разг}} = 156 \text{ рад}.$

В конце десятого этапа угловая скорость якоря двигателя, ток и напряжение имеют следующие значения:

$$\omega_{110} = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2;$$

$$I_{\text{я}10} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^3 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \right];$$

$$U_{10} = C_e \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot \left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \frac{1}{2} C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^3 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1 \right] + \frac{L_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[-\frac{1}{2} (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(4)} \right].$$

В работе выполнен численный эксперимент с целью определения зависимостей $I_{\text{я}10} = f_1[\omega_{\text{max}}^{(4)}]$ и $U_{10} = f_2[\omega_{\text{max}}^{(4)}]$.

Следует иметь в виду, что значения токов в конце первого этапа и в конце десятого этапа равны.

Приведем результаты численного эксперимента.

Если $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 160000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,05 \text{ с}; t_2 = 0,15 \text{ с}; t_3 = 1,25 \text{ с}; t_{\text{разг}} = 1,95 \text{ с};$
 $\varphi_{\text{разг}} = 156 \text{ рад}; \omega_{110} = 158 \frac{17 \text{ рад}}{24 \text{ с}}; I_{\text{я}1} = I_{\text{я}10} = 5 \frac{2}{15} \cdot \text{А}; U_{10} = 225 \frac{121}{480} \cdot \text{В}.$

Если $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 250000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,04 \text{ с}; t_2 = 0,17 \text{ с}; t_3 = 1,27 \text{ с}; t_{\text{разг}} = 1,93 \text{ с};$
 $\varphi_{\text{разг}} = 154,4 \text{ рад}; \omega_{110} = 158 \frac{217 \text{ рад}}{300 \text{ с}}; I_{\text{я}1} = I_{\text{я}10} = 5 \frac{107}{300}; U_{10} = 227 \frac{41}{80} \cdot \text{В}.$

Если $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,025 \text{ с}; t_2 = 0,2 \text{ с}; t_3 = 1,3 \text{ с}; t_{\text{разг}} = 1,95 \text{ с};$
 $\varphi_{\text{разг}} = 152 \text{ рад}; \omega_{110} = 158 \frac{71 \text{ рад}}{96 \text{ с}}; I_{\text{я}1} = I_{\text{я}10} = 6 \frac{1}{15} \cdot \text{А}; U_{10} = 235 \frac{613}{640} \cdot \text{В}.$

Если $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 1000000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,02 \text{ с}; t_2 = 0,21 \text{ с}; t_3 = 1,31 \text{ с}; t_{\text{разг}} = 1,89 \text{ с};$
 $\varphi_{\text{разг}} = 151,2 \text{ рад}; \omega_{110} = 158 \frac{223 \text{ рад}}{300 \text{ с}}; I_{\text{я}1} = I_{\text{я}10} = 6 \frac{83}{150} \cdot \text{А}; U_{10} = 242 \frac{43}{48} \cdot \text{В}.$

Если $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 1391694,347 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,016953449 \text{ с}; t_2 = 0,216093102 \text{ с};$
 $t_3 = 1,316093102 \text{ с}; t_{\text{разг}} = 1,883906898 \text{ с}; \varphi_{\text{разг}} = 151,7125518 \text{ рад}; \omega_{110} = 158,7452097 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$
 $I_{\text{я}1} = I_{\text{я}10} = 6,994461589 \cdot \text{А}; U_{10} = 250 \cdot \text{В}.$

Если $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 1562500 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,016 \text{ с}; t_2 = 0,218 \text{ с}; t_3 = 1,318 \text{ с}; t_{\text{разг}} = 1,882 \text{ с};$
 $\varphi_{\text{разг}} = 150,56 \text{ рад}; \omega_{110} = 158 \frac{5593 \text{ рад}}{7500 \text{ с}}; I_{\text{я}1} = I_{\text{я}10} = 7 \frac{503}{3000} \cdot \text{А}; U_{10} = 253 \frac{7}{4000} \cdot \text{В}.$

Если $\omega_{\max}^{(4)} = 2517152,529 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,012605939\text{с}$; $t_2 = 0,224788122\text{с}$;
 $t_3 = 1,324788122\text{с}$; $t_{\text{разг}} = 1,875211878\text{с}$; $\varphi_{\text{разг}} = 150,0169502\text{рад}$; $\omega_{110} = 158,7473515 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
 $I_{Я1} = I_{Я10} \approx 8 \cdot \text{А}$; $U_{10} = 269,098596 \cdot \text{В}$.

Если $\omega_{\max}^{(4)} = 2560000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$, то $t_1 = 0,0125\text{с}$; $t_2 = 0,225\text{с}$; $t_3 = 1,325\text{с}$;
 $t_{\text{разг}} = 1,875\text{с}$; $\varphi_{\text{разг}} = 150\text{рад}$; $\omega_{110} = 158 \frac{287\text{рад}}{384\text{с}}$; $I_{Я1} = I_{Я10} \equiv 8 \frac{1}{30} \cdot \text{А}$; $U_{10} = 269 \frac{6151}{7680} \cdot \text{В}$.

На рисунке 1 построена зависимость $I_{Я10} = f_1[\omega_{\max}^{(4)}]$, а на рисунке 2 построена зависимость $U_{10} = f_2[\omega_{\max}^{(4)}]$.

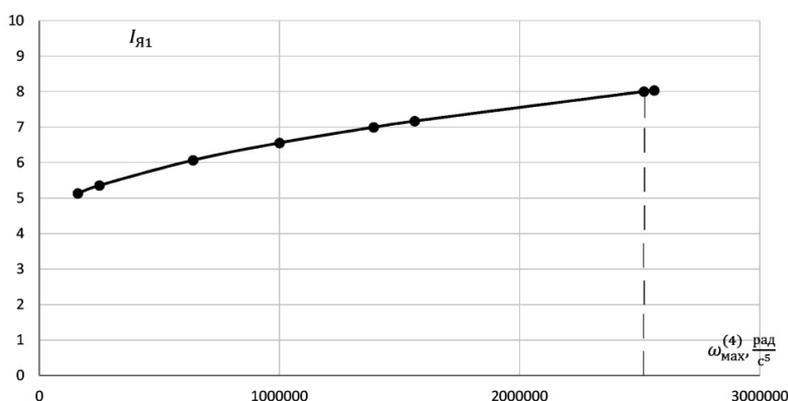


Рисунок 1 – Зависимость значений токов в конце первого и десятого этапов от максимального значения четвертой производной угловой скорости при обработке оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа механизма $I_{Я10} = f_1[\omega_{\max}^{(4)}]$

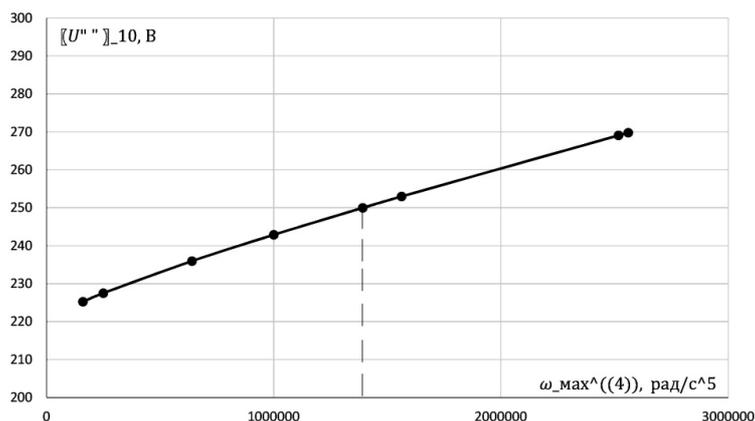


Рисунок 2 – Зависимость значения напряжения в конце десятого этапа от максимального значения четвертой производной угловой скорости при обработке оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа механизма $U_{10} = f_2[\omega_{\max}^{(4)}]$

Полученные зависимости позволяют выбирать значение четвертой производной угловой скорости механизма с пониманием сути протекающих процессов в электроприводе.