

УДК 62

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



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

Добробаба Юрий Петрович

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

Зарудный Владимир Юрьевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет

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

Аннотация. В работе рассматриваются последние одиннадцать этапов при торможении электропривода постоянного тока с упругим валопроводом при движении его исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой перемещения. При торможении от максимально допустимой угловой скорости до нуля имеются ограничения по первой, второй и четвертой производным скорости исполнительного органа механизма. Определена зависимость длительности цикла (с учетом разгона, установившегося движения и торможения) от максимального значения четвертой производной угловой скорости механизма.

Ключевые слова: аналитические зависимости контролируемых координат, электропривод постоянного тока с упругим валопроводом.

Annotation. The paper considers the last eleven stages when braking a DC electric drive with an elastic shaft line when moving its executive body in accordance with the optimal speed diagram of movement. When braking from the maximum permissible angular velocity to zero, there are restrictions on the first, second and fourth derivatives of the speed of the executive body of the mechanism. The dependence of the cycle duration (taking into account acceleration, steady motion and braking) on the maximum value of the fourth derivative of the angular velocity of the mechanism is determined.

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

Оптимальное по быстродействию перемещение исполнительного органа механизма электропривода постоянного тока с упругим валопроводом при ограничениях по скорости и её первой, второй и четвертой производных осуществляется за двадцать три этапа: одиннадцать этапов разгона; установившееся движение; одиннадцать этапов торможения.

В данной работе рассматриваются одиннадцать этапов при торможении электропривода.

Четвертая производная угловой скорости механизма $\omega_2^{(4)}$ на этапах четырнадцатом, шестнадцатом, девятнадцатом и двадцать третьем принимает максимальное значение $\omega_{\max}^{(4)}$; на этапах тринадцатом, семнадцатом, двадцатом и двадцать втором принимает максимальное значение со знаком «минус» $\omega_{\max}^{(4)}$; на этапах пятнадцатом, восемнадцатом и двадцать первом равна нулю. Длительность тринадцатого, четырнадцатого, шестнадцатого, семнадцатого, девятнадцатого, двадцатого, двадцать второго и двадцать третьего этапов равна t_1 ; длительность пятнадцатого и двадцать первого этапов равна t_2 ; длительность восемнадцатого этапа равна t_3 . Третья производная угловой скорости механизма $\omega_2^{(3)}$ в моменте времени $t = (3t_1 + t_2)$ и $t = (5t_1 + t_2 + t_3)$ дос-

стигает максимального значения $\omega_{\text{MAX}}^{(3)}$; в моменты времени $t = t_1$ и $t = (7t_1 + 2t_2 + t_3)$ достигает максимального значения со знаком «минус» $\omega_{\text{MAX}}^{(3)}$. Вторая производная угловой скорости механизма $\omega_2^{(2)}$ на двадцать первом этапе равна максимально возможному (допустимому) значению $\omega_{\text{ДОП}}^{(2)}$; на пятнадцатом этапе равна максимально возможному (допустимому) значению со знаком «минус» $\omega_{\text{ДОП}}^{(2)}$; на восемнадцатом этапе равна нулю. Первая производная угловой скорости механизма $\omega_2^{(1)}$ на восемнадцатом этапе равна максимально возможному (допустимому) значению со знаком «минус» $\omega_{\text{ДОП}}^{(1)}$. Угловая скорость механизма ω_2 уменьшается от максимально возможного (допустимого) значения $\omega_{\text{ДОП}}$ до нуля. Угол поворота механизма φ_2 увеличивается до конечного значения угла поворота механизма $\varphi_{\text{КОН}}$.

Этап 13. В интервале времени $(8t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (9t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4)$:

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = -\frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) - \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^4;$$

$$\begin{aligned} \varphi_2(t) = \varphi_{\text{НАЧ}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(32t_1^5 + 32t_1^4 t_2 + 10t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 12t_1^4 t_3 + 9t_1^3 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot t_4 \right] + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \\ \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{120} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^5; \end{aligned}$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} - \frac{1}{6} J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3;$$

$$M_y^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$M_y^{(2)}(t) = -J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4);$$

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

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) = \varphi_{\text{НАЧ}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(32t_1^5 + 32t_1^4 t_2 + 10t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 12t_1^4 t_3 + 9t_1^3 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot t_4 + \right. \\ \left. + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{120} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^5 \right] - \\ - \frac{1}{6} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \end{aligned}$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \frac{1}{24} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^4 \right] - \frac{1}{2} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = -\frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)};$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} - \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) \right];$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = -\frac{1}{C_M} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right];$$

$$U(t) = C_e \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \frac{1}{24} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^4 \right] - \frac{1}{2} C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} - \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) \right] - \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 8t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right];$$

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, $\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$;
 t_4 – длительность двенадцатого этапа, с.

Этап 14. В интервале времени $(9t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (10t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4)$:

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\frac{1}{2}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = -\frac{1}{6}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{191}{24}t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) - \frac{1}{6}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{4}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{4799}{120}t_1^5 + 38t_1^4t_2 + 11t_1^3t_2^2 + t_1^2t_2^3 + 14t_1^4t_3 + 10t_1^3t_2t_3 + \frac{3}{2}t_1^2t_2^2t_3 + t_1^3t_3^2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2t_3^2 \right) + (8t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3) \cdot t_4 \right] + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{191}{24}t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{12}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{12}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^4 + \frac{1}{120}\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{6}t_1^3 - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 \right]$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)];$$

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

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{4799}{120}t_1^5 + 38t_1^4t_2 + 11t_1^3t_2^2 + t_1^2t_2^3 + 14t_1^4t_3 + 10t_1^3t_2t_3 + \frac{3}{2}t_1^2t_2^2t_3 + t_1^3t_3^2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2t_3^2 \right) + (8t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3) \cdot t_4 + \left(\frac{191}{24}t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{12}t_1^3 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{12}t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24}t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^4 + \frac{1}{120} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^5 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{6}t_1^3 - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\begin{aligned}
 \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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)]; \\
 \omega_1^{(2)}(t) &= \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)}; \\
 I_{\text{Я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \{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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)] \}; \\
 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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\}; \\
 U(t) &= C_e \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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^4 \right] + \\
 &\quad + 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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \\
 &\quad + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \{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 - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)] \} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 9t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\}.
 \end{aligned}$$

Этап 15. В интервале времени $(10t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (10t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4)$:

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

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

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

$$\omega_2^{(1)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\begin{aligned}
 \omega_2(t) &= \omega_{\text{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_{\text{Max}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot \\
 &\cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2; \\
 \varphi_2(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{191}{4} t_1^5 + 44t_1^4 t_2 + 12t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 16t_1^4 t_3 + 11t_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(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 \right) \cdot t_4 \right] + \omega_{\text{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 \\
 &\cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3; \\
 M_y(t) &= M_{\text{CO}} - J_2 \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) \right]; \\
 M_y^{(1)}(t) &= -J_2 \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot t_1^2; \\
 M_y^{(2)}(t) &= 0; \\
 M_y^{(3)}(t) &= 0; \\
 \varphi_1(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{191}{4} t_1^5 + 44t_1^4 t_2 + 12t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2^3 + 16t_1^4 t_3 + 11t_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(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 \right) \cdot t_4 \right] + \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 - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1^3 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^3 \Big] - \\
 &- \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \\
 \omega_1(t) &= \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\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) - t_1^3 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\
 &\left. - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot t_1^2; \\
 \omega_1^{(1)}(t) &= -\omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) \right]; \\
 \omega_1^{(2)}(t) &= -\omega_{\text{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_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) \right] \right\}; \\
 I_{\text{Я}}^{(1)}(t) &= -\frac{1}{C_M} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot t_1^2;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - t_1^3 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] - C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \\
 & \cdot \left\{ M_{\text{CO}} - (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) \right] \right\} - \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

Этап 16. В интервале времени $(10t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (11t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4)$:

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$\begin{aligned}
 \omega_2^{(1)}(t) = & -\omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) - \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \\
 & + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_2(t) = & \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot \\
 & \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 + \\
 & + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^4;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_2(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{191}{4} t_1^5 + \frac{617}{12} t_1^4 t_2 + \frac{35}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 16t_1^4 t_3 + 13t_1^3 t_2 t_3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\
 & + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 \left. \right] + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot \\
 & \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot \\
 & \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{120} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^5;
 \end{aligned}$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{6} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 10t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4);$$

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

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{191}{4} t_1^5 + \frac{617}{12} t_1^4 t_2 + \frac{35}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 16 t_1^4 t_3 + 13 t_1^3 t_2 t_3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ & + \left(8 t_1^4 + 6 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 + \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5 t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) - \\ & - \frac{1}{2} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot t_1^2 \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{120} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^5 \Big] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{6} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1(t) = & \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5 t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\ & - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{24} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^4 \Big] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1^{(1)}(t) = & \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{6} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4); \end{aligned}$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)};$$

$$\begin{aligned} I_{\text{Я}}(t) = & \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{6} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) \right\}; \end{aligned}$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\};$$

$$\begin{aligned} U(t) = & C_e \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5 t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\ & - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{24} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^4 \Big] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \end{aligned}$$

$$\cdot \left[- t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M}.$$

$$\begin{aligned} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) - t_1^2 \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{6} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \right. \\ \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4) \right\} + \end{aligned}$$

$$+ \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 10 t_1 - 3 t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\}.$$

Этап 17. В интервале времени $(11t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (12t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4)$:

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{4} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{6541}{120} t_1^5 + \frac{671}{12} t_1^4 t_2 + 18t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 18t_1^4 t_3 + 14t_1^3 t_2 t_3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_2^2 \right) + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 \right] + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{12} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^4 - \frac{1}{120} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)];$$

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

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{6541}{120} t_1^5 + \frac{671}{12} t_1^4 t_2 + 18t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 18t_1^4 t_3 + 14t_1^3 t_2 t_3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_2^2 \right) + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 + \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{12} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24} t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^4 - \frac{1}{120} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^5 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot$$

$$\left[-\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^4 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right];$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)];$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)};$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)] \right\};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\};$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^4 \right] + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)] \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 11t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\}.$$

Этап 18. В интервале времени $(12t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (12t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4)$:

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

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

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

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

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{119}{2} t_1^5 + \frac{713}{12} t_1^4 t_2 + \frac{37}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 20t_1^4 t_3 + 15t_1^3 t_2 t_3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot t_4 \right] + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot \\ \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

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

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

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

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

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{119}{2} t_1^5 + \frac{713}{12} t_1^4 t_2 + \frac{37}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 20t_1^4 t_3 + 15t_1^3 t_2 t_3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2^2 t_3 + t_1^3 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot t_4 + \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) \right];$$

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

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

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

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - t_3 - t_4) \right] + \\ + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} - (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \right]$$

Этап 19. В интервале времени $(12t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4) \leq t \leq (13t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4)$:

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \\ + \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{119}{2} t_1^5 + \frac{713}{12} t_1^4 t_2 + \frac{37}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot t_4 \right] + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \\ \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{120} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{1}{6} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = \frac{1}{2} J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2;$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4);$$

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

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{119}{2} t_1^5 + \frac{713}{12} t_1^4 t_2 + \frac{37}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot t_4 + \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot \right. \\ \left. \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{120} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^5 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \\ \cdot \left[- (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{1}{6} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \right. \\ \left. + \frac{1}{24} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + \frac{1}{2} \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2;$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{1}{6} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4);$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \frac{1}{2} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)};$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{1}{6} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \right. \\ \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) \right\};$$

$$\begin{aligned}
 I_{\text{Я}}^{(1)}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right]; \\
 U(t) &= C_e \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{24} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + \frac{1}{2} C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \\
 &\quad \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \\
 &\quad \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{1}{6} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) \right\} + \\
 &\quad + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 12t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right].
 \end{aligned}$$

Этап 20. В интервале времени $(13t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4) \leq t \leq (14t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4)$:

$$\begin{aligned}
 \omega_2^{(4)}(t) &= -\omega_{\text{MAX}}^{(4)}; \\
 \omega_2^{(3)}(t) &= \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4); \\
 \omega_2^{(2)}(t) &= \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \\
 &\quad - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2; \\
 \omega_2^{(1)}(t) &= -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \\
 &\quad + \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3; \\
 \omega_2(t) &= \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \\
 &\quad + \frac{1}{4} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 - \\
 &\quad - \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^4;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_y(t) &= M_{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 - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1 \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right]; \\
 M_y^{(1)}(t) &= J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right]; \\
 M_y^{(2)}(t) &= J_2 \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)]; \\
 M_y^{(3)}(t) &= -J_2 \omega_{\max}^{(4)}; \\
 \varphi_1(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{7501}{120} t_1^5 + \frac{743}{12} t_1^4 t_2 + 19 t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 24 t_1^4 t_3 + 18 t_1^3 t_2 t_3 + 3 t_1^2 t_2^2 t_3 + 2 t_1^3 t_3^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\
 &\quad \left. + (8 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) \cdot t_4 + \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{12} t_1^2 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24} t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{120} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^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 - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{M_{CO}}{C_y}; \\
 \omega_1(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2 t_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 - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \\
 &\quad \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^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 - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{6} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)]; \\
 \omega_1^{(2)}(t) &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)}; \\
 I_{\text{Я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{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 - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)] \right\};
 \end{aligned}$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\};$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot [t_1 - (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)] \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \cdot (t - 13t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\}.$$

Этап 21. В интервале времени $(14t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4) \leq t \leq (14t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4)$:

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

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

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

$$\omega_2^{(1)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 14t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{255}{4} t_1^5 + \frac{761}{12} t_1^4 t_2 + \frac{39}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \cdot t_4 \right] + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 14t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 14t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4)^3;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- \left(t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 3t_2 - 2t_3 - t_4) \right];$$

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

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

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

$$\begin{aligned} \varphi_1(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{255}{4} t_1^5 + \frac{761}{12} t_1^4 t_2 + \frac{39}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{11}{6} t_1^2 t_2^3 + 24 t_1^4 t_3 + 18 t_1^3 t_2 t_3 + 3 t_1^2 t_2^2 t_3 + 2 t_1^3 t_3^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ & + \left(8 t_1^4 + 6 t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2 t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 + \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4) - \\ & - \frac{1}{2} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4)^3 \left. \right] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4) \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1(t) = & \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2; \end{aligned}$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4) \right];$$

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

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4) \right] \right\};$$

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

$$\begin{aligned} U(t) = & C_e \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4) + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4)^2 \right] + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \\ & \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[- (t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 3 t_2 - 2 t_3 - t_4) \right] \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2. \end{aligned}$$

Этап 22. В интервале времени $(14 t_1 + 4 t_2 + 2 t_3 + t_4) \leq t \leq (15 t_1 + 4 t_2 + 2 t_3 + t_4)$:

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14 t_1 - 4 t_2 - 2 t_3 - t_4);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14 t_1 - 4 t_2 - 2 t_3 - t_4)^2;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 14 t_1 - 4 t_2 - 2 t_3 - t_4) - \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14 t_1 - 4 t_2 - 2 t_3 - t_4)^3;$$

$$\omega_2(t) = \frac{7}{12} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^4 - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 14 t_1 - 4 t_2 - 2 t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot$$

$$\cdot (t - 14 t_1 - 4 t_2 - 2 t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14 t_1 - 4 t_2 - 2 t_3 - t_4)^4;$$

$$\varphi_2(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{255}{4} t_1^5 + 64t_1^4 t_2 + 20t_1^3 t_2^2 + 2t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_3^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 \right] + \frac{7}{12} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^4 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot \\ \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{120} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^5;$$

$$M_y(t) = M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{6} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right];$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = -J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4);$$

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

$$\varphi_1(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{255}{4} t_1^5 + 64t_1^4 t_2 + 20t_1^3 t_2^2 + 2t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_3^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 + \frac{7}{12} t_1^4 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1^3 \cdot \right. \\ \left. \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{120} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^5 \right] + \\ + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{6} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\frac{7}{12} t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \right. \\ \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right];$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{6} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] - \\ - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4);$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)};$$

$$I_{\text{Я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{6} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] - \right. \\ \left. - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) \right\};$$

$$I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\};$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\frac{7}{12} t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{R_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \\
 & \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{6} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] - \right. \\
 & \left. - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) \right\} + \frac{L_{\text{Я}}}{C_M} \cdot \\
 & \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 14t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \right\}.
 \end{aligned}$$

Этап 23. В интервале времени $(15t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4) \leq t \leq (16t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4)$:

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4);$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2;$$

$$\begin{aligned}
 \omega_2^{(1)}(t) = & -\frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot \\
 & \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega_2(t) = & \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^4 - \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{4} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot \\
 & \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 + \\
 & + \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^4;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_2(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{7679}{120} t_1^5 + 64t_1^4 t_2 + 20t_1^3 t_2^2 + 2t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_2^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\
 & + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 \left. \right] + \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^4 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{12} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^3 \cdot \\
 & \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{12} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot t_1 \cdot \\
 & \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^4 + \frac{1}{120} \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^5;
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_y(t) = & M_{\text{CO}} + J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1 \cdot \right. \\
 & \left. \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right];
 \end{aligned}$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\text{MAX}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right];$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)];$$

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

$$\begin{aligned} \Phi_1(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\left(\frac{7679}{120} t_1^5 + 64t_1^4 t_2 + 20t_1^3 t_2^2 + 2t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_3^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\ & + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 + \frac{1}{24} t_1^4 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{12} t_1^3 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \\ & + \frac{1}{12} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 - \frac{1}{24} t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^4 + \frac{1}{120} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^5 \Big] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{M_{\text{CO}}}{C_y}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1(t) = & \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{24} t_1^4 - \frac{1}{6} t_1^3 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \right. \\ & \left. - \frac{1}{6} t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + \\ & + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_1^{(1)}(t) = & \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{6} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)]; \end{aligned}$$

$$\omega_1^{(2)}(t) = \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)};$$

$$\begin{aligned} I_{\text{Я}}(t) = & \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)] \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{\text{Я}}^{(1)}(t) = & \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{Max}}^{(4)} \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{24} t_1^4 - \frac{1}{6} t_1^3 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{4} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 - \right. \\
 & \left. - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(4)} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^4 \right] + \\
 & + C_e \cdot \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[-\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot [-t_1 + (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)] \right\} + \frac{L_{\text{я}}}{C_M} \cdot \\
 & \cdot \left\{ (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - 15t_1 - 4t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(4)} \right\}.
 \end{aligned}$$

В статье «Исследование зависимостей контролируемых координат электропривода постоянного тока с упругим валопроводом от времени при разгоне», приведенной в данном журнале, определены параметры оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа механизма электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и её первой, второй и четвертой производным при разгоне.

В конце двадцать третьего этапа для угла поворота исполнительного органа механизма справедлива зависимость

$$\begin{aligned}
 \varphi_{223} = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(4)} \cdot \left[\left(64t_1^5 + 64t_1^4 t_2 + 20t_1^3 t_2^2 + 2t_1^2 t_2^3 + 24t_1^4 t_3 + 18t_1^3 t_2 t_3 + 3t_1^2 t_2^2 t_3 + 2t_1^3 t_3^2 + t_1^2 t_2 t_3^2 \right) + \right. \\
 \left. + \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot t_4 \right].
 \end{aligned}$$

Или

$$\varphi_{223} = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max} \cdot \left(8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) \cdot (8t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4).$$

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

$$\varphi_{223} = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}} \cdot (8t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4).$$

Так как $\varphi_{223} = \varphi_{\text{кон}}$, то

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \omega_{\text{доп}} \cdot (8t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4).$$

Отсюда следует, что

$$t_4 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - 8t_1 - 2t_2 - t_3.$$

Или

$$t_4 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{макс}}^{(4)}}}.$$

При этом длительность цикла (разгон, установившееся движение и торможение) равна

$$T_{Ц} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{мак}}^{(4)}}}$$

Если $t_4 = 0$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр}}$.

При этом

$$\varphi_{\text{гр}} = \omega_{\text{доп}} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{мак}}^{(4)}}} \right]$$

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

$$C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}; R_{\text{Я}} = 5 \text{ Ом}; L_{\text{Я}} = 0,1 \text{ Гн};$$

$$J_1 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; J_2 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; C_y = 4 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}; U_{\text{доп}} = 250 \text{ В};$$

$$I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}; \omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \omega_{\text{доп}}^{(1)} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{доп}}^{(2)} = 400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; M_{\text{СО}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

С целью определения зависимости длительности цикла при перемещении исполнительного органа механизма в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой от максимального значения четвертой производной угловой скорости механизма $T_{Ц} = f[\omega_{\text{мак}}^{(4)}]$ выполнен численный эксперимент, результаты которого приведены в таблице. При этом $\varphi_{\text{нач}} = 0$ рад и $\varphi_{\text{кон}} = 360$ рад. На рисунке представлена зависимость $T_{Ц} = f[\omega_{\text{мак}}^{(4)}]$

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента

$\omega_{\text{мак}}^{(4)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_4, \text{ с}$	$T_{Ц}, \text{ с}$
160000	0,05	0,15	1,25	0,3	4,2
250000	0,04	0,17	1,27	0,32	4,18
640000	0,025	0,2	1,3	0,35	4,15
1000000	0,02	0,21	1,31	0,36	4,14
1391694,347	0,016953449	0,216093102	1,316093102	0,366093102	4,133906898
1562500	0,016	0,218	1,318	0,368	4,132
2517152,529	0,012605939	0,224788122	1,324788102	0,374788122	4,125211878
2560000	0,0125	0,225	1,325	0,375	4,125

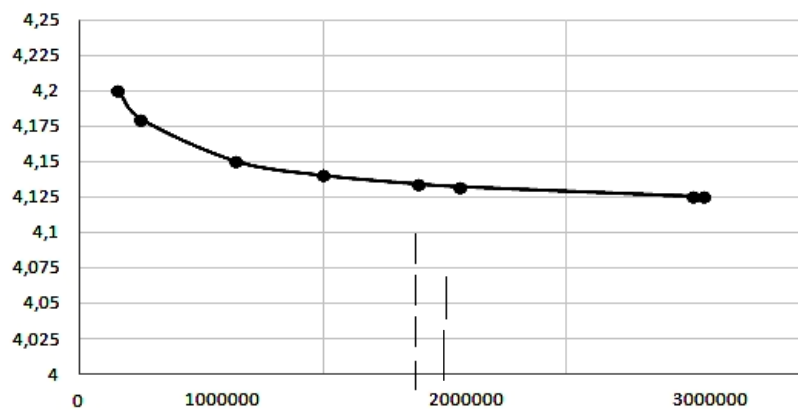


Рисунок 1 – Зависимость $T_{\text{Ц}} = f[\omega_{\max}^{(4)}]$

Анализ полученной зависимости показывает, что вначале при увеличении четвертой производной угловой скорости механизма достигается значительное уменьшение длительности цикла, а затем при увеличении четвертой производной угловой скорости механизма длительность цикла уменьшается не значительно. На рисунке отмечена точка, при которой напряжение достигает максимально допустимого значения.