

УДК 62

**БЛИЗКАЯ К ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ОСОБО ТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО НАПРЯЖЕНИЮ,
ПО МАКСИМАЛЬНОМУ И МИНИМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕНИЯМ ТОКА**



**CLOSE TO THE OPTIMAL SPEED DIAGRAM OF MOVEMENT OF
THE EXECUTIVE BODY OF THE PARTICULARLY ACCURATE ELECTRIC
DRIVE UNDER VOLTAGE LIMITATIONS, AT THE MAXIMUM
AND MINIMUM CURRENT VALUES**

Добробаба Юрий Петрович

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

Кияшко Данил Сергеевич

студент,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. Разработана близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода при ограничении по напряжению, по максимальному и минимальному значениям тока, состоящая из десяти этапов. Предложен алгоритм, позволяющий определить параметры диаграммы.

Ключевые слова: близкая к оптимальной, с ограничением по напряжению, с ограничением по максимальному и минимальному значениям тока, особо точного электропривода, десяти этапная диаграмма.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor
of Department of Power Supply Industrial
Enter Prises,
Kuban State Technological University

Kiyashko Danil Sergeevich

Student,
Kuban State Technological University

Annotation. A diagram of the movement of the executive body of a particularly accurate electric drive with limitation in voltage, maximum and minimum current values, consisting of ten stages, has been developed that is close to optimal in terms of speed. An algorithm is proposed that allows you to determine the parameters of the diagram.

Keywords: close to optimal, with voltage limitation, with maximum and minimum values of current, especially precise electric drive, ten-stage diagram.

В монографии [1] и четырех статьях приведены близкие к оптимальным по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода с ограничениями: по напряжению [2]; по напряжению и максимальному току [3]; по напряжению, максимальному и минимальному токам [4]; по напряжению, максимальному и минимальному токам и скорости [5]. Данные диаграммы разработаны для электроприводов, описываемых дифференциальными уравнениями третьего порядка.

Особо точные программно-управляемые позиционные электропривода описываются дифференциальными уравнениями четвертого порядка. Поэтому необходимо разработать близкие к оптимальным по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точных электроприводов.

В данной работе разработана близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям токам.

На рисунке 1 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока (механические контролируемые координаты).

На рисунке 2 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока (электрические контролируемые координаты).

На рисунках приняты обозначения:

φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;

- ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}}$;
- $\omega^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$;
- $\omega^{(2)}$ – вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$;
- $\omega^{(3)}$ – третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^4}$;
- U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А
- $I_{\text{я}}^{(1)}$ – первая производная тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{\text{А}}{\text{с}}$;
- $M_{\text{со}}$ – момент сопротивления электропривода, Н·м;
- $\varphi_{\text{кон}}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\varphi_{\text{нач}}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- ω_{max} – максимальное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}}$;
- $\omega_{\text{max}}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$;
- $\omega_{\text{min}}^{(1)}$ – минимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$;
- $\omega_{\text{max1}}^{(3)}$ – первое максимальное значение третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^4}$;
- $\omega_{\text{max2}}^{(3)}$ – второе максимальное значение третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^4}$;
- $\omega_{\text{max3}}^{(3)}$ – третье максимальное значение третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^4}$;
- $\omega_{\text{max4}}^{(3)}$ – четвертое максимальное значение третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^4}$;
- $U_{\text{доп}}$ – допустимое значение напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $I_{\text{доп}}$ – допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А;
- t – время, с;
- t_1 – длительность первого и второго этапов, с;
- t_2 – длительность третьего этапа, с;
- t_3 – длительность четвертого и пятого этапов, с;
- t_5 – длительность шестого и седьмого этапов, с;
- t_6 – длительность восьмого этапа, с;
- t_7 – длительность девятого и десятого этапов, с;
- $R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи, Ом.
- $C_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с;
- J – момент инерции исполнительного органа электропривода, кг · м²;
- $C_{\text{е}}$ – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;
- $L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн.
- Характерной особенностью близких к оптимальным по быстрдействию диаграмм является то, что для них справедливы соотношения:

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J};$$

$$\omega_{\min}^{(1)} = -\frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{co}}}{J}$$

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

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\max 1}^{(3)};$$

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} + \frac{1}{2} J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t^2];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t;$$

$$U(t) = \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} + \frac{1}{2} J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t^2] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t.$$

При $t = 0$

$$\omega_0^{(3)} = 0;$$

$$\omega_0^{(2)} = 0;$$

$$\omega_0^{(1)} = 0;$$

$$\omega_0 = 0;$$

$$\varphi_0 = \varphi_{\text{нач}};$$

$$I_{\text{я}0} = \frac{M_{\text{co}}}{C_M};$$

$$I_{\text{я}0}^{(1)} = 0;$$

$$U_0 = \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{C_M}.$$

При $t = t_1$

$$\omega_1^{(3)} = \omega_{\max 1}^{(3)};$$

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

$$\omega_1^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_1 = \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3; \tag{3}$$

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{24} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^4;$$

$$I_{\text{я}1} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} + \frac{1}{2} J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2];$$

$$I_{\text{я}1}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$U_1 = \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} + \frac{1}{2} J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1.$$

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

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\max 1}^{(3)};$$

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

$$\begin{aligned}\omega^{(1)}(t) &= \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t - t_1)^2; \\ \omega(t) &= \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t - t_1)^3; \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{24} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{4} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 + \\ &\quad + \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t - t_1)^4; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{сo}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right] \right\}; \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - t_1)]; \\ U(t) &= C_{\text{е}} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right] + \\ &+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \left\{ M_{\text{сo}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^2 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max 1}^{(3)} [t_1 - (t - t_1)].\end{aligned}$$

При $t = 2t_1$

$$\begin{aligned}\omega_2^{(3)} &= -\omega_{\max 1}^{(3)}; \\ \omega_2^{(2)} &= 0; \\ \omega_2^{(1)} &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2;\end{aligned} \tag{5}$$

$$\omega_2 = \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3; \tag{4}$$

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

$$I_{\text{я}2} = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{сo}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2];$$

$$I_{\text{я}2}^{(1)} = 0;$$

$$U_2 = C_{\text{е}} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{сo}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2].$$

Так как $I_{\text{я}2} = I_{\text{доп}}$, то

$$\begin{aligned}I_{\text{доп}} &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{сo}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2]; \\ \omega_{\max 1}^{(3)} &= \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J \cdot t_1^2}.\end{aligned} \tag{2}$$

При этом

$$I_{\text{я}1} = \frac{1}{2} \cdot \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{сo}}}{C_{\text{м}}} \right).$$

Так как $U_1 = U_{\text{доп}}$, то

$$\begin{aligned}U_{\text{доп}} &= \frac{1}{6} C_{\text{е}} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{сo}} + \frac{1}{2} J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \right] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1; \\ U_{\text{доп}} &= \frac{1}{6} C_{\text{е}} \cdot \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J} \cdot t_1 + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \cdot \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{сo}}}{C_{\text{м}}} \right) + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{t_1}; \\ \left[U_{\text{доп}} - \frac{1}{2} R_{\text{я}} \cdot \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{сo}}}{C_{\text{м}}} \right) \right] &= \frac{1}{6} C_{\text{е}} \cdot \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J} \cdot t_1 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{t_1}; \\ t_1^2 - 6 \cdot \frac{J}{C_{\text{е}}} \cdot \frac{U_{\text{доп}} - \frac{1}{2} R_{\text{я}} \cdot \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{сo}}}{C_{\text{м}}} \right)}{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}} \cdot t_1 + 6 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{е}} C_{\text{м}}} &= 0. \\ t_1 &= 3 \cdot \frac{J}{C_{\text{е}}} \cdot \frac{U_{\text{доп}} - \frac{1}{2} R_{\text{я}} \cdot \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{сo}}}{C_{\text{м}}} \right)}{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}} - \sqrt{\left[3 \cdot \frac{J}{C_{\text{е}}} \cdot \frac{U_{\text{доп}} - \frac{1}{2} R_{\text{я}} \cdot \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{сo}}}{C_{\text{м}}} \right)}{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}} \right]^2 - 6 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{е}} C_{\text{м}}}}.\end{aligned} \tag{1}$$

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

$$\begin{aligned}\omega^{(3)}(t) &= 0; \\ \omega^{(2)}(t) &= 0; \\ \omega^{(1)}(t) &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2; \\ \omega(t) &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3 + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1); \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \frac{7}{12} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^4 + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^2; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2]; \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= 0; \\ U(t) &= C_{\text{е}} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2].\end{aligned}$$

При $t = (2t_1 + t_2)$

$$\begin{aligned}\omega_3^{(3)} &= 0; \\ \omega_3^{(2)} &= 0; \\ \omega_3^{(1)} &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2; \\ \omega_3 &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2); \\ \varphi_3 &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right); \\ I_{\text{я}3} &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2]; \\ I_{\text{я}3}^{(1)} &= 0; \\ U_3 &= C_{\text{е}} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2].\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\omega^{(3)}(t) &= -\omega_{\max 2}^{(3)}; \\ \omega^{(2)}(t) &= -\omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2); \\ \omega^{(1)}(t) &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2; \\ \omega(t) &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3; \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \times \\ &\times (t - 2t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{24} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2]; \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= -\frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2); \\ U(t) &= C_{\text{е}} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot [(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)] - \frac{1}{6} C_{\text{е}} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 + \\ &+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2).\end{aligned}$$

При $t = (2t_1 + t_2 + t_3)$

$$\begin{aligned}\omega_4^{(3)} &= -\omega_{\max 2}^{(3)}; \\ \omega_4^{(2)} &= -\omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3;\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\omega_4^{(1)} &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2; \\ \omega_4 &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) - \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3; \\ \varphi_4 &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 \right) - \frac{1}{24} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^4; \\ I_{я4} &= \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2]; \\ I_{я4}^{(1)} &= -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3; \\ U_4 &= C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) - \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3 + \\ &+ \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2] - \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3.\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\omega^{(3)}(t) &= \omega_{\max 2}^{(3)}; \\ \omega^{(2)}(t) &= -\omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3 + \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3); \\ \omega^{(1)}(t) &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2 - \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2; \\ \omega(t) &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) - \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3 + \\ &+ \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \\ &- \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3; \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 \right) - \\ &- \frac{1}{24} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^4 + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \\ &- \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 - \\ &- \frac{1}{4} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 + \\ &+ \frac{1}{24} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^4; \\ I_{я}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \{ M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 + J \omega_{\max 2}^{(3)} \times \\ &\times \left[-\frac{1}{2} t_3^2 - t_3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] \}; \\ I_{я}^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot [-t_3 + (t - 2t_1 - t_2 - t_3)]; \\ U(t) &= C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot [(t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) - t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)] + \\ &+ C_e \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{6} t_3^3 - \frac{1}{2} t_3^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} t_3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{6} (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \{ M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 + J \omega_{\max 2}^{(3)} \times \\ &\times \left[-\frac{1}{2} t_3^2 - t_3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] \} + \\ &+ \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot [-t_3 + (t - 2t_1 - t_2 - t_3)].\end{aligned}$$

При $t = (2t_1 + t_2 + 2t_3)$

$$\omega_5^{(3)} = \omega_{\max 2}^{(3)};$$

$$\begin{aligned}\omega_5^{(2)} &= 0; \\ \omega_5^{(1)} &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2; \\ \omega_5 &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + 2t_1^2 t_3) - \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3; \\ \varphi_5 &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + 2t_1^2 t_2 t_3 + 2t_1^2 t_3^2 \right) - \frac{7}{12} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^4; \\ I_{\text{я}5} &= \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2]; \\ I_{\text{я}5}^{(1)} &= 0; \\ U_5 &= C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + 2t_1^2 t_3) - C_e \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2].\end{aligned}$$

Так как $I_{\text{я}5} = \frac{M_{\text{co}}}{C_M}$, то

$$\frac{M_{\text{co}}}{C_M} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2];$$

$$J \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 - J \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^2 = 0;$$

$$\omega_{\max 2}^{(3)} = \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \frac{t_1^2}{t_3^2}. \quad (7)$$

При этом

$$I_{\text{я}4} = \frac{1}{2} \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{co}}}{C_M} \right).$$

Так как $U_4 = -U_{\text{доп}}$, то

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

Так как $\omega_5 = \omega_{\max}$, то

$$\begin{aligned}\omega_{\max} &= \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + 2t_1^2 t_3) - \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3; \\ \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) &= \omega_{\max} - \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3 + \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3; \\ \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) &= \omega_{\max} - \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3 + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3; \\ \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3) &= \omega_{\max}; \\ -U_{\text{доп}} &= C_e \omega_{\max} - \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3 + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{co}}}{C_M} \right) - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \frac{t_1^2}{t_3}; \\ \left[U_{\text{доп}} + C_e \omega_{\max} + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{co}}}{C_M} \right) \right] &= \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot \frac{t_1^2}{t_3}; \\ t_3^2 - 6 \frac{U_{\text{доп}} + C_e \omega_{\max} + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{co}}}{C_M} \right)}{C_e \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2} \cdot t_3 + 6 \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M} &= 0.\end{aligned}$$

$$t_3 = 3 \cdot \frac{J}{C_e} \cdot \frac{U_{\text{доп}} + C_e \omega_{\max} + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{co}}}{C_M} \right)}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}} - \sqrt{\left[3 \cdot \frac{J}{C_e} \cdot \frac{U_{\text{доп}} + C_e \omega_{\max} + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{co}}}{C_M} \right)}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}} \right]^2 - 6 \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M}}. \quad (6)$$

$$\omega_4 = \omega_{\max} - \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_3^3. \quad (8)$$

$$\omega_4 = \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) + \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3 - \frac{1}{6} \omega_{\max 2}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3;$$

$$\omega_4 = \omega_3 + \frac{5}{6} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3;$$

$$\omega_3 = \omega_4 - \frac{5}{6} \omega_{\max 1}^{(3)} \cdot t_1^2 t_3. \quad (9)$$

$$t_2 = \frac{\omega_3 - \omega_2}{\omega_2^{(1)}}. \quad (10)$$

Этап 6. В интервале времени $(2t_1 + t_2 + 2t_3) \leq t \leq (2t_1 + t_2 + 2t_3 + t_5)$:

$$\begin{aligned} \omega^{(3)}(t) &= -\omega_{\max 3}^{(3)}; \\ \omega^{(2)}(t) &= -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3); \\ \omega^{(1)}(t) &= -\frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3)^2; \\ \omega(t) &= \omega_{\max} - \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3)^3; \\ \varphi(t) &= \varphi_5 + \omega_{\max} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3) - \frac{1}{24} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3)^4; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \left[M_{\text{co}} - \frac{1}{2} J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3)^2 \right]; \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3); \\ U(t) &= C_e \omega_{\max} - \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3)^3 + \\ &+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - \frac{1}{2} J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3)^2 \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3). \end{aligned}$$

При $t = (2t_1 + t_2 + 2t_3 + t_5)$

$$\begin{aligned} \omega_6^{(3)} &= -\omega_{\max 3}^{(3)}; \\ \omega_6^{(2)} &= -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5; \\ \omega_6^{(1)} &= -\frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2; \\ \omega_6 &= \omega_{\max} - \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^3; \\ \varphi_6 &= \varphi_5 + \omega_{\max} \cdot t_5 - \frac{1}{24} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^4; \\ I_{\text{я}6} &= \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - \frac{1}{2} J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \right]; \\ I_{\text{я}6}^{(1)} &= -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5; \\ U_6 &= C_e \omega_{\max} - \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - \frac{1}{2} J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5. \end{aligned} \quad (13)$$

Этап 7. В интервале времени $(2t_1 + t_2 + 2t_3 + t_5) \leq t \leq (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5)$:

$$\begin{aligned} \omega^{(3)}(t) &= \omega_{\max 3}^{(3)}; \\ \omega^{(2)}(t) &= -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5 + \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5); \\ \omega^{(1)}(t) &= -\frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^2; \\ \omega(t) &= \omega_{\max} - \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^3 - \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5) - \\ &- \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^3; \\ \varphi(t) &= \varphi_6 + \omega_{\max} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5) - \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5) - \\ &- \frac{1}{4} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^3 + \\ &+ \frac{1}{24} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^4; \end{aligned}$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \{M_{co} + J \omega_{max3}^{(3)} \cdot [-\frac{1}{2}t_5^2 - t_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5) + \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^2]\};$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{max3}^{(3)} \cdot [-t_5 + (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)];$$

$$U(t) = C_e \omega_{max} + C_e \omega_{max3}^{(3)} \cdot [-\frac{1}{6}t_5^3 - \frac{1}{2}t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5) - \frac{1}{2}t_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^3] + \\ + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \{M_{co} + J \omega_{max3}^{(3)} \cdot [-\frac{1}{2}t_5^2 - t_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5) + \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)^2]\} + \\ + \frac{L_{я}J}{C_M} \cdot \omega_{max3}^{(3)} \cdot [-t_5 + (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - t_5)].$$

При $t = (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5)$

$$\omega_7^{(3)} = \omega_{max3}^{(3)};$$

$$\omega_7^{(2)} = 0;$$

$$\omega_7^{(1)} = -\omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^2; \quad (15)$$

$$\omega_7 = \omega_{max} - \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^3; \quad (14)$$

$$\varphi_7 = \varphi_6 + \omega_{max} \cdot t_5 - \frac{13}{24} \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^4;$$

$$I_{я7} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^2];$$

$$I_{я7}^{(1)} = 0;$$

$$U_7 = C_e \omega_{max} - C_e \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^3 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^2].$$

Так как $I_{я7} = -I_{доп}$, то

$$-I_{доп} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^2];$$

$$\omega_{max3}^{(3)} = \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{J \cdot t_5^2}. \quad (12)$$

При этом

$$I_{я7} = -\frac{1}{2} \left(I_{доп} + \frac{M_{co}}{C_M} \right).$$

Так как $U_6 = -U_{доп}$, то

$$-U_{доп} = C_e \omega_{max} - \frac{1}{6} C_e \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^3 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{co} - \frac{1}{2} J \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5^2] - \frac{L_{я}J}{C_M} \cdot \omega_{max3}^{(3)} \cdot t_5;$$

$$-U_{доп} = C_e \omega_{max} - \frac{1}{6} C_e \cdot \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{J} \cdot t_5^3 - \frac{1}{2} R_{я} \cdot \left(I_{доп} + \frac{M_{co}}{C_M} \right) - \frac{L_{я}}{C_M} \cdot \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{t_5};$$

$$\left[U_{доп} + C_e \omega_{max} - \frac{1}{2} R_{я} \cdot \left(I_{доп} + \frac{M_{co}}{C_M} \right) \right] = \frac{1}{6} C_e \cdot \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{J} \cdot t_5^3 + \frac{L_{я}}{C_M} \cdot \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{t_5};$$

$$t_5^2 - 6 \cdot \frac{J}{C_e} \cdot \frac{U_{доп} + C_e \omega_{max} - \frac{1}{2} R_{я} \cdot \left(I_{доп} + \frac{M_{co}}{C_M} \right)}{C_M I_{доп} + M_{co}} \cdot t_5 + 6 \cdot \frac{L_{я}J}{C_e C_M} = 0.$$

$$t_5 = 3 \cdot \frac{J}{C_e} \cdot \frac{U_{доп} + C_e \omega_{max} - \frac{1}{2} R_{я} \cdot \left(I_{доп} + \frac{M_{co}}{C_M} \right)}{C_M I_{доп} + M_{co}} - \sqrt{\left[3 \cdot \frac{J}{C_e} \cdot \frac{U_{доп} + C_e \omega_{max} - \frac{1}{2} R_{я} \cdot \left(I_{доп} + \frac{M_{co}}{C_M} \right)}{C_M I_{доп} + M_{co}} \right]^2 - 6 \cdot \frac{L_{я}J}{C_e C_M}}. \quad (11)$$

Этап 8. В интервале времени $(2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5) \leq t \leq (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6)$:

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

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

$$\begin{aligned}\omega^{(1)}(t) &= -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2; \\ \omega(t) &= \omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^3 - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5); \\ \varphi(t) &= \varphi_7 + \omega_{\max} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5) - \\ &- \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5) - \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5)^2; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \right]; \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= 0; \\ U(t) &= C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max 3}^{(3)} [t_5^3 - t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5)] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \right].\end{aligned}$$

При $t = (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6)$

$$\begin{aligned}\omega_8^{(3)} &= 0; \\ \omega_8^{(2)} &= 0; \\ \omega_8^{(1)} &= -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2; \\ \omega_8 &= \omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6); \\ \varphi_8 &= \varphi_7 + \omega_{\max} \cdot t_6 - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 t_6 + \frac{1}{2} t_5^2 t_6^2); \\ I_{\text{я8}} &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \right]; \\ I_{\text{я8}}^{(1)} &= 0; \\ U_8 &= C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \right].\end{aligned}$$

Этап 9. В интервале времени $(2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6) \leq t \leq (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6 + t_7)$:

$$\begin{aligned}\omega^{(3)}(t) &= \omega_{\max 4}^{(3)}; \\ \omega^{(2)}(t) &= \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6); \\ \omega^{(1)}(t) &= -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)^2; \\ \omega(t) &= \omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6) - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6) + \\ &+ \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)^3; \\ \varphi(t) &= \varphi_8 + \omega_{\max} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6) - \\ &- \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6) - \\ &- \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)^2 + \\ &+ \frac{1}{24} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)^4; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_{\text{м}}} \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \frac{1}{2} J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)^2 \right]; \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6); \\ U(t) &= C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max 3}^{(3)} [(t_5^2 + t_5^2 t_6) + t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)] + \\ &+ \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \right. \\ &\left. + \frac{1}{2} J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6)^2 \right] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6).\end{aligned}$$

При $t = (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6 + t_7)$

$$\omega_9^{(3)} = \omega_{\max 4}^{(3)};$$

$$\omega_9^{(2)} = \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7;$$

$$\omega_9^{(1)} = -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2;$$

$$\omega_9 = \omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + t_5^2 t_7) + \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3;$$

$$\varphi_9 = \varphi_8 + \omega_{\max} \cdot t_7 - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 t_7 + t_5^2 t_6 t_7 + \frac{1}{2} t_5^2 t_7^2) + \frac{1}{24} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^4;$$

$$I_{я9} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \frac{1}{2} J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2];$$

$$I_{я9}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7;$$

$$U_9 = C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + t_5^2 t_7) + \\ + \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \frac{1}{2} J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7.$$

Этап 10. В интервале времени $(2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6 + t_7) \leq t \leq (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6 + 2t_7)$:

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

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7 - \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7);$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2 + \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7 \times (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^2;$$

$$\omega(t) = \omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + t_5^2 t_7) + \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3 - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \times \\ \times (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^2 - \\ - \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_9 + \omega_{\max} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) - \\ - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + t_5^2 t_7) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^2 + \\ + \frac{1}{4} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^3 - \\ - \frac{1}{24} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^4;$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \{M_{co} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 +$$

$$+ J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot [\frac{1}{2} t_7^2 + t_7 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) - \\ - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^2]\};$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot [t_7 - (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)];$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max 3}^{(3)} [(t_5^3 + t_5^2 t_6 + t_5^2 t_7) + t_5^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)] + \\
 & + C_e \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot [\frac{1}{6} t_7^3 + \frac{1}{2} t_7^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) + \\
 & + \frac{1}{2} t_7 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^2 - \\
 & - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^3] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \{M_{co} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \\
 & + J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot [\frac{1}{2} t_7^2 + t_7 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7) - \\
 & - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)^2]\} + \\
 & + \frac{L_{яJ}}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot [t_7 - (t - 2t_1 - t_2 - 2t_3 - 2t_5 - t_6 - t_7)].
 \end{aligned}$$

При $t = (2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6 + 2t_7)$

$$\omega_{10}^{(3)} = -\omega_{\max 4}^{(3)};$$

$$\omega_{10}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{10}^{(1)} = -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2;$$

$$\omega_{10} = \omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + 2t_5^2 t_7) + \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3;$$

$$\varphi_{10} = \varphi_9 + \omega_{\max} \cdot t_7 - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 t_7 + t_5^2 t_6 t_7 + \frac{3}{2} t_5^2 t_7^2) + \frac{13}{24} \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^4;$$

$$I_{я10} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2];$$

$$I_{я10}^{(1)} = 0;$$

$$\begin{aligned}
 U_{10} = & C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + 2t_5^2 t_7) + \\
 & + C_e \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2].
 \end{aligned}$$

Так как $\omega_{10}^{(1)} = 0$, то

$$-\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2 = 0;$$

$$\omega_{\max 4}^{(3)} = -\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot \frac{t_5^2}{t_7^2} \quad (17)$$

При этом $I_{я10} = \frac{M_{co}}{C_M}$ и $I_{я9} = -\frac{1}{2} (I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M})$.

Так как $\omega_{10} = 0$, то

$$\omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + 2t_5^2 t_7) + \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3 = 0;$$

$$\omega_{\max} - \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + 2t_5^2 t_7) + \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 t_7 = 0;$$

$$\omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + t_5^2 t_7) = \omega_{\max}.$$

При этом $U_{10} = \frac{R_{я} M_{co}}{C_M}$.

Так как $U_9 = U_{доп}$, то

$$\begin{aligned}
 U_{доп} = & C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot (t_5^3 + t_5^2 t_6 + t_5^2 t_7) + \\
 & + \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^3 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{co} - J \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 + \frac{1}{2} J \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7^2] + \frac{L_{яJ}}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(3)} \cdot t_7;
 \end{aligned}$$

$$U_{доп} = C_e \omega_{\max} - C_e \omega_{\max} + \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 t_7 - \frac{1}{2} R_{я} \cdot (I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M}) + \frac{L_{яJ}}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot \frac{t_5^2}{t_7};$$

$$[U_{доп} + \frac{1}{2} R_{я} \cdot (I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M})] = \frac{1}{6} C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2 t_7 + \frac{L_{яJ}}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot \frac{t_5^2}{t_7};$$

$$t_7^2 - 6 \cdot \frac{U_{доп} + \frac{1}{2} R_{я} \cdot (I_{доп} - \frac{M_{co}}{C_M})}{C_e \omega_{\max 3}^{(3)} \cdot t_5^2} \cdot t_7 + 6 \cdot \frac{L_{яJ}}{C_e C_M} = 0.$$

$$t_7 = 3 \cdot \frac{J}{C_e} \cdot \frac{U_{\text{доп}} + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} \right)}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} - \sqrt{\left[3 \cdot \frac{J}{C_e} \cdot \frac{U_{\text{доп}} + \frac{1}{2} R_{\text{я}} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} \right)}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} \right]^2 - 6 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M}} \quad (16)$$

$$\omega_9 = \frac{1}{6} \omega_{\text{max}4}^{(3)} \cdot t_7^3; \quad (18)$$

$$\omega_8 = \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}}{J} \cdot t_7. \quad (19)$$

$$t_6 = \frac{\omega_7 - \omega_8}{\omega_7^{(1)}}. \quad (20)$$

$$T_{\text{ц}} = 2t_1 + t_2 + 2t_3 + 2t_5 + t_6 + 2t_7. \quad (21)$$

Если $t_6 = 0$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{\text{max}} = \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}}{J} \cdot (t_5 + t_7); \\ t_5 = \left[3 \cdot \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + 3 \cdot \frac{J \omega_{\text{max}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} - \frac{3}{2} \cdot \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{с0}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} \right] - \\ - \sqrt{\left[3 \cdot \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + 3 \cdot \frac{J \omega_{\text{max}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} - \frac{3}{2} \cdot \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{с0}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}} \right]^2 -} \\ - \frac{6 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M}}{C_e C_M}} \end{array} \right.$$

$$\omega_{\text{max}} = \left[3 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + 3 \omega_{\text{max}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_e} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} \right) \right] -$$

$$- \sqrt{\left[3 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + 3 \omega_{\text{max}} - \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_e} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} \right) \right]^2 - 6 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{C_e C_M} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}})^2}{J} + \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}}{J} \cdot t_7}.$$

После преобразования получаем

$$5\omega_{\text{max}}^2 + \left[6 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + 3 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_e} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} \right) - 4 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}}{J} \cdot t_7 \right] \cdot \omega_{\text{max}} -$$

$$- \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}}{J} \cdot \left[6 \cdot \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} \cdot t_7 - 3 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_e} \cdot \left(I_{\text{доп}} - \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} \right) \cdot t_7 + \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{с0}}}{J} \cdot t_7^2 + 6 \cdot \frac{L_{\text{я}}}{C_e} \cdot \left(I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} \right) \right] = 0.$$

Если $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.3}}$.

В данной статье рассматривается электропривод имеющий следующие параметры: $C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$; $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}$; $L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}$; $J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$. На контролируемые координаты электропривода наложены ограничения: $U_{\text{доп}} = 250 \text{ В}$; $I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}$. Момент сопротивления электропривода $M_{\text{с0}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Таким образом

$$5\omega_{\text{max}}^2 + 1146,45538 \cdot \omega_{\text{max}} - 3326,771972 = 0;$$

$$\omega_{\text{max}}^2 + 229,291076 \cdot \omega_{\text{max}} - 665,3543994 = 0.$$

$$\omega_{\text{max}} = 2,8659669 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

При $\omega_{\text{max}} = 2,8659669 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}} = 0,073075391 \text{ рад}$.

При $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.3}} = 171,2370931 \text{ рад}$.

В таблице 1 и таблице 2 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода.

При этом

$$t_1 = 1,818494974 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad \omega_{\text{max}1}^{(3)} = 30239582,43 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}; \quad \omega_1 = 0,030308249 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_2 = 0,18184949,7 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_2^{(1)} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad \omega_2^{(1)} = -300 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \quad t_7 = 4,620516628 \cdot 10^{-3} \text{ с};$$

$$\omega_{\text{max}4}^{(3)} = 14052065,96 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}; \quad \omega_8 = 1,386154988 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_9 = 0,231025831 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Таблица 1

$\frac{\omega_{\max}}{c}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$t_5, \text{с}$	$t_6, \text{с}$	$T_{\text{ц}}, \text{с}$
2,8659669	0,025430503	$1,410670674 \cdot 10^{-3}$	$4,932706 \cdot 10^{-3}$	0	0,050995279
20	0,196869912	$1,311592915 \cdot 10^{-3}$	$4,533148452 \cdot 10^{-3}$	0,057513002	0,27895042
40	0,396969291	$1,212213981 \cdot 10^{-3}$	$4,141627819 \cdot 10^{-3}$	0,124571189	0,545126187
60	0,59705467	$1,12683508 \cdot 10^{-3}$	$3,812407629 \cdot 10^{-3}$	0,191567076	0,811378254
80	0,797128813	$1,052692 \cdot 10^{-3}$	$3,531705 \cdot 10^{-3}$	0,258514445	1,077690075
100	0,997193801	$9,877045041 \cdot 10^{-4}$	$3,289524139 \cdot 10^{-3}$	0,325423293	1,344049574
120	1,197251231	$9,302744869 \cdot 10^{-4}$	$3,078441795 \cdot 10^{-3}$	0,392301042	1,610447728
140	1,397302349	$8,79156269 \cdot 10^{-4}$	$2,892826573 \cdot 10^{-3}$	0,459153323	1,876877661
160	1,597348141	$8,333634764 \cdot 10^{-4}$	$2,728330083 \cdot 10^{-3}$	0,525984486	2,143334037

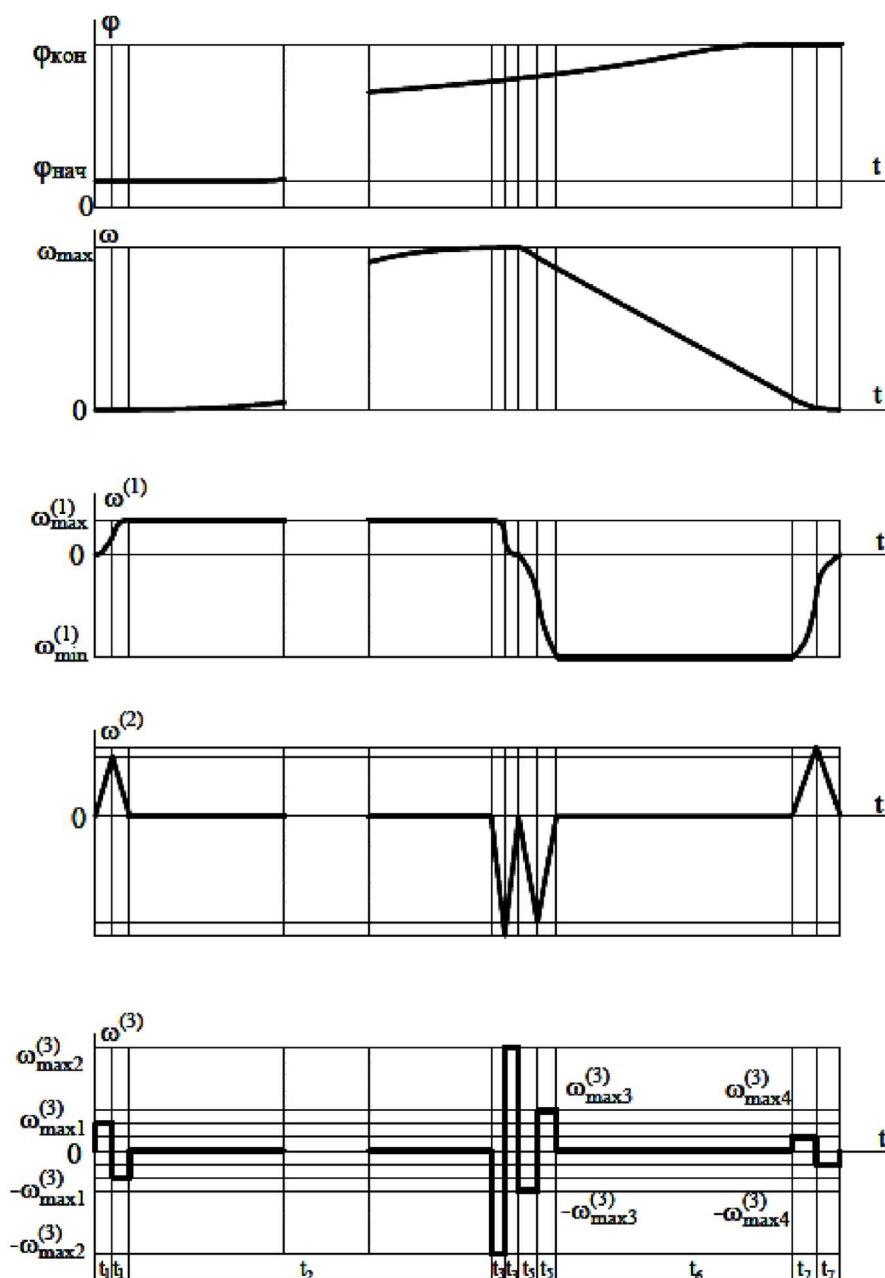


Рисунок 1 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока (механические контролируемые координаты)

Таблица 2

$\frac{\max \text{рад}}{c}$	$\frac{\max^2 \text{рад}}{c^4}$	$\frac{3^1 \text{рад}}{c}$	$\frac{4^1 \text{рад}}{c}$	$\frac{\max^3 \text{рад}}{c^4}$	$\frac{6^1 \text{рад}}{c}$	$\frac{7^1 \text{рад}}{c}$	$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \text{рад}$
2,8659669	50251464,6	2,724899833	2,842455722	12329651,24	2,6193316	1,386155099	0,073075391
20	58130207,8	19,86884071	19,97814012	14598941,61	19,7733426	18,6400555	2,783594701
40	68052082,9	39,8787786	39,97979964	17489569,37	39,7929186	38,7575117	10,88094055
60	78755207,9	59,88731649	59,98121942	20640613,17	59,80933796	58,8562777	24,29654190
80	90239640,19	79,8947308	79,98245513	24052067,52	79,82341475	78,9404885	43,03365865
100	102505208,07	99,9012295	99,98353826	27723949,52	99,8355238	99,0131428	67,09467216
120	115552083,01	119,9844495	119,9844954	31656242,28	119,8460779	119,0764675	96,48136311
140	129380208,12	139,9120843	139,9853474	35848951,52	139,8553587	139,132152	131,1950899
160	143989583,1	159,9166636	159,9861106	40302077,28	159,8635835	159,181501	171,2370931

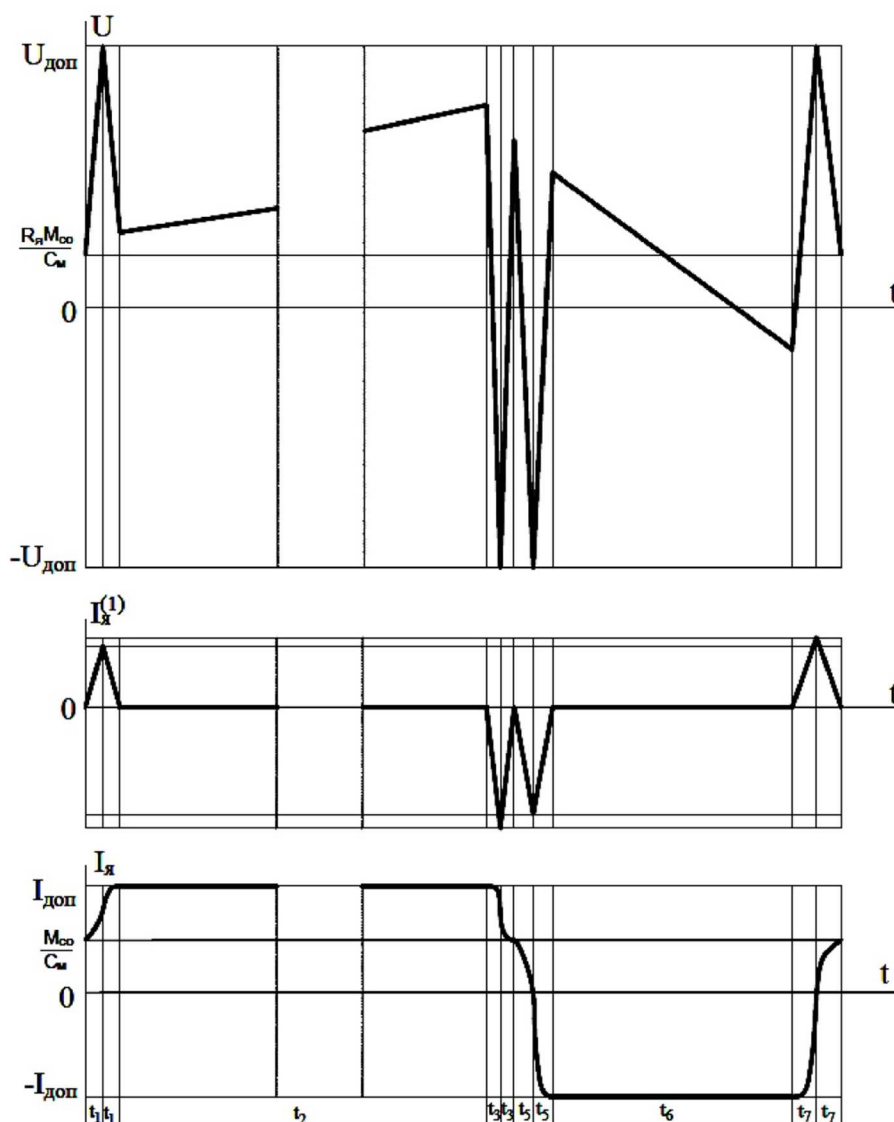


Рисунок 2 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока (электрические контролируемые координаты)

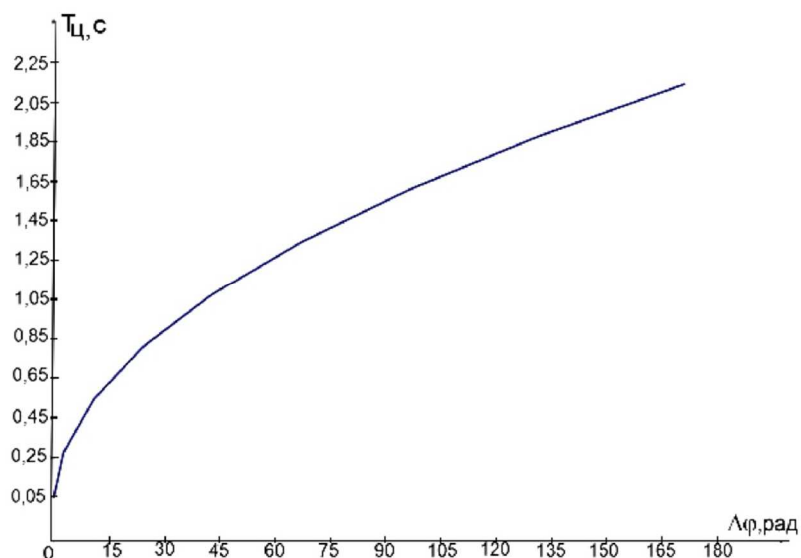


Рисунок 3 – Зависимость длительности цикла $T_{\text{ц}}$ от заданного перемещения исполнительного органа особо точного электропривода $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$

Выводы

В результате разработан алгоритм, позволяющий определить параметры близкой к оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода. Установлена область существования диаграммы.

Литература

1. Близкие к оптимальным по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода: монография / Ю.П. Добробаба [и др.] // ФГБОУ ВО «КубГТУ» – Краснодар : Издательский Дом – ЮГ, 2021. – 98 с.
2. Добробаба Ю.П., Мурлина В.А., Чернуха М.В. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – № 1. – С. 404–413.
3. Добробаба Ю.П., Мурлина В.А., Чернуха М.В. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – № . – С. 374–385.
4. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному и минимальному значениям тока / Ю.П. Добробаба [и др.] // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 2. – С. 52–63.
5. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному и минимальному значениям тока и скорости / Ю.П. Добробаба [и др.] // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 1. – С. 82–95.

References

1. The close to optimal diagram of the motion of the actuator: monograph / Y.P. Dobrobaba [et al.] // Kuban State Technological University. – Krasnodar : Publishing House – South, 2021. – 98 p.
2. Dobrobaba Y.P., Murlina V.A., Chernukha M.V. The close to optimal diagram of the motion of the actuator under the voltage limit // Science. Engineering. Technology. (polytechnical bulletin). – 2020. – № 1. – P. 404–413.
3. Dobrobaba Y.P., Murlina V.A., Chernukha M.V. The diagram is close to the optimum in terms of speed actuator movement diagram at voltage limits and maximum current value // Science. Engineering. Technology. (polytechnical bulletin). – 2020. – № 4. – P. 374–385.
4. Close to the optimal speed diagram of movement of the executive body of the electric drive under voltage limitations, at the maximum and minimum current values / Y.P. Dobrobaba [et al.] // Science. Engineering. Technology. (polytechnical bulletin). – 2021. – № 2. – P. 52–63.
5. The diagram is close to the optimum in terms of speed actuator movement diagram at voltage limits, maximum and minimum current and speed / Y.P. Dobrobaba [et al.] // Science. Engineering. Technology. (polytechnical bulletin). – 2021. – № 1. – P. 82–95.