

УДК 62

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



THE DIAGRAM IS CLOSE TO THE OPTIMUM IN TERMS OF SPEED ACTUATOR MOVEMENT DIAGRAM AT VOLTAGE LIMITS, MAXIMUM AND MINIMUM VALUES OF CURRENT AND SPEED

Добробаба Юрий Петрович

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

Мурлина Владислава Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры
информационных систем
и программирования,
Кубанский государственный
технологический университет

Чернуха Максим Валерьевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет

Кияшко Данил Сергеевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет

Аннотация. Разработана близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости. Диаграмма состоит из семи этапов, определена область существования диаграммы.

Ключевые слова: близкая к оптимальной, с ограничением по напряжению, с ограничением по максимальному и минимальному значениям тока и скорости, семи этапная диаграмма.

Dobrobaba Yury Petrovich

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

Murlina Vladislava Anatolievna

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Information Systems and Programming,
Kuban State Technological University

Chernukha Maksim Valerevich

Student,
Kuban State Technological University

Kiyashko Danil Sergeevich

Student,
Kuban State Technological University

Annotation. A diagram of the movement of the actuator's actuator, close to optimal in speed, was developed with a limitation on voltage, maximum and minimum values of current and speed. The diagram consist of seven stages, the area of existence of the diagram is determined.

Keywords: close to optimal, with voltage limitation, with maximum and minimum values of current and speed, seven-stage diagram.

В монографии [1] представлены оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода при различных ограничениях. Так как характеристическое уравнение силовой части электропривода имеет три варианта расклада корней, то возможны три вида переходных процессов. Поэтому необходимо разработать три алгоритма управления перемещением исполнительного органа электропривода.

Для устранения указанного недостатка предлагаются близкие к оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода при различных ограничениях.

В статье [2] приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению.

В статье [3] приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному току.

В данной работе предлагается близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости.

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

На рисунке 2 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости (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, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$;

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;

$\omega_{\text{доп}}$ – допустимое 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, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$;

$\omega_{\text{max1}}^{(2)}$ – первое максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$;

$\omega_{\text{max2}}^{(2)}$ – второе максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$;

$\omega_{\text{max3}}^{(2)}$ – третье максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$;

$\omega_{\text{max4}}^{(2)}$ – четвертое максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$;

$U_{\text{доп}}$ – допустимое значение напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$I_{\text{доп}}$ – допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А;

$I_{\text{max1}}^{(1)}$ – первое максимальное значение первой производной тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{\text{А}}{\text{с}}$;

$I_{\text{max2}}^{(1)}$ – второе максимальное значение первой производной тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{\text{А}}{\text{с}}$;

$I_{\max 3}^{(1)}$ – третье максимальное значение первой производной тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{A}{c}$;

$I_{\max 4}^{(1)}$ – четвертое максимальное значение первой производной тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{A}{c}$;

t – время, с;

t_1 – длительность первого этапа, с;

t_2 – длительность второго этапа, с;

t_3 – длительность третьего этапа, с;

t_4 – длительность четвертого этапа, с;

t_5 – длительность пятого этапа, с;

t_6 – длительность шестого этапа, с;

t_7 – длительность седьмого этапа, с;

$R_{я}$ – сопротивление якорной цепи, Ом.

C_m – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, $B \cdot c$;

Определим аналитические зависимости контролируемых координат электропривода от времени при его близком к оптимальному по быстродействию движению при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости.

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

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

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

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

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t^3;$$

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

$$I_{я}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_m} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)};$$

$$U(t) = \frac{1}{2} C_e \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{R_{я}}{C_m} \cdot [M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t] + \frac{L_{я} J}{C_m} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)},$$

где J – момент инерции исполнительного органа электропривода, $кг \cdot м^2$;

C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{B \cdot c}{рад}$;

$L_{я}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн.

При $t = 0$

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

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

$$\omega_0 = 0;$$

$$\varphi_0 = \varphi_{\text{нач}};$$

$$I_{я0} = \frac{M_{co}}{C_m};$$

$$I_{я0}^{(1)} = 0;$$

$$U_0 = \frac{R_{я} M_{co}}{C_m}.$$

При $t = 0_+$

$$\begin{aligned}\omega_{0+}^{(2)} &= \omega_{\max 1}^{(2)}; \\ \omega_{0+}^{(1)} &= 0; \\ \omega_{0+} &= 0; \\ \varphi_{0+} &= \varphi_{\text{нач}}; \\ I_{я0+} &= \frac{M_{\text{с0}}}{C_M}; \\ I_{я0+}^{(1)} &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)}; \\ U_{0+} &= \frac{R_{я} M_{\text{с0}}}{C_M} + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)}.\end{aligned}$$

При $t = t_1$

$$\begin{aligned}\omega_1^2 &= \omega_{\max 1}^{(2)}; \\ \omega_1^{(1)} &= \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1; \\ \omega_1 &= \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1^2; \\ \varphi_1 &= \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1^3; \\ I_{я1} &= \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1]; \\ I_{я1}^{(1)} &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)}; \\ U_1 &= \frac{1}{2} C_e \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)}.\end{aligned}$$

Так как $I_{я1} = I_{\text{доп}}$ и $\omega_{\max 1}^{(1)} = \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1$, то

$$\begin{aligned}I_{\text{доп}} &= \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max 1}^{(1)}]; \\ \omega_{\max 1}^{(1)} &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{с0}}}{J}.\end{aligned}$$

Так как $I_{я1}^{(1)} = I_{\max 1}^{(1)}$, то

$$I_{\max 1}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)}.$$

Так как $I_{\text{доп}} = \frac{M_{\text{с0}}}{C_M} + I_{\max 1}^{(1)} \cdot t_1$, то

$$t_1 = \frac{I_{\text{доп}} \frac{M_{\text{с0}}}{C_M}}{I_{\max 1}^{(1)}}.$$

Или

$$t_1 = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{с0}}}{J \cdot \omega_{\max 1}^{(2)}}.$$

Так как $\omega_1 = \frac{1}{2} \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1^2$, то

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{с0}})^2}{J^2 \omega_{\max 1}^{(2)}}.$$

Так как $U_1 = U_{\text{доп}}$, то

$$\begin{aligned}U_{\text{доп}} &= C_e \omega_1 + R_{я} I_{\text{доп}} + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)}; \\ (U_{\text{доп}} - R_{я} I_{\text{доп}}) &= \frac{1}{2} C_e \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{с0}})^2}{J^2 \omega_{\max 1}^{(2)}} + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 1}^{(2)};\end{aligned}$$

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

$$\omega_{\max 1}^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M \cdot (U_{\text{доп}} - R_{я} I_{\text{доп}})}{L_{яJ}} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{C_M^2 \cdot (U_{\text{доп}} - R_{я} I_{\text{доп}})^2}{L_{я}^2 J^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_e C_M}{L_{яJ}} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{co})^2}{J^2}}.$$

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

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

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

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

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

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

$$I_{я}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1 \right].$$

При $t = t_{1+}$

$$\omega_{1+}^{(2)} = 0;$$

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

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

$$\varphi_{1+} = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1^3;$$

$$I_{я1+} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1 \right];$$

$$I_{я1+}^{(1)} = 0;$$

$$U_{1+} = \frac{1}{2} C_e \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1 \right].$$

При $t = (t_1 + t_2)$

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

$$\omega_2^{(1)} = \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1;$$

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

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right);$$

$$I_{я2} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1 \right];$$

$$I_{я2}^{(1)} = 0;$$

$$U_2 = C_e \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1 \right].$$

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

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max 2}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\max 1}^{(2)} \cdot t_1 - \omega_{\max 2}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

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

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max1}}^{(2)} \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \omega_{\text{max1}}^{(2)} \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^3;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 - J \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2) \right];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(2)};$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) \right] - \frac{1}{2} C_e \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 - J \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2) \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(2)}.$$

При $t = (t_1 + t_2)_+$

$$\omega_{2+}^{(2)} = -\omega_{\text{max2}}^{(2)};$$

$$\omega_{2+}^{(1)} = \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{2+} = \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

$$\varphi_{2+} = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right);$$

$$I_{\text{я}2+} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 \right];$$

$$I_{\text{я}2+}^{(1)} = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(2)};$$

$$U_{2+} = C_e \cdot \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(2)}.$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3)$:

$$\omega_3^{(2)} = -\omega_{\text{max2}}^{(2)};$$

$$\omega_3^{(1)} = \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 - \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3;$$

$$\omega_3 = \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3^2;$$

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max1}}^{(2)} \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) - \frac{1}{6} \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3^3;$$

$$I_{\text{я}3} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 - J \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3 \right];$$

$$I_{\text{я}3}^{(1)} = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(2)};$$

$$U_3 = C_e \cdot \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right] - \frac{1}{2} C_e \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3^2 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 - J \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3 \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(2)}.$$

Так как $\omega_3^{(1)} = 0$, то

$$\omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot t_1 - \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3 = 0.$$

При этом $I_{\text{я}3} = \frac{M_{\text{co}}}{C_M}$.

Так как $\omega_3 = \omega_{\text{доп}}$, то

$$\omega_{\text{доп}} = \omega_{\text{max1}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max2}}^{(2)} \cdot t_3^2.$$

Так как $U_3 = -U_{\text{доп}}$, то

$$-U_{\text{доп}} = C_e \omega_{\text{доп}} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{C_M} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(2)};$$

$$\omega_{\max 2}^{(2)} = \frac{C_M U_{\text{доп}}}{L_{яJ}} + \frac{C_e C_M}{L_{яJ}} \cdot \omega_{\text{доп}} + \frac{R_{я} M_{\text{с0}}}{L_{яJ}}.$$

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

Так как $\omega_{\text{доп}} = \omega_2 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 t_3 - \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(2)} \cdot t_3^2$, то

$$\omega_2 = \omega_{\text{доп}} - \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 t_3 + \frac{1}{2} \omega_{\max 2}^{(2)} \cdot t_3^2.$$

$$t_2 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_{\max}^{(1)}}.$$

Так как $I_{я3}^{(1)} = I_{\max 2}^{(1)}$, то

$$I_{\max 2}^{(1)} = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 2}^{(2)}.$$

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

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

$$\omega^{(1)}(t) = 0;$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}};$$

$$\varphi(t) = \varphi_3 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3);$$

$$I_{я}(t) = \frac{M_{\text{с0}}}{C_M};$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{доп}} + \frac{R_{я} M_{\text{с0}}}{C_M}.$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3)_+$:

$$\omega_{3+}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{3+}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{3+} = \omega_{\text{доп}};$$

$$\varphi_{3+} = \varphi_3;$$

$$I_{я3+} = \frac{M_{\text{с0}}}{C_M};$$

$$I_{я3+}^{(1)} = 0;$$

$$U_{3+} = C_e \omega_{\text{доп}} + \frac{R_{я} M_{\text{с0}}}{C_M}.$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$:

$$\omega_4^{(2)} = 0;$$

$$\omega_4^{(1)} = 0;$$

$$\omega_4 = \omega_{\text{доп}};$$

$$\varphi_4 = \varphi_3 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_4;$$

$$I_{я4} = \frac{M_{\text{с0}}}{C_M};$$

$$I_{я4}^{(1)} = 0;$$

$$U_4 = C_e \omega_{\text{доп}} + \frac{R_{я} M_{\text{с0}}}{C_M}.$$

Этап 5. В интервале времени $(t_1+t_2+t_3+t_4) \leq t \leq (t_1+t_2+t_3+t_4+t_5)$:

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) - \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^3;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \right];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(2)};$$

$$U(t) = C_e \cdot \left[\omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(2)}.$$

При $t = (t_1+t_2+t_3+t_4)_+$:

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

$$\omega_{4+}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{4+} = \omega_{\text{доп}};$$

$$\varphi_{4+} = \varphi_4;$$

$$I_{\text{я}4+} = \frac{M_{\text{co}}}{C_M};$$

$$I_{\text{я}4+}^{(1)} = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(2)};$$

$$U_{4+} = C_e \omega_{\text{доп}} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{C_M} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(2)}.$$

При $t = (t_1+t_2+t_3+t_4+t_5)$:

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

$$\omega_5^{(1)} = -\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5;$$

$$\omega_5 = \omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5^2;$$

$$\varphi_5 = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_5 - \frac{1}{6} \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5^3;$$

$$I_{\text{я}5} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 \right];$$

$$I_{\text{я}5}^{(1)} = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(2)};$$

$$U_5 = C_e \cdot \left[\omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(2)}.$$

Так как $I_{\text{я}5} = -I_{\text{доп}}$ и $\omega_{\min}^{(1)} = -\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5$, то

$$-I_{\text{доп}} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\min}^{(1)} \right];$$

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

Так как $I_{\text{я}5}^{(1)} = -I_{\max 3}^{(1)}$, то

$$I_{\max 3}^{(1)} = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 3}^{(2)}.$$

Так как $-I_{\text{доп}} = \frac{M_{\text{co}}}{C_M} - I_{\max 3}^{(1)} \cdot t_5$, то

$$t_5 = \frac{I_{\text{доп}} + \frac{M_{\text{co}}}{C_M}}{I_{\text{max3}}^{(1)}}$$

Или

$$t_5 = \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{co}}}{J \omega_{\text{max3}}^{(2)}}$$

Так как $\omega_5 = \omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^2$, то

$$\omega_5 = \omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{co}})^2}{J^2 \omega_{\text{max3}}^{(2)}}$$

Так как $U_5 = -U_{\text{доп}}$, то

$$-U_{\text{доп}} = C_e \omega_5 - R_{\text{я}} I_{\text{доп}} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max3}}^{(2)};$$

$$-U_{\text{доп}} = C_e \omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} C_e \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}})^2}{J^2 \omega_{\text{max3}}^{(2)}} - R_{\text{я}} I_{\text{доп}} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max3}}^{(2)};$$

$$\left[\omega_{\text{max3}}^{(2)} \right]^2 - \frac{C_M}{L_{\text{я}} J} \cdot (U_{\text{доп}} + C_e \omega_{\text{доп}} - R_{\text{я}} I_{\text{доп}}) \cdot \omega_{\text{max3}}^{(2)} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_e C_M}{L_{\text{я}} J} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{co}})^2}{J^2} = 0.$$

$$\omega_{\text{max3}}^{(2)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M (U_{\text{доп}} + C_e \omega_{\text{доп}} - R_{\text{я}} I_{\text{доп}})}{L_{\text{я}} J} + \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \frac{C_M^2 (U_{\text{доп}} + C_e \omega_{\text{доп}} - R_{\text{я}} I_{\text{доп}})^2}{L_{\text{я}}^2 \cdot J^2} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_e \cdot C_M}{L_{\text{я}} \cdot J} \cdot \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}})^2}{J^2}}.$$

Этап 6. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6)$:

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5;$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^2 - \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5);$$

$$\varphi(t) = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_5 - \frac{1}{6} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^3 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^3 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5)^2;$$

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \cdot \left[\omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^2 - \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5) \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} - J \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5].$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)_+$:

$$\omega_{5+}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{5+}^{(1)} = -\omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5;$$

$$\omega_{5+} = \omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^2;$$

$$\varphi_{5+} = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_5 - \frac{1}{6} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^3;$$

$$I_{\text{я}5+} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} - J \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5];$$

$$I_{\text{я}5+}^{(1)} = 0;$$

$$U_{5+} = C_e \cdot \left[\omega_{\text{доп}} - \frac{1}{2} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot [M_{\text{co}} - J \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5].$$

При $t = (t_1+t_2 + t_3 + t_4+t_5 + t_6)$:

$$\omega_6^{(2)} = 0;$$

$$\omega_6^{(1)} = -\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5;$$

$$\omega_6 = \omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_5^2 + t_5t_6\right);$$

$$\varphi_6 = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t_5 + t_6) - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6}t_5^3 + \frac{1}{2}t_5^2t_6 + \frac{1}{2}t_5t_6^2\right);$$

$$I_{я6} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 \right];$$

$$I_{я6}^{(1)} = 0;$$

$$U_6 = C_e \cdot \left[\omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_5^2 + t_5t_6\right) \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 \right].$$

Этап 7. В интервале времени $(t_1+t_2 + t_3 + t_4+t_5 + t_6) \leq t \leq (t_1+t_2+t_3 + t_4+t_5 + t_6 + t_7)$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max 4}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 + \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6);$$

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_5^2 + t_5t_6\right) - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) + \frac{1}{2}\omega_{\max 4}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t_5 + t_6) - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6}t_5^3 + \frac{1}{2}t_5^2t_6 + \frac{1}{2}t_5t_6^2\right) + \\ & + \omega_{\text{доп}} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) - \\ & - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_5^2 + t_5t_6\right) \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) - \\ & - \frac{1}{2}\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6)^2 + \\ & + \frac{1}{6}\omega_{\max 4}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6)^3; \end{aligned}$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 + J\omega_{\max 4}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) \right];$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(2)};$$

$$\begin{aligned} U(t) = & C_e \left\{ \omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \left[\left(\frac{1}{2}t_5^2 + t_5t_6\right) - t_5(t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) \right] + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2}\omega_{\max 4}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) \right\} + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \\ & \cdot \left[M_{\text{co}} - J\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 + J\omega_{\max 4}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4 - t_5 - t_6) \right] + \frac{L_{я}J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(2)}. \end{aligned}$$

При $t = (t_1+t_2 + t_3 + t_4+t_5 + t_6)_+$:

$$\omega_{6+}^{(2)} = \omega_{\max 4}^{(2)};$$

$$\omega_{6+}^{(1)} = -\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5;$$

$$\omega_{6+} = \omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_5^2 + t_5t_6\right);$$

$$\varphi_{6+} = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t_5 + t_6) - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6}t_5^3 + \frac{1}{2}t_5^2t_6 + \frac{1}{2}t_5t_6^2\right);$$

$$I_{я6+} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 \right];$$

$$I_{я6+}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(2)};$$

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

При $t = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7)$:

$$\omega_7^{(2)} = \omega_{\max 4}^{(2)};$$

$$\omega_7^{(1)} = -\omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 + \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7;$$

$$\omega_7 = \omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_5^2 + t_5 t_6 + t_5 t_7 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7^2;$$

$$\varphi_7 = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot (t_5 + t_6 + t_7) - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_5^3 + \frac{1}{2} t_5^2 t_6 + \frac{1}{2} t_5 t_6^2 + \frac{1}{2} t_5^2 t_7 + t_5 t_6 t_7 + \frac{1}{2} t_5 t_7^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7^3;$$

$$I_{я7} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 + J \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7 \right];$$

$$I_{я7}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(2)};$$

$$U_7 = C_e \cdot \left[\omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_5^2 + t_5 t_6 + t_5 t_7 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7^2 \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} - J \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 + J \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7 \right] + \frac{L_{яJ}}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(2)}.$$

Так как $\omega_7^{(1)} = 0$, то

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

При этом $I_{я7} = \frac{M_{\text{co}}}{C_M}$.

Так как $\omega_7 = 0$, то

$$\omega_{\text{доп}} - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_5^2 + t_5 t_6 + t_5 t_7 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7^2 = 0.$$

Так как $U_7 = U_{\text{доп}}$, то

$$U_{\text{доп}} = \frac{R_{я}}{C_M} \cdot M_{\text{co}} + \frac{L_{яJ}}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(2)};$$

$$\omega_{\max 4}^{(2)} = \frac{C_M U_{\text{доп}} - R_{я} M_{\text{co}}}{L_{яJ}}.$$

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

$$\omega_6 = \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot t_5 t_7 - \frac{1}{2} \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7^2.$$

$$t_6 = \frac{\omega_6 - \omega_5}{\omega_{\min}}.$$

Так как $I_{я7}^{(1)} = I_{\max 4}^{(1)}$, то

$$I_{\max 4}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max 4}^{(2)}.$$

Так как $\varphi_7 = \varphi_{\text{кон}}$, то

$$\varphi_{\text{кон}} = \varphi_6 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_7 - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_5^2 t_7 + t_5 t_6 t_7 + \frac{1}{2} t_5 t_7^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7^3;$$

$$\varphi_6 = \varphi_{\text{кон}} - \omega_{\text{доп}} \cdot t_7 + \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_5^2 t_7 + t_5 t_6 t_7 + \frac{1}{2} t_5 t_7^2 \right) - \frac{1}{6} \omega_{\max 4}^{(2)} \cdot t_7^3.$$

Так как $\varphi_6 = \varphi_5 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_6 - \omega_{\max 3}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_5^2 t_6 + \frac{1}{2} t_5 t_6^2 \right)$, то

$$\varphi_5 = \varphi_6 - \omega_{\text{доп}} \cdot t_6 + \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_5^2 t_6 + \frac{1}{2} t_5 t_6^2 \right).$$

Так как $\varphi_5 = \varphi_4 + \omega_{\text{доп}} \cdot t_5 - \frac{1}{6} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^3$, то

$$\varphi_4 = \varphi_5 - \omega_{\text{доп}} \cdot t_5 + \frac{1}{6} \omega_{\text{max3}}^{(2)} \cdot t_5^3.$$

$$t_4 = \frac{\varphi_4 - \varphi_3}{\omega_{\text{доп}}}.$$

$$T_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7.$$

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: $U_{\text{доп}} = 250 \text{ В}$; $I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}$; $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Момент сопротивления электропривода $M_{\text{со}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода (механические контролируемые координаты).

Таблица 1

t, с	$\omega^{(2)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	$\omega^{(1)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	$\omega, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$(\varphi_{\text{нач}} - \varphi_{\text{нач}}), \text{ рад}$
0	0 → 52470,2212	0	0	0
$1,905842928 \cdot 10^{-3}$	52470,2212 → 0	100	0,095292146	0,000060537
1,60052739	0 → - 117500	100	159,9574468	127,9319392
1,601378454	- 117500 → 0	0	160	128,0680973
3,024321235	0 → - 102362,6208	0	160	355,7389423
3,027251992	- 102362,6208 → 0	- 300	159,5603864	356,207434
3,556511251	0 → 57500	- 300	0,782608696	398,6389414
3,561728642	57500 → 0	0	0	400

В таблице 2 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода (электрические контролируемые координаты).

Таблица 2

t, с	$I_{\text{я}}, \text{ А}$	$I_{\text{я}}^{(1)}, \frac{\text{А}}{\text{с}}$	U, В
0	4	0 → 2098,808848	20 → 229,8808848
$1,905842928 \cdot 10^{-3}$	8	2098,808848 → 0	250 → 40,11911518
1,60052739	8	0 → - 4700	239,9468086 → → - 230,0531914
1,601378454	4	- 4700 → 0	- 250 → 220
3,024321235	4	0 → - 4094,504832	220 → - 189,4504832
3,027251992	- 8	- 4094,504832 → 0	- 250 → 159,450483
3,556511251	- 8	0 → 2300	- 39,02173904 → → 190,978261
3,561728642	4	2300 → 0	250 → 20

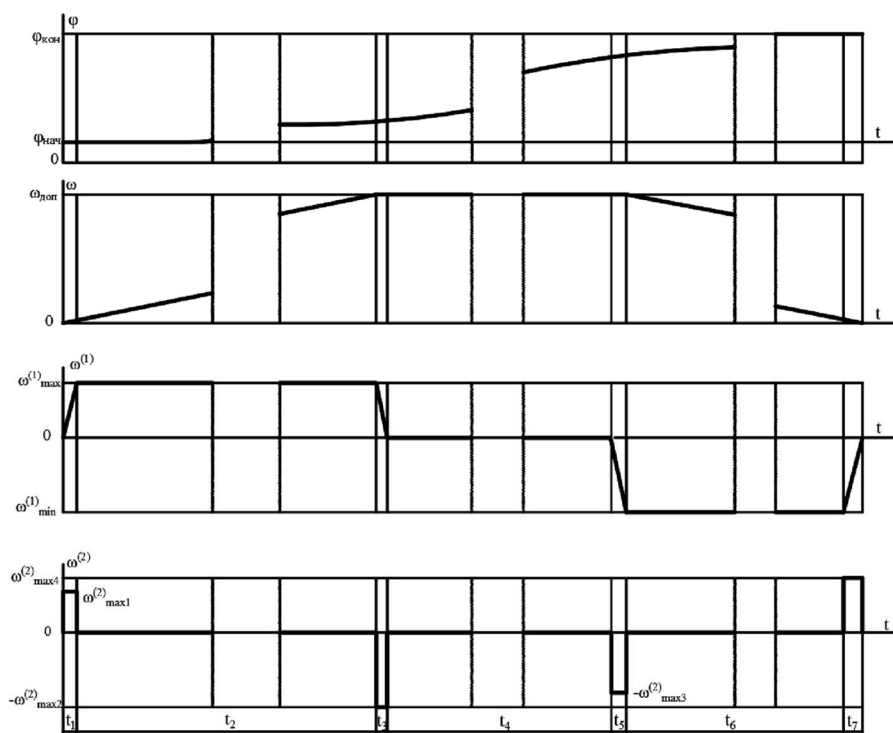


Рисунок 1 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости (механические контролируемые координаты)

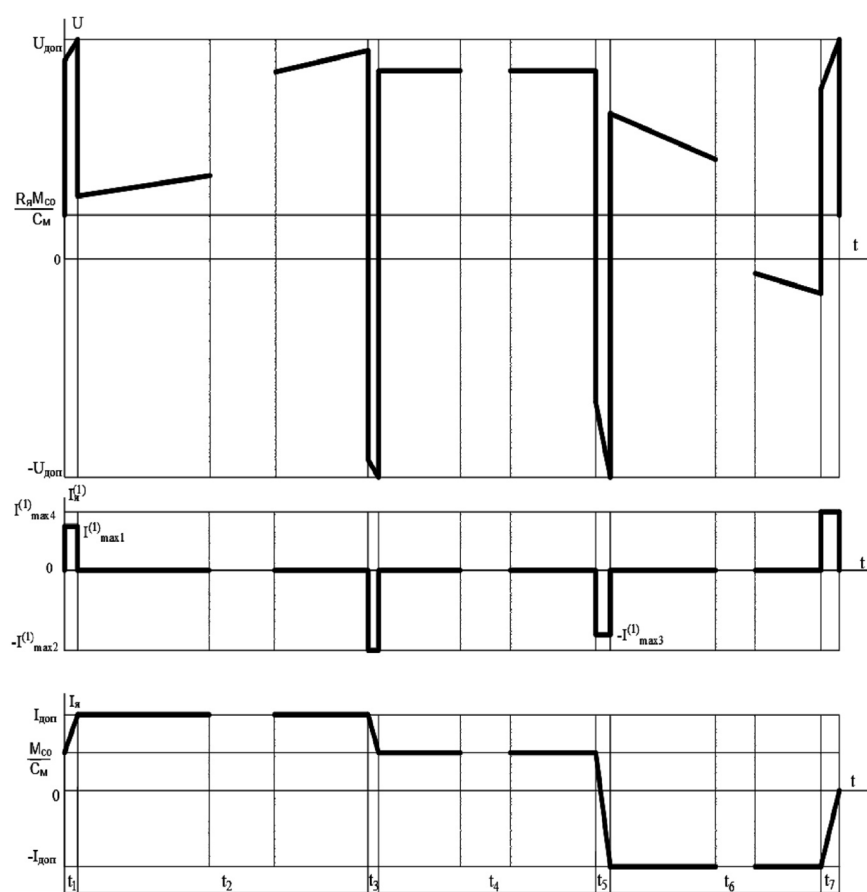


Рисунок 2 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости (электрические контролируемые координаты)

Выводы

В качестве варьируемых параметров близкой к оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости используются длительности семи этапов и четыре разных максимальных значения второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода.

Разработан алгоритм, позволяющий определить все параметры близкой к оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости.

Так как получены аналитические значения для всех параметров близкой к оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению, максимальному и минимальному значениям тока и скорости, то при внедрении требуется более простое и дешевое оборудование.

Литература

1. Добробаба Ю.П., Литаш Б.С. Квазиоптимальный по быстродействию программно-управляемый позиционный электропривод: монография / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар : Изд. ГУО ВПО «КубГТУ», 2009. – 178 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. – № 4. – С. 374–385.

References

1. Dobrobaba S.P., Litash B.S. Quasi-optimal in terms of speed of the program-controlled positional electric drive: monograph / Kuban State Technological University. – Krasnodar : Publishing house of State Educational Institution of Higher Professional Education «KubGTU», 2009. – 178 p.
2. Dobrobaba S.P., Murlina, V.A., Chernukha, M.V. The close to optimal diagram of the motion of the actuator under the voltage limit // Nauka. Technique. Tekhnologii (Polytechnic Bulletin). – 2020. – № 1. – P. 404–413.
3. Dobrobaba S.P., Murlina V.A., Chernukha M.V. Close to the optimal speed diagram of actuator movement under restrictions on voltage and maximum current value // Nauka. Technique. Tekhnologii (Polytechnic Bulletin). – 2020. – № 4. – P. 374–385.