

УДК 62

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПРОГРАММНО-УПРАВЛЯЕМЫХ ОПТИМАЛЬНЫХ
ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ**



**RESEARCH OF ENERGY CHARACTERISTICS OF SOFTWARE CONTROLLED
OPTIMUM IN TERMS OF SPEED ELECTRIC ACTUATORS**

Добробаба Юрий Петрович

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

Сальников Кирилл Игоревич

студент,
Кубанский государственный технологический университет

Бондарев Михаил Николаевич

студент,
Кубанский государственный технологический университет

Аннотация. Исследованы энергетические характеристики программно-управляемых оптимальных по быстродействию электроприводов. Диаграмма состоит из одиннадцати этапов. Выявлена зависимость потребляемой электроприводом энергии от третьей производной угловой скорости.

Ключевые слова: энергетические характеристики, программно-управляемых, третьей производной угловой скорости, одиннадцатиступенчатая диаграмма.

Dobrobaba Yury Petrovich

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

Salnikov Kirill Igorevich

Student,
Kuban State Technological University

Bondarev Mikhail Nikolaevich

Student,
Kuban State Technological University

Annotation. The energy characteristics of softwarecontrolled optimum in terms of speed electric actuators. The diagram has eleven stages. The dependence of the energy consumed by the electric drive on the third derivative of the angular velocity is revealed.

Keywords: energy characteristics, softwarecontrolled, third derivative of the angular velocity, eleven-stage diagram

В результате детального анализа источника [1], исследованы оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электроприводов для различных типов движения исполнительного органа, в частности:

- малые перемещения, диаграмма состоит из 6 этапов;
- средние перемещения, диаграмма состоит из 10 этапов;
- большие перемещения, диаграмма состоит из 11 этапов.

Вместе с тем, исследуемые параметры перемещения исполнительного органа электропривода касались только механических координат, не принимая во внимание энергетические составляющие движения, в частности – величину затрат энергии на совершение движения.

В текущей работе осуществляется детальное исследование энергетических характеристик программно-управляемых оптимальных по быстродействию электроприводов на предмет зависимости затрачиваемой электроприводом энергии от величины третьей производной угловой скорости.

Для случаев больших перемещений исполнительного органа электропривода были выявлены такие значения перемещений, которые остаются постоянными для всех типов диаграмм, вне зависимости от величины третьей производной угловой скорости. Принимая в расчет данную зависимость, проведем исследования для больших перемещений электропривода и выявим зависимость энергетических параметров от величины третьей производной угловой скорости.

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода, отражающая изменение механических координат исполнительного органа, приведен на рисунке 1. Для данного рисунка приняты следующие обозначения:

φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;

ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, рад/с;

- $\omega^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с²;
- $\omega^{(2)}$ – вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с³;
- $\omega^{(3)}$ – третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с⁴;
- $\varphi_{нач}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\varphi_{кон}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\omega_{доп}$ – допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с;
- $\omega_{доп}^{(1)}$ – допустимое значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с²;
- $\omega_{max}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с³;
- $\omega_{max}^{(3)}$ – максимальное значение третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с⁴;
- t – время, с;
- t_1 – длительность первого, второго, четвертого, пятого, седьмого, восьмого, девятого и одиннадцатого этапов, с;
- t_2 – длительность третьего и девятого этапов, с;
- t_3 – длительность шестого этапа, с.

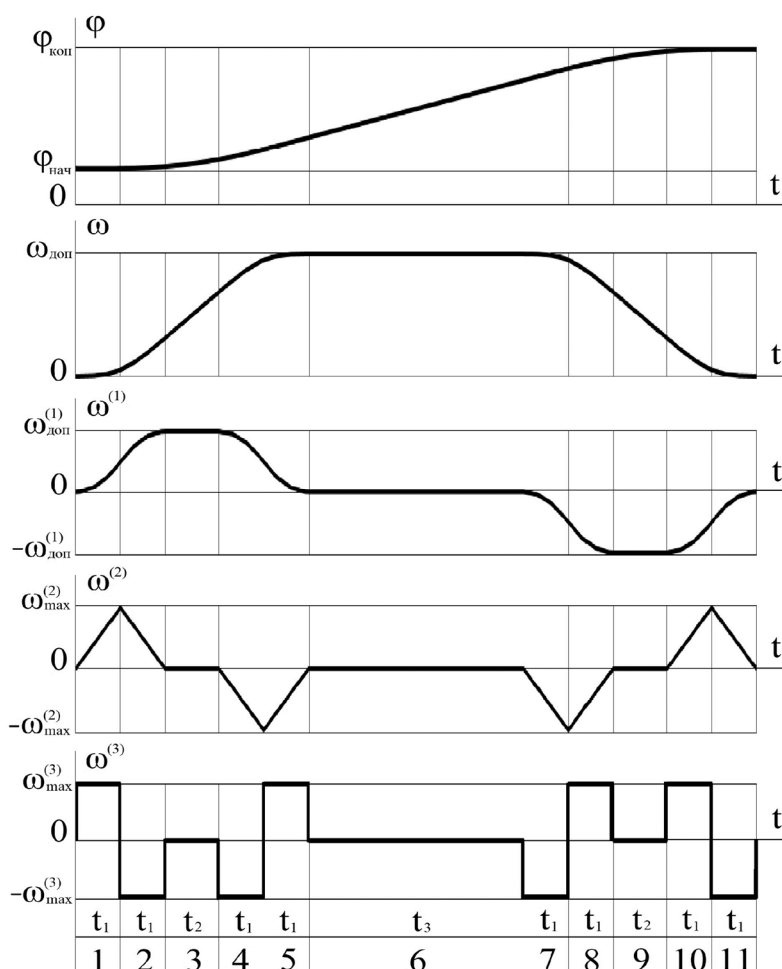


Рисунок 1 – Механические координаты оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода с учетом третьей производной угловой скорости

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода, отражающая изменение электрических координат, приведена на рисунке 2. Для данного рисунка приняты следующие обозначения:

- U – напряжение, приложенное к якорной цепи электропривода, В;
- $I_{я}$ – ток якорной цепи электропривода, А;
- $I_{я.max}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной тока якорной цепи электропривода, А/с;
- $U_{доп}$ – допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электропривода, В;
- $I_{доп}$ – допустимое значение тока якорной цепи электропривода, А;
- C_M – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя, В·с;
- $M_{со}$ – момент сопротивления электропривода, Н·м.

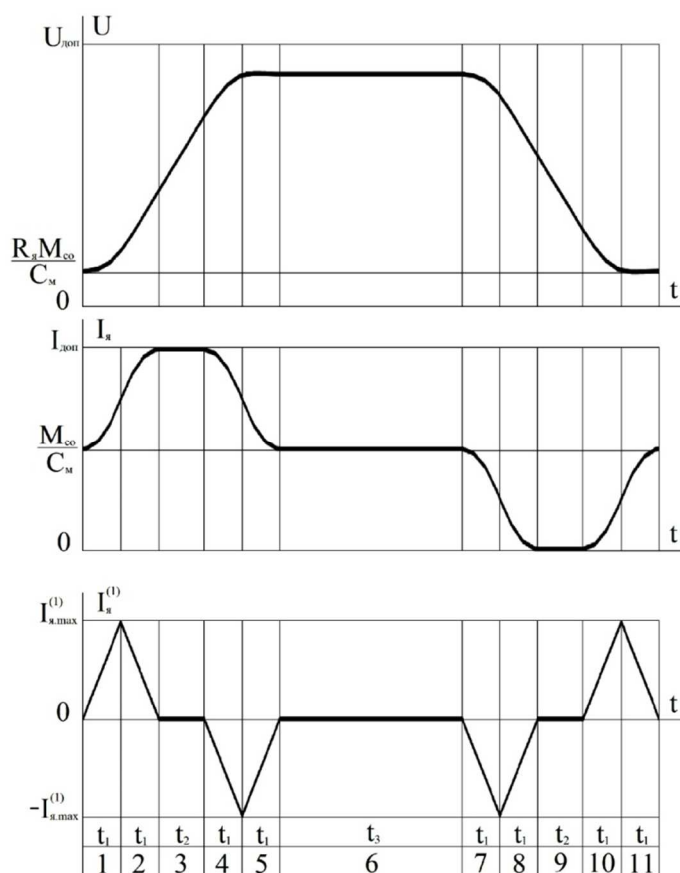


Рисунок 2 – Электрические координаты оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода

Для заданного электропривода справедливо соотношение:

$$\omega_{доп}^{(1)} = \frac{C_M \cdot I_{доп} - M_{со}}{J}$$

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

$$\begin{aligned} \omega^{(3)}(t) &= \omega_{max}^{(3)}; \\ \omega^{(2)}(t) &= \omega_{max}^{(3)} \cdot t; \\ \omega^{(1)}(t) &= \frac{1}{2} \omega_{max}^{(3)} \cdot t^2; \\ \omega(t) &= \frac{1}{6} \omega_{max}^{(3)} \cdot t^3; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t^4; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + \frac{1}{2} J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t^2 \right]; \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t; \\ U(t) &= \frac{1}{6} C_e \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t^3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{CO}} + \frac{1}{2} J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t^2 \right] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t; \\ P(t) &= \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left[M_{\text{CO}} \cdot t^3 + \frac{1}{2} J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t^5 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \times \\ &\quad \times \left\{ M_{\text{CO}}^2 + M_{\text{CO}} J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t^2 + \frac{1}{4} J^2 \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot t^4 \right\} + \\ &\quad + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left[M_{\text{CO}} \cdot t + \frac{1}{2} J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t^3 \right]; \\ W_1 &= \frac{1}{24} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{72} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}}^2 \cdot t_1 + \\ &\quad + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}} J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \times \\ &\quad \times M_{\text{CO}} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}\omega^{(3)}(t) &= -\omega_{\text{max}}^{(3)}; \\ \omega^{(2)}(t) &= \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - t_1); \\ \omega^{(1)}(t) &= \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - t_1)^2; \\ \omega(t) &= \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \times (t - t_1)^3; \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{4} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 + \\ &\quad + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - t_1)^4; \\ I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + J \omega_{\text{max}}^{(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_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - t_1)]; \\ U(t) &= C_e \omega_{\text{max}}^{(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_M} \times \\ &\quad \times \left\{ M_{\text{CO}} + J \omega_{\text{max}}^{(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_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \times [t_1 - (t - t_1)]; \\ P(t) &= \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{6} \cdot (t - t_1)^3 \right] + J \omega_{\text{max}}^{(3)} \left[\frac{1}{12} t_1^5 + \frac{5}{12} t_1^4 \cdot (t - t_1) + \frac{2}{3} t_1^3 \cdot (t - t_1)^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{6} t_1^2 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - t_1)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - t_1)^5 \right] \right\} + \\ &\quad + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{CO}}^2 + 2 M_{\text{CO}} J \omega_{\text{max}}^{(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. \\ &\quad \left. + J^2 \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[\frac{1}{4} t_1^4 + t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 - t_1 \cdot (t - t_1)^3 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{4} \cdot (t - t_1)^4 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} \cdot [t_1 - (t - t_1)] + J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - t_1)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1)^3 \right] \right\};\end{aligned}$$

$$W_2 = \frac{13}{24} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{35}{72} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 + \frac{5}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{43}{60} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 +$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e \omega_{\max}^{(3)} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{CO} + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \right];$$

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left\{ M_{CO} \cdot [t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - 2t_1)] + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot [t_1^5 + t_1^4 \cdot (t - 2t_1)] \right\} +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{CO}^2 + 2M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4 \right\};$$

$$W_3 = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(t_1^5 t_2 + \frac{1}{2} t_1^4 t_2^2 \right) +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 t_2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4 t_2.$$

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

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

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

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

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

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \times$$

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

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = -\frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2);$$

$$U(t) = C_e \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 \right] +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{CO} + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2) \right\};$$

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left\{ M_{CO} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2 t_2) + t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{6} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \times (t - 2t_1 - t_2)^3 + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[(t_1^5 + t_1^4 t_2) + t_1^4 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \times \right. \right. \right.$$

$$\begin{aligned}
 & \times (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 - \frac{2}{3} t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 + \\
 & + \frac{1}{12} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^5 \Big] + \frac{R_n}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{CO}^2 + 2M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \times \right. \\
 & \times \left[t_1^2 - \frac{1}{2} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 \right] + J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \times \\
 & \times \left[t_1^4 - t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{4} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4 \right] \Big\} - \frac{L_n J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \times \\
 & \times M_{CO} \cdot (t - 2t_1 - t_2) + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \times (t - 2t_1 - t_2)^3 \right] \Big\}; \\
 W_4 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{35}{24} t_1^4 + t_1^3 t_2 \right) + \frac{C_e}{C_M} J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{85}{72} t_1^6 + \frac{5}{6} t_1^5 t_2 \right) + \\
 & + \frac{R_n}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 + \frac{5}{3} \cdot \frac{R_n}{C_M^2} \cdot M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{43}{60} \cdot \frac{R_n}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\
 & - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_n J}{C_M^2} \cdot M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{3}{8} \cdot \frac{L_n J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \omega^{(3)}(t) &= \omega_{\max}^{(3)}; \\
 \omega^{(2)}(t) &= -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2); \\
 \omega^{(1)}(t) &= \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2; \\
 \omega(t) &= \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \times \\
 & \times (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3; \\
 \varphi(t) &= \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \times \\
 & \times (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \times \\
 & \times (t - 3t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4; \\
 I_n(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{CO} + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] \right\}; \\
 I_n^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - t_2)]; \\
 U(t) &= C_e \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \right. \\
 & + \frac{1}{6} (t - 3t_1 - t_2)^3 \Big] + \frac{R_n}{C_M} \cdot \left\{ M_{CO} + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 \right] \right\} + \frac{L_n J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - t_2)]; \\
 P(t) &= \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left\{ M_{CO} \cdot \left[\left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \times \right. \right. \\
 & \times (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} (t - 3t_1 - t_2)^3 \Big] + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{12} t_1^5 + \frac{1}{2} t_1^4 t_2 \right) - \right. \\
 & - \left(\frac{19}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \\
 & + \frac{5}{6} t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^5 \Big] \Big\} + \\
 & + \frac{R_n}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{CO}^2 + 2M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \times \right. \right. \\
 & \times (t - 3t_1 - t_2)^2 \Big] + J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[\frac{1}{4} t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{3}{2} t_1^2 \times \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times (t - 3t_1 - t_2)^2 - t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4 \Big] \Big\} + \\ & + \frac{L_{яJ}}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left\{ M_{CO} \cdot [-t_1 + (t - 3t_1 - t_2)] + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 \times \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \times (t - 3t_1 - t_2) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 \right] \right\}; \\ W_5 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{47}{24} t_1^4 + t_1^3 t_2 \right) + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{23}{72} t_1^6 + \frac{1}{6} t_1^5 t_2 \right) + \\ & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M} \cdot M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{я}}{C_M} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{яJ}}{C_M^2} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{яJ}^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4. \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \omega^{(3)}(t) &= 0; \\ \omega^{(2)}(t) &= 0; \\ \omega^{(1)}(t) &= 0; \\ \omega(t) &= \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2); \\ \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \times (t - 4t_1 - t_2); \\ I_{я}(t) &= \frac{1}{C_M} \cdot M_{CO}; \\ I_{я}^{(1)}(t) &= 0; \\ U(t) &= C_e \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot M_{CO}; \\ P(t) &= \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2; \\ W_6 &= \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot t_3 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_3. \end{aligned}$$

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

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

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2}J\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[(2t_1^3 + t_1^2t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \times \right. \\
 & \left. \times (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^5 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{CO}}^2 - M_{\text{CO}}J\omega_{\max}^{(3)} \times \right. \\
 & \left. \times (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{4}J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^4 \right\} - \\
 & - \frac{L_{\text{я}}J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[M_{\text{CO}} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}J\omega_{\max}^{(3)} \times (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3 \right]; \\
 W_7 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{CO}}\omega_{\max}^{(3)} \left(\frac{47}{24}t_1^4 + t_1^3t_2 \right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{23}{72}t_1^6 + \frac{1}{6}t_1^5t_2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}}J\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\
 & - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}}J}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}}J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.
 \end{aligned}$$

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

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

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3);$$

$$\begin{aligned}
 \omega^{(1)}(t) = & -\frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \\
 & + \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2;
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{143}{24}t_1^4 + 4t_1^3t_2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) + \\
 & + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + t_1^2t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{4}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \times
 \end{aligned}$$

$$\times (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{24}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + J\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - t_2 - t_3)];$$

$$\begin{aligned}
 U(t) = & C_e\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{11}{6}t_1^3 + t_1^2t_2 \right) - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}t_1 \times \right. \\
 & \left. \times (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \times \\
 & \times \left\{ M_{\text{CO}} + J\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}}J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - t_2 - t_3)];
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} \cdot \left[\left(\frac{11}{6}t_1^3 + t_1^2t_2 \right) - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{2}t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] + J\omega_{\max}^{(3)} \times \right. \\
 & \left. \times \left[-\left(\frac{11}{12}t_1^5 + \frac{1}{2}t_1^4t_2 \right) - \left(\frac{19}{12}t_1^4 + t_1^3t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \left(\frac{5}{3}t_1^3 - \frac{1}{2}t_1^2t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6}t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{5}{12}t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4 + \frac{1}{12} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^5 \right] \right\} + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \times
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \times \left\{ M_{CO}^2 + 2M_{CO}J\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \right. \right. \\ & \quad \left. \left. + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left[\frac{1}{4}t_1^4 + t_1^3 \times \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \times (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - t_1 \times \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \times (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4 \right] \right\} + \frac{L_{я}J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \times \\ & \quad \times \left\{ M_{CO} \cdot [-t_1 + (t - 5t_1 - t_2 - t_3)] + J\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2 \times \right. \right. \\ & \quad \left. \left. \times (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{3}{2}t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 \right] \right\}; \\ W_8 &= \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO}\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{35}{24}t_1^4 + t_1^3t_2 \right) - \frac{C_e}{C_M} J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{85}{72}t_1^6 + \frac{5}{6}t_1^5t_2 \right) + \\ & \quad + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 - \frac{5}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}J\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{43}{60} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\ & \quad - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я}J}{C_M^2} \cdot M_{CO}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{3}{8} \cdot \frac{L_{я}J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4. \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{89}{12}t_1^4 + 5t_1^3t_2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) + \\ & \quad + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \times (t - 6t_1 - t_2 - t_3); \end{aligned}$$

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

$$I_{я}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_e\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2t_2) - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \times \left[M_{CO} - J\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \right];$$

$$\begin{aligned} P(t) &= \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left\{ M_{CO} \cdot \left[(t_1^3 + t_1^2t_2) - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right] - \right. \\ & \quad \left. - J\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[(t_1^5 + t_1^4t_2) - t_1^4 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) \right] \right\} + \frac{R_{я}}{C_M^2} \times \\ & \quad \times \left\{ M_{CO}^2 - 2M_{CO}J\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4 \right\}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} W_9 &= \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO}\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(t_1^3t_2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^2 \right) - \frac{C_e}{C_M} J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(t_1^5t_2 + \frac{1}{2}t_1^4t_2^2 \right) + \\ & \quad + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_2 - 2 \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}J\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2t_2 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4t_2. \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3);$$

$$U(t) = C_e \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot [t_1^3 - t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left[-t_1^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] \right\} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \times (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3);$$

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

$$W_{10} = \frac{13}{24} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{CO}} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{35}{72} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}}^2 \cdot t_1 - \\ - \frac{5}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}} J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{43}{60} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 + \\ + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{CO}} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{3}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.$$

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

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

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \times (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2;$$

$$\omega(t) = \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \times \\ \times (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3 \times \\ \times (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{4} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4;$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left\{ M_{\text{CO}} + J \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] \right\};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)];$$

$$\begin{aligned}
 U(t) &= C_e \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} t_1 \times \right. \\
 &\quad \times (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \left. \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \times \\
 &\quad \times \left\{ M_{CO} + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] \right\} + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)]; \\
 P(t) &= \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left\{ M_{CO} \cdot \left[\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{2} t_1 \times \right. \right. \\
 &\quad \times (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \left. \right] + J \omega_{\max}^{(3)} \times \\
 &\quad \times \left[-\frac{1}{12} t_1^5 + \frac{5}{12} t_1^4 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{5}{6} t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{5}{6} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \frac{5}{12} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4 + \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{12} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^5 \right] \left. \right\} + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{CO}^2 + 2M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^2 + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 \right] + J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \times \right. \\
 &\quad \times \left[\frac{1}{4} t_1^4 - t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - t_1 \times \right. \\
 &\quad \times (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{4} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \left. \right] \left. \right\} + \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \times \\
 &\quad \times \left\{ M_{CO} \cdot [t_1 - (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)] + J \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 \times \right. \right. \\
 &\quad \times (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 \left. \right] \left. \right\}; \\
 W_{11} &= \frac{1}{24} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{1}{72} \cdot \frac{C_e}{C_M} J \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot t_1 - \\
 &\quad - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO} J \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 + \\
 &\quad + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4.
 \end{aligned}$$

Величина электрической энергии, затраченной за время цикла движения исполнительного органа якорной цепью электропривода, будет равна:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) + \\
 &\quad + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot (8t_1 + 2t_2 + t_3) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + 2t_1^4 t_2 \right).
 \end{aligned}$$

Так как

$$\omega_{\max}^{(3)} \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \text{ и } (8t_1 + 2t_2 + t_3) = T_{\text{ц}},$$

то в результате подстановки получим соотношение:

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{CO} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{CO}^2 \cdot T_{\text{ц}} + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + 2t_1^4 t_2 \right),$$

где $T_{\text{ц}}$ – время цикла, с.

Заданные параметры исследуемого электропривода:

$$C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}; C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}; R_{я} = 5 \text{ Ом}; L_{я} = 0,1 \text{ Гн}; J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью электродвигателя и его ЭДС, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;

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

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

J – момент инерции электропривода, кг · м².

Ограничения контролируемых электрических и механических координат исследуемого электропривода: $U_{доп} = 250$ В; $I_{доп} = 8$ А; $\omega_{доп} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Момент сопротивления равен $M_{CO} = 5$ Н · м. При этом допустимое значение первой производной угловой скорости электропривода равно:

$$\omega_{доп}^{(1)} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

В процессе исследований выполнен численный эксперимент, результаты которого сведены в таблицу 1. Наряду с этим, задано постоянное значение перемещения исполнительного органа электропривода, равное: $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 800$ рад.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента

$\omega_{\max}^{(3)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$	$\omega_{\max}^{(2)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	$t_1, \text{с}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$T_{ц}, \text{с}$	$\varphi_{гр.2}, \text{рад}$	$Q_1, \text{Дж}$	$W_1, \text{Дж}$
156,25	125	0,8	0	1,8	8,2	512	$852 \frac{4}{15}$	$4852 \frac{4}{15}$
256	160	0,625	0,35	2,15	7,85	456	$837 \frac{1}{3}$	$4837 \frac{1}{3}$
400	200	0,5	0,6	2,4	7,6	416	$826 \frac{1}{3}$	$4826 \frac{1}{3}$
625	250	0,4	0,8	2,6	7,4	384	$818 \frac{2}{15}$	$4818 \frac{2}{15}$
1024	320	0,3125	0,975	2,775	7,225	356	$810 \frac{2}{3}$	$4810 \frac{2}{3}$
1600	400	0,25	1,1	2,9	7,1	336	$805 \frac{1}{3}$	$4805 \frac{1}{3}$
2500	500	0,2	1,2	3,0	7,0	320	$801 \frac{1}{15}$	$4801 \frac{1}{15}$
4096	640	0,15625	1,2875	3,0875	6,9125	306	$797 \frac{1}{3}$	$4797 \frac{1}{3}$
6400	800	0,125	1,35	3,15	6,85	296	$794 \frac{2}{3}$	$4794 \frac{2}{3}$
10000	1000	0,1	1,4	3,2	6,8	288	$792 \frac{8}{15}$	$4792 \frac{8}{15}$
15625	1250	0,08	1,44	3,24	6,76	281,6	$790 \frac{62}{75}$	$4790 \frac{62}{75}$
25600	1600	0,0625	1,475	3,275	6,725	276	$789 \frac{1}{3}$	$4789 \frac{1}{3}$
40000	2000	0,05	1,5	3,3	6,7	272	$788 \frac{4}{15}$	$4788 \frac{4}{15}$

Выводы. После обработки полученных результатов установлена зависимость величины электрической энергии, потребляемой якорной цепью программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода от величины третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода. Данные величины имеют обратно-пропорциональную зависимость – при увеличении значения третьей производной угловой скорости исполнительного органа программно-управляемого оптимального по быстродействию электропривода, величина затрачиваемой электроэнергии якорной цепью электропривода уменьшается.

Литература

1. Добробаба Ю.П., Хорцев А.Л. Особо точный позиционный электропривод постоянного тока: монография. – Краснодар : Изд-во ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2014. – 104 с.

References

1. Dobrobaba Yu.P., Khortsev A.L. Particularly accurate positional direct current electric drive: monograph. – Krasnodar : Publishing house of FGBOU VO «KubGTU», 2014. – 104 p.