

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕЦИЗИОННОГО ПОЗИЦИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА

Ю.П. ДОБРОБАБА, Г.А. КОШКИН, В.П. СИНЮК

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: VITALI771@yandex.ru*

В статье представлена оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока, состоящая из пятнадцати этапов. Оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода отличается от оптимальной по быстродействию диаграммы при средних перемещениях исполнительного органа электропривода наличием этапа с установившемся движением. Аналитические зависимости электроэнергии на первых семи этапах (разгон электропривода) и на последних семи этапах (торможение электропривода) аналогичны для обеих диаграмм. Для этапа с установившемся движением (этап 8) выведены аналитические зависимости механических, электрических и энергетических координат электропривода от времени. Для остальных этапов перемещения представлены аналитические зависимости электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени. Получена аналитическая зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

Ключевые слова: прецизионный электропривод, большие перемещения исполнительного органа электропривода, электроэнергия.

В монографии [1] показано, что система автоматического регулирования (САР) перемещения исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока описывается системой дифференциальных уравнений четвёртого порядка. Ранее в статье [2] для электроприводов переменного тока (силовая часть которых представима системой дифференциальных уравнений четвёртого порядка) разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений его исполнительного органа. В данной работе предлагается использовать эту диаграмму для прецизионных позиционных электроприводов постоянного тока. На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа прецизионного позиционного электропривода постоянного тока с ограничением скорости и её первой, второй

и третьей производных. На первом, седьмом, одиннадцатом и тринадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на третьем, пятом, девятом и пятнадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(3)}$; на втором, четвертом, шестом, восьмом, десятом, двенадцатом и четырнадцатом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. Длительность первого, третьего, пятого, седьмого, девятого, одиннадцатого, тринадцатого и пятнадцатого этапов равна t_1 ; длительность второго, шестого, десятого и четырнадцатого этапов равна t_2 ; длительность четвертого и двенадцатого этапов равна t_3 ; длительность восьмого этапа равна t_4 . На втором и четырнадцатом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(2)}$; на шестом и десятом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(2)}$; на четвертом, восьмом и двенадцатом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. На четвертом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп}}^{(1)}$; на двенадцатом этапе первая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус $-\omega_{\text{доп}}^{(1)}$. На восьмом этапе скорость исполнительного органа электропривода равна допустимому значению $\omega_{\text{доп}}$.

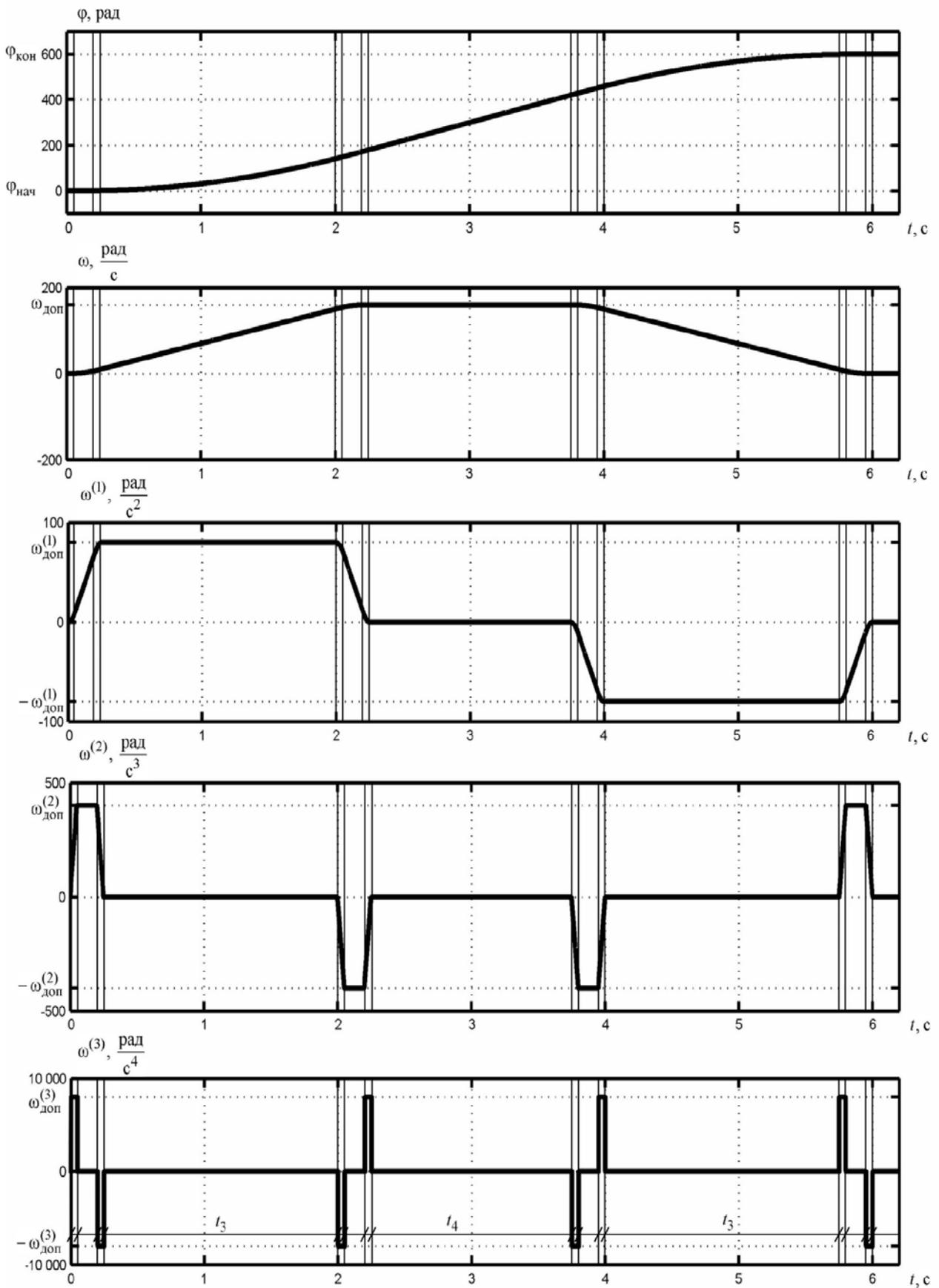


Рисунок 1.

Угол поворота (перемещение) увеличивается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для диаграммы справедливы соотношения:

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

$$t_4 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}};$$

$$T = 8t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4.$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением скорости и её первой, второй и третьей производных справедлива при выполнении условия:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \geq \varphi_{\text{гр.3}},$$

$$\varphi_{\text{гр.3}} = \omega_{\text{доп}} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \right].$$

Зависимости электроэнергии, потребляемой электроприводом на 1-7 этапах, от времени аналогичны полученным в статье [3].

Зависимости электроэнергии, потребляемой электроприводом на 9-15 этапах, от времени соответственно аналогичны полученным в статье [3] для этапов 8-14.

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

$$W_1 = \frac{1}{24} \cdot \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{72} \cdot \frac{C_e}{C_m} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_m^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_m^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_m^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 +$$

$$+ \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_m^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_m^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4,$$

где W – электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, Дж;

C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью исполнительного органа электропривода и ЭДС электродвигателя, $\frac{В \cdot с}{рад}$;

C_m – коэффициент пропорциональности между током и электромагнитным моментом электродвигателя, В · с;

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

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

J – момент инерции электропривода, кг · м².

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

$$W_2 = \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 t_2 + \frac{1}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) +$$

$$+ \frac{C_e}{C_m} \cdot J \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{12} t_1^5 t_2 + \frac{5}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^4 \right) +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 + 2 \cdot \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) +$$

$$+ \frac{L_{я} J}{C_m^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1 t_2 + \frac{L_{я} J^2}{C_m^2} \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right).$$

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

$$W_3 = \frac{C_e}{C_m} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left(\frac{13}{24} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \frac{C_e}{C_m} \cdot J \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{35}{72} t_1^6 + \frac{17}{12} t_1^5 t_2 + \right.$$

$$\left. + \frac{17}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 \right) + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{я}}{C_m^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left(\frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{43}{60} t_1^5 + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \\
 & + \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right).
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 W_4 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(t_1^3 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 t_3^2 \right) + \\
 & + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(t_1^5 t_3 + \frac{5}{2} t_1^4 t_2 t_3 + 2 t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 + \frac{1}{2} t_1^4 t_3^2 + \right. \\
 & \left. + t_1^3 t_2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3^2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_3 + 2 \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(t_1^4 t_3 + 2 t_1^3 t_2 t_3 + t_1^2 t_2^2 t_3 \right).
 \end{aligned}$$

Этап 5. В интервале времени $(2t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (3t_1 + t_2 + t_3)$:

$$\begin{aligned}
 W_5 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{35}{24} t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{85}{72} t_1^6 + \frac{37}{12} t_1^5 t_2 + \frac{29}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 + \frac{5}{6} t_1^5 t_3 + \frac{11}{6} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{43}{60} t_1^5 + \right. \\
 & \left. + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right).
 \end{aligned}$$

Этап 6. В интервале времени $(3t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (3t_1 + 2t_2 + t_3)$:

$$\begin{aligned}
 W_6 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 t_2 + \frac{11}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{5}{6} t_1 t_2^3 + t_1^2 t_2 t_3 + t_1 t_2^2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{11}{12} t_1^5 t_2 + \frac{55}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{7}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{3}{8} t_1^2 t_2^4 + \frac{1}{2} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \right.
 \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \Big) - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 t_2 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2).$$

Этап 7. В интервале времени

$$(3t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (4t_1 + 2t_2 + t_3):$$

$$\begin{aligned} W_7 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{47}{24} t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \\ & + \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{23}{72} t_1^6 + \frac{1}{2} t_1^5 t_2 + \frac{1}{6} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^5 t_3 + \frac{1}{6} t_1^4 t_2 t_3 \right) + \\ & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4. \end{aligned}$$

Этап 8. В интервале времени $(4t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (4t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4)$:

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

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

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

$$\omega(t) = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3);$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(4t_1^4 + 8t_1^3 t_2 + 5t_1^2 t_2^2 + t_1 t_2^3 + 3t_1^3 t_3 + \frac{9}{2} t_1^2 t_2 t_3 + \frac{3}{2} t_1 t_2^2 t_3 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 t_3^2 \right) + \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) \cdot (t - 4t_1 - 2t_2 - t_3). \end{aligned}$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}};$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}};$$

$$P(t) = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2;$$

$$W_8 = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3) \cdot t_4 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_4,$$

где $I_{я}$ – ток якорной цепи электропривода, А;

$I_{я}^{(1)}$ – первая производная тока якорной цепи электропривода, А;

U – напряжение, приложенное к якорной цепи электропривода, В;

P – мощность, потребляемая якорной цепью электропривода, Вт.

Этап 9. В интервале времени

$$(4t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (5t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4):$$

$$\begin{aligned} W_9 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left(\frac{47}{24} t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \\ & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{23}{72} t_1^6 + \frac{1}{2} t_1^5 t_2 + \frac{1}{6} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1^5 t_3 + \frac{1}{6} t_1^4 t_2 t_3 \right) + \\ & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 - \\ & - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4. \end{aligned}$$

Этап 10. В интервале времени

$$(5t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (5t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4):$$

$$\begin{aligned} W_{10} = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 t_2 + \frac{11}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{5}{6} t_1 t_2^3 + t_1^2 t_2 t_3 + t_1 t_2^2 t_3 \right) - \\ & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{11}{12} t_1^5 t_2 + \frac{55}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{7}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{3}{8} t_1^2 t_2^4 + \frac{1}{2} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 \right) + \\ & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 - \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{доп}^{(3)} \cdot (t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot (t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2). \end{aligned}$$

Этап 11. В интервале времени $(5t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (6t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4):$

$$\begin{aligned}
 W_{11} = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{35}{24} t_1^4 + 2 t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) - \\
 & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{85}{72} t_1^6 + \frac{37}{12} t_1^5 t_2 + \frac{29}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 + \frac{5}{6} t_1^5 t_3 + \frac{11}{6} t_1^4 t_2 t_3 + t_1^3 t_2^2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{43}{60} t_1^5 + \right. \\
 & \left. + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right)
 \end{aligned}$$

Этап 12. В интервале времени $(6t_1 + 3t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (6t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4)$:

$$\begin{aligned}
 W_{12} = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(t_1^3 t_3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 t_3^2 \right) - \\
 & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(t_1^5 t_3 + \frac{5}{2} t_1^4 t_2 t_3 + 2 t_1^3 t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^3 t_3 + \frac{1}{2} t_1^4 t_3^2 + \right. \\
 & \left. + t_1^3 t_2 t_3^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 t_3^2 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_3 - 2 \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(t_1^4 t_3 + 2 t_1^3 t_2 t_3 + t_1^2 t_2^2 t_3 \right)
 \end{aligned}$$

Этап 13. В интервале времени $(6t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4) \leq t \leq (7t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4)$:

$$\begin{aligned}
 W_{13} = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{13}{24} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{35}{72} t_1^6 + \frac{17}{12} t_1^5 t_2 + \right. \\
 & \left. + \frac{17}{12} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^3 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{5}{3} t_1^3 + 2 t_1^2 t_2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{43}{60} t_1^5 + \frac{5}{3} t_1^4 t_2 + t_1^3 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \\
 & - \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{3}{8} t_1^4 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2 \right)
 \end{aligned}$$

Этап 14. В интервале времени $(7t_1 + 3t_2 + 2t_3 + t_4) \leq t \leq (7t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4)$:

$$W_{14} = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 t_2 + \frac{1}{4} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} t_1 t_2^3 \right) -$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{12} t_1^5 t_2 + \frac{5}{24} t_1^4 t_2^2 + \frac{1}{4} t_1^3 t_2^3 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^4 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 - 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^4 t_2 + \frac{1}{2} t_1^3 t_2^2 + \frac{1}{3} t_1^2 t_2^3 \right) + \\
 & + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 t_2 - \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right)
 \end{aligned}$$

Этап 15. В интервале времени $(7t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4) \leq t \leq (8t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4)$:

$$\begin{aligned}
 W_{15} = & \frac{1}{24} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^4 - \frac{1}{72} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^6 + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{20} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^5 + \\
 & + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{8} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot t_1^4
 \end{aligned}$$

Электроненергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна:

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(8t_1^4 + 16t_1^3 t_2 + 10t_1^2 t_2^2 + 2t_1 t_2^3 + 6t_1^3 t_3 + 9t_1^2 t_2 t_3 + 3t_1 t_2^2 t_3 + t_1^2 t_3^2 + t_1 t_2 t_3^2 + \right. \\
 & \left. + 2t_1^3 t_4 + 3t_1^2 t_2 t_4 + t_1 t_2^2 t_4 + t_1^2 t_3 t_4 + t_1 t_2 t_3 t_4 \right) + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot (8t_1 + 4t_2 + 2t_3) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\text{доп}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 + 2t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + 2t_1^2 t_2^2 t_3 \right)
 \end{aligned}$$

Так как $\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot \left(8t_1^4 + 16t_1^3 t_2 + 10t_1^2 t_2^2 + 2t_1 t_2^3 + 6t_1^3 t_3 + 9t_1^2 t_2 t_3 + 3t_1 t_2^2 t_3 + t_1^2 t_3^2 + t_1 t_2 t_3^2 + \right. \\ \left. + 2t_1^3 t_4 + 3t_1^2 t_2 t_4 + t_1 t_2^2 t_4 + t_1^2 t_3 t_4 + t_1 t_2 t_3 t_4 \right) = (\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}})$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot (8t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4) +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 + 2t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + 2t_1^2 t_2^2 t_3 \right).$$

Так как $(8t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4) = T_{ц}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot T_{ц} +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^5 + \frac{23}{3} t_1^4 t_2 + 6t_1^3 t_2^2 + \frac{4}{3} t_1^2 t_2^3 + 2t_1^4 t_3 + 4t_1^3 t_2 t_3 + 2t_1^2 t_2^2 t_3 \right)$$

Так как $\omega_{доп}^{(3)} \cdot t_1 = \omega_{доп}^{(2)}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot T_{ц} +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{46}{15} t_1^3 + \frac{23}{3} t_1^2 t_2 + 6t_1 t_2^2 + \frac{4}{3} t_2^3 + 2t_1^2 t_3 + 4t_1 t_2 t_3 + 2t_2^2 t_3 \right)$$

В статье рассматриваются электропривод, имеющие следующие

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

На допустимые значения угловой скорости и её первой, второй и третьей производных наложены ограничения:

$$\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}; \omega_{доп}^{(1)} = 80 \frac{рад}{с^2}; \omega_{доп}^{(2)} = 400 \frac{рад}{с^3}; \omega_{доп}^{(3)} = 8000 \frac{рад}{с^4}.$$

Момент сопротивления электропривода равен: $M_{co} = 2,5 Н \cdot м$.

При этом граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равно:

$$\varphi_{гр.3} = 160 \cdot \left[\frac{160}{80} + \frac{80}{400} + \frac{400}{8000} \right]^2 = 360 рад.$$

В таблице 1 представлены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода: определены значения длительности этапа t_4 ; длительности цикла $T_{ц}$; значения электроэнергии W , потребляемой

якорной цепью электропривода за цикл, для различных значений заданного перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода

$$\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$$

Представленная на рисунке 1 оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода имеет следующие

параметры: $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 600 \text{ рад}$; $t_1 = 0,05 \text{ с}$; $t_2 = 0,15 \text{ с}$; $t_3 = 1,75 \text{ с}$; $t_4 = 1,5 \text{ с}$;

$$T_{\text{ц}} = 6 \text{ с}; \quad W = 1187 \frac{289}{375} \text{ Дж}$$

Длительность первого, третьего, пятого, седьмого, девятого, одиннадцатого, тринадцатого и пятнадцатого этапов: $t_1 = 0,05 \text{ с}$. Длительность второго, шестого, десятого и четырнадцатого этапов: $t_2 = 0,15 \text{ с}$. Длительность четвертого и двенадцатого этапов: $t_3 = 0,25 \text{ с}$. Длительность восьмого этапа: $t_4 = 1,5 \text{ с}$.

На рисунке 2 приведена зависимость длительности цикла $T_{\text{ц}}$ от заданного перемещения исполнительного органа электропривода

$$\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$$

На рисунке 3 приведена зависимость электроэнергии W , потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$.

В результате проведённого исследования определены аналитические зависимости электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, на каждом этапе движения и за цикл от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента прецизионного электропривода

| $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$, рад | t_4 , с | $T_{\text{ц}}$, с | W , Дж |
|--|-----------|--------------------|------------------------|
| 360 | 0 | 4,5 | $1187 \frac{289}{375}$ |
| 500 | 0,875 | 5,375 | $1555 \frac{203}{750}$ |

| | | | |
|-------|-------|--------|-------------------------|
| 1000 | 4 | 8,5 | $2867 \frac{289}{375}$ |
| 2000 | 10,25 | 14,75 | $5492 \frac{289}{375}$ |
| 3000 | 16,5 | 21 | $8117 \frac{289}{375}$ |
| 4000 | 22,75 | 27,25 | $10742 \frac{289}{375}$ |
| 5000 | 29 | 33,5 | $13367 \frac{289}{375}$ |
| 6000 | 35,25 | 39,75 | $15992 \frac{289}{375}$ |
| 7000 | 41,5 | 46 | $18617 \frac{289}{375}$ |
| 8000 | 47,75 | 52,25 | $21242 \frac{289}{375}$ |
| 9000 | 54 | 58,5 | $23867 \frac{289}{375}$ |
| 10000 | 60,25 | 64,75 | $26492 \frac{289}{375}$ |
| 11000 | 66,5 | 71 | $29117 \frac{289}{375}$ |
| 12000 | 72,75 | 77,25 | $31742 \frac{289}{375}$ |
| 13000 | 79 | 83,5 | $34367 \frac{289}{375}$ |
| 14000 | 85,25 | 89,75 | $36992 \frac{289}{375}$ |
| 15000 | 91,5 | 96 | $39617 \frac{289}{375}$ |
| 16000 | 97,75 | 102,25 | $42242 \frac{289}{375}$ |

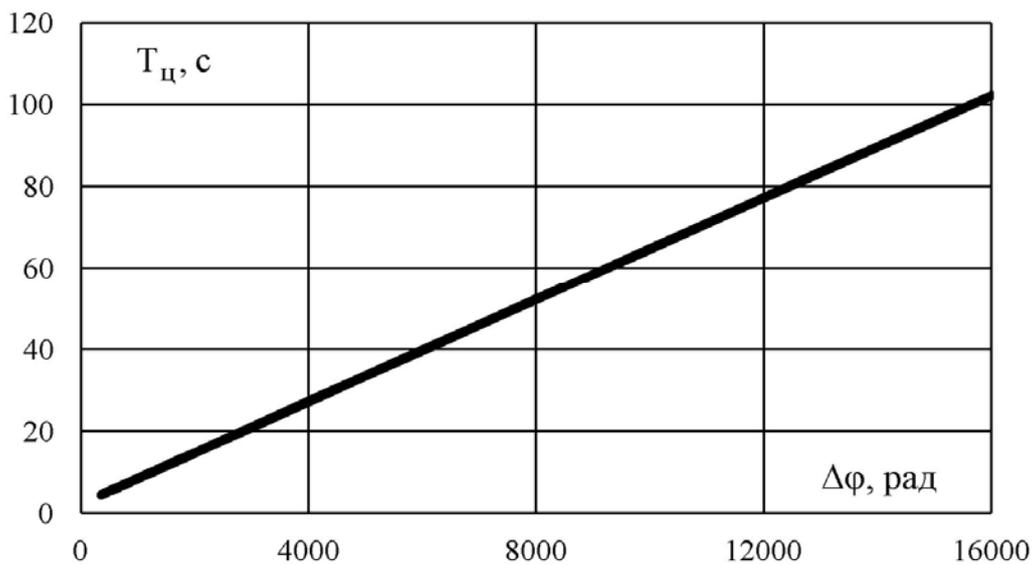


Рисунок 2

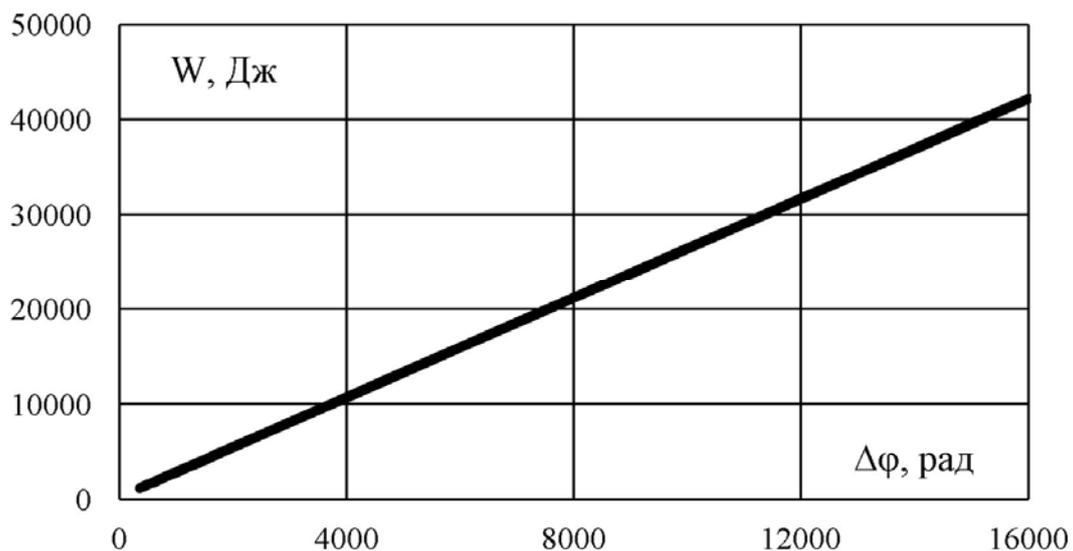


Рисунок 3

ЛИТЕРАТУРА

1. Особо точный позиционный электропривод постоянного тока: монография / Добробаба Ю. П., Хорцев А. Л. – Краснодар: Изд-во ФГБОУ ВПО "КубГТУ", 2014. – 104 с.
2. Добробаба Ю.П., Шпилев А.А., Мурлина Е.А. Разработка оптимальной по быстродействию диаграммы для больших перемещений электроприводов переменного тока // Известия вузов. Пищевая технология. – 2010. – № 4. – С. 95-98.

3. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при средних перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 1.

REFERENCES

1. Osobo tochnyyu pozitsionnyu elektroprivod postoyannogo toka: monografiya / Dobrobaba Yu. P., Khortsev A. L. – Krasnodar: Izd-vo FGBOU VPO "KubGTU", 2014. – 104 s.

2. Dobrobaba Yu.P., Shpilev A.A., Murlina E.A. Razrabotka optimalnoy po bystrodeystviyu diagrammy dlya bolshikh peremeshcheniy elektroprivodov peremennogo toka // Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya.-2010. - № 4.-S. 95-98.

3. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Opredelenie energeticheskikh kharakteristik pretsizionnogo pozitsionnogo elektroprivoda postoyannogo toka pri srednikh peremeshcheniyakh ego ispolnitelnogo organa // Nauchnye trudy KubGTU. – 2016. – № 1.

DETERMINATION OF THE POWER CHARACTERISTIC OF PRECISION DC ELECTRIC DRIVE FOR BIG MOVEMENT ITS EXECUTIVE BODY

YU.P. DOBROBABA, G.A. KOSHKIN, V.P. SINYUK

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350072;
e-mail: VITALI771@yandex.ru*

In this article submitted optimum speed diagrams for big movement of executive body of precision dc electric drive, which consist of 15 stage. The optimum speed diagrams for big movement of executive body of electric drive differs from optimum speed diagrams for medium movement of executive body of electric drive by presence of the stage with steady motion. The analytical dependences of electric power on first 7 stages (acceleration of the electric drive) and on last 7 stages (braking of the electric drive) are similar for both diagrams. The analytical dependences of mechanical, electrical and energy electric drive's coordinates on the stage 8 are gotten. The analytical dependences of electric power, consumed by anchor circuit, on time are gotten for all other stages. The analytical dependences of electric power, consumed by anchor circuit, on specified movement of electric drive's executive body and its parameters are defined.

Key words: precision electric drive, big movement of executive body of electric drive, electric power.