



УДК 62.83.52:62.503.56

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ВТОРОГО ВИДА ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

ENERGY EFFICIENT SECOND TYPE DIAGRAM FOR MOVEMENT OF EXECUTIVE BODY OF PRECISION DC ELECTRIC DRIVE

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный технологический университет
itstimetoprivod@yahoo.com

Кошкин Гордей Анатольевич

андидат технических наук,
начальник цеха НКУ, ООО «Прогресс»

Синюк В.П.

Кубанский государственный технологический университет
VITALI771@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена энергоэффективная второго вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока, состоящая из восьми этапов. Приведены алгоритмы, позволяющие определить параметры диаграмм, для различных случаев. Получена аналитическая зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

Ключевые слова: прецизионный электропривод, перемещение исполнительного органа электропривода, энергоэффективная диаграмма, электроэнергия.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Professor of Department of
power supply industrial enterprises,
Kuban state technological university
itstimetoprivod@yahoo.com

Koshkin Gordey Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences,
Foreman NKU, LLC Progress

Sinyuk V.P.

Kuban state technological university
VITALI771@yandex.ru

Annotation. In this article submitted energy efficient second type diagram for movement of executive body of precision dc electric drive, which consist of 10 stage. Algorithms for determining the parameters of the diagrams are given for different cases. The analytical dependences of electric power, consumed by anchor circuit, on specified movement of electric drive's executive body and its parameters are gotten.

Keywords: precision electric drive, movement of executive body of electric drive, energy efficient diagram, electric power.

Ранее в статьях [1–4] для оптимальных по быстродействию диаграмм определены аналитические зависимости электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл. В результате исследования установлено, что электропривод совершая перемещения за минимально возможное время, потребляет значительное количество электроэнергии. Для технологического производства зачастую более актуален вопрос минимально возможного потребления электроэнергии. В данной работе представлена энергоэффективная диаграмма, которая обеспечит выполнение данного условия.

На рисунке 1 представлена энергоэффективная второго вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока. На первом, пятом и восьмом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $\omega_{\max}^{(3)}$; на третьем, шестом и десятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению со знаком минус $-\omega_{\max}^{(3)}$; на втором, четвертом, седьмом и девятом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю.

Длительность первого и десятого этапов равна t_1 ; длительность второго и девятого этапов равна t_4 ; длительность третьего и восьмого этапов равна $t_1 + t_2$; длительность четвертого и седьмого этапов равна t_3 ; длительность пятого и шестого этапов равна t_2 . На втором и девятом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $\omega_{\max}^{(2)}$; на четвертом и седьмом этапах вторая производная скорости исполнительного органа элек-



тропровода равна минимальному значению $\omega_{\min}^{(2)}$. В момент времени $2t_1 + t_4$ первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $\omega_{\max}^{(1)}$; в момент времени $2t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4$ первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус $-\omega_{\max}^{(1)}$. В момент времени $2t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4$ скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения ω_{\max} . Угол поворота (перемещение) увеличивается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

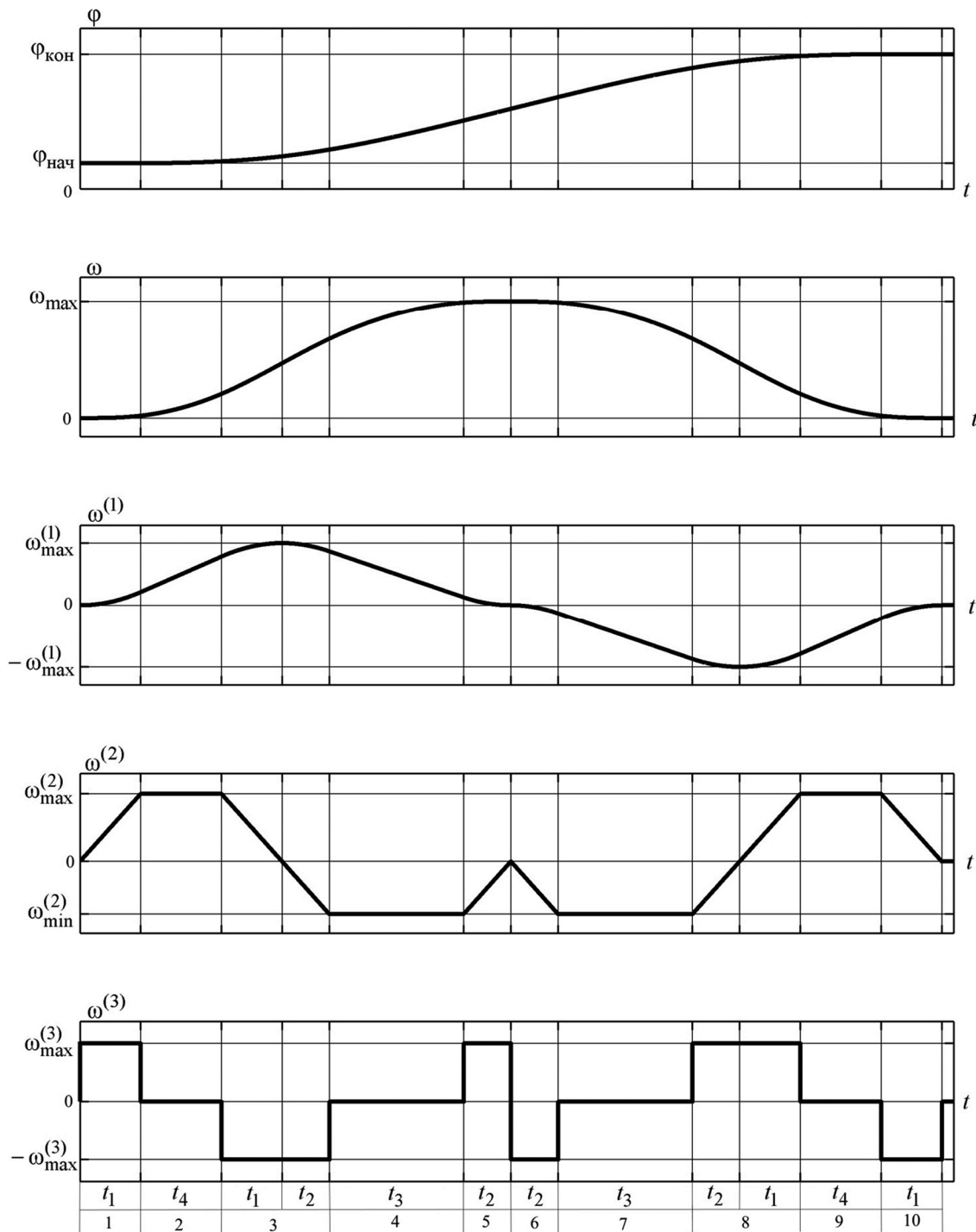


Рисунок 1 – Энергоэффективная второго вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока



Для диаграммы справедливы соотношения:

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

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{2}$$

$$\omega_{\min}^{(2)} = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_2; \tag{3}$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_2 \cdot (t_2 + t_3); \tag{4}$$

$$\omega_{\max} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left(t_1 + t_2 + \frac{1}{2}t_3 + \frac{1}{2}t_4 \right); \tag{5}$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 2\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left[2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 + t_2t_4 + \frac{1}{2}t_3t_4 + \frac{1}{6}t_4^2 \right]; \tag{6}$$

$$T_{\text{ц}} = 4t_1 + 4t_2 + 2t_3 + 2t_4. \tag{7}$$

Если $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ и $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$, то

$$\omega_{\text{доп}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1; \tag{8}$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{9}$$

$$\omega_{\min}^{(2)} = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_2; \tag{10}$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_2 \cdot (t_2 + t_3); \tag{11}$$

$$\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left(t_1 + t_2 + \frac{1}{2}t_3 + \frac{1}{2}t_4 \right); \tag{12}$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left[2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 + t_2t_4 + \frac{1}{2}t_3t_4 + \frac{1}{6}t_4^2 \right]; \tag{13}$$

$$T_{\text{ц}} = 4t_1 + 4t_2 + 2t_3 + 2t_4; \tag{14}$$

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{15}$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right]^2} \rightarrow -t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{16}$$



$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1 t_4}{t_2} - t_2. \tag{17}$$

Таким образом, если заданы значения длительности второго и девятого этапов t_4 , то по выше приведённым формулам определяются все параметры энергоэффективной второго вида диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока.

Если $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ и $t_1 = t_2$, то

$$t_1 = t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{18}$$

$$t_3 = t_4; \tag{19}$$

$$t_3^3 + 5t_1 t_3^2 + 8t_1^2 t_3 + 4t_1^3 - \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} = 0. \tag{20}$$

Уравнение имеет аналитическое решение

$$t_3 = \sqrt[3]{\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{4\omega_{\text{доп}}^{(2)}}} + \sqrt{\frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right]} + \sqrt[3]{\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{4\omega_{\text{доп}}^{(2)}}} - \sqrt{\frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \left[\frac{1}{27}t_1^3 + \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right]} - \frac{5}{3}t_1. \tag{21}$$

При этом достигается максимально возможное быстродействие.

Если $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ и $t_4 = 0$, то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{22}$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} + \frac{1}{4}t_1^2} - \frac{3}{2}t_1 \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} + \frac{1}{4}t_1^2} - \frac{3}{2}t_1 \right]^2} - t_1^2; \tag{23}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} - t_2. \tag{24}$$

Если $\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$, $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ и $\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$, то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{25}$$

$$t_4 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1} - t_1; \tag{26}$$



$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right] -$$

$$- \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \left[\sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} + \frac{1}{4} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right)^2} - \frac{3}{2} \cdot \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right]^2} \rightarrow$$

$$\rightarrow -t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{27}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1 t_4}{t_2} - t_2. \tag{28}$$

Если $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}$, $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ и $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$, то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{29}$$

$$t_2 = \left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right] -$$

$$- \sqrt{\left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4\right) \right]^2} - t_1 \cdot (t_1 + t_4); \tag{30}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1 t_4}{t_2} - t_2. \tag{31}$$

Если $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$, $t_1 = t_2$ и $t_4 = 0$, то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{гр.1.}}$$

При этом

$$t_1 = t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{32}$$

$$t_3 = 0; \tag{33}$$

$$\Phi_{\text{гр.1}} = 8 \cdot \frac{\left[\omega_{\text{доп}}^{(2)}\right]^4}{\left[\omega_{\text{доп}}^{(3)}\right]^3}. \tag{34}$$

Если $\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$, $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ и $t_1 = t_2$, то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{гр.2.}}$$

При этом

$$t_1 = t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{35}$$



$$t_3 = t_4 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1} - t_1; \tag{36}$$

$$\Phi_{\text{Гр.2}} = 2\omega_{\text{доп}}^{(1)} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}} \right]^2. \tag{37}$$

Если $\omega_{\text{мах}} = \omega_{\text{доп}}$, $\omega_{\text{мах}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, $\omega_{\text{мах}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ и $t_4 = 0$, то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{Гр.1*}}.$$

При этом

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{38}$$

$$t_2 = \left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} - t_1 \right] - \sqrt{\left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} - t_1 \right]^2 - t_1^2}; \tag{39}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} - t_2; \tag{40}$$

$$\Phi_{\text{Гр.1*}} = 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot \left(2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 \right). \tag{41}$$

Если $\omega_{\text{мах}} = \omega_{\text{доп}}$, $\omega_{\text{мах}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$, $\omega_{\text{мах}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ и $\omega_{\text{мах}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$, то

$$(\Phi_{\text{кон}} - \Phi_{\text{нач}}) = \Phi_{\text{Гр.2*}}.$$

При этом

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \tag{42}$$

$$t_4 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1} - t_1; \tag{43}$$

$$t_2 = \left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right] - \sqrt{\left[\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4)} - \left(t_1 + \frac{1}{2}t_4 \right) \right]^2 - t_1 \cdot (t_1 + t_4)}; \tag{44}$$

$$t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} + \frac{t_1t_4}{t_2} - t_2; \tag{45}$$

$$\Phi_{\text{Гр.2*}} = 2\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_4) \cdot \left(2t_1t_2 + t_1t_3 + 2t_2^2 + 2t_2t_3 + \frac{1}{3}t_3^2 + t_2t_4 + \frac{1}{2}t_3t_4 + \frac{1}{6}t_4^2 \right). \tag{46}$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна:



$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot T_{ц} + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(3)} \right]^2 \cdot \left(\frac{23}{15} t_1^5 + 2 t_1^4 t_2 + \frac{23}{6} t_1^4 t_4 + 4 t_1^3 t_2 t_4 + 3 t_1^3 t_4^2 - \right. \\
 & \left. - \frac{2}{3} t_1^2 t_2^3 + 2 t_1^2 t_2 t_4^2 + \frac{2}{3} t_1^2 t_4^3 - \frac{2}{3} t_1 t_2^3 t_4 + \frac{1}{5} t_2^5 + \frac{1}{2} t_2^4 t_3 + t_2^3 t_3^2 + \frac{2}{3} t_2^2 t_3^3 \right), \quad (47)
 \end{aligned}$$

где 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, $В \cdot с$; M_{co} – момент сопротивления электропривода, $Н \cdot м$; $R_{я}$ – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом; $L_{я}$ – индуктивность якорной цепи электропривода, Гн; J – момент инерции электропривода, $кг \cdot м^2$.

В статье рассматривается электропривод, имеющие следующие параметры:

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

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

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

При этом граничные значения угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равны:

$$\varphi_{гр.1} = 8 \cdot \frac{400^4}{8000^3} = 0,4 \text{ рад}.$$

$$\varphi_{гр.2} = 2 \cdot 80 \cdot \left[\frac{80}{400} + \frac{400}{8000} \right]^2 = 10 \text{ рад}.$$

$$t_1 = \frac{400}{8000} = 0,05 \text{ с};$$

$$\begin{aligned}
 t_2 = & \left[\frac{160}{8000 \cdot 0,05^2} - 0,05 \right] - \sqrt{\left[\frac{160}{8000 \cdot 0,05^2} - 0,05 \right]^2 - 0,05^2} = \\
 & = 7,95 - 7,949842766 = 0,000157234 \text{ с};
 \end{aligned}$$

$$t_3 = \frac{0,05^2}{0,000157234} - 0,000157234 = 15,89971175 \text{ с};$$

$$\begin{aligned}
 \varphi_{гр.1*} = & 40 \cdot (0,0000157234 + 0,794985587 + 0,000000049 + \\
 & + 0,00499995 + 84,26694458) = 3402,677835 \text{ рад}.
 \end{aligned}$$

$$t_1 = \frac{400}{8000} = 0,05 \text{ с};$$



$$t_4 = \frac{80}{8000 \cdot 0,05} - 0,05 = 0,15 \text{ с};$$

$$t_2 = \left[\frac{160}{8000 \cdot 0,05 \cdot 0,2} - 0,125 \right] - \sqrt{\left[\frac{160}{8000 \cdot 0,05 \cdot 0,2} - 0,125 \right]^2 - 0,01} =$$

$$= 1,875 - 1,872331434 = 0,002668566 \text{ с};$$

$$t_3 = \frac{0,05^2}{0,002668566} + \frac{0,05 \cdot 0,15}{0,002668566} - 0,002668566 = 3,744662397 \text{ с};$$

$$\Phi_{гр.2*} = 160 \cdot (0,0002668566 + 0,187233119 + 0,000014242 +$$

$$+ 0,019985757 + 4,674165489 + 0,000400284 +$$

$$+ 0,280849679 + 0,00375) = 826,6664682 \text{ рад}.$$

Проведён численный эксперимент. При заданных значениях начального угла поворота $\varphi_{нач}$ и конечного значения угла поворота $\varphi_{кон}$ задавались различные значения длительности второго и девятого этапов t_4 и определялись: все параметры серии энергоэффективных второго вида диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока и значения электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл. По результатам численного эксперимента построена зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода за цикл, от длительности цикла. Из этой зависимости следует, что существует такое значение длительности второго и девятого этапов t_4 , при котором якорная цепь электропривода потребляет минимально возможное значение электроэнергии за цикл.

Литература:

1. Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при малых перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 13.
2. Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при небольших перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2015. – № 13.
3. Дობробаба 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.
4. Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Синюк В.П. Определение энергетических характеристик прецизионного позиционного электропривода постоянного тока при больших перемещениях его исполнительного органа // Научные труды КубГТУ. – 2016. – № 5.

References:

1. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at small movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2015. – № 13.
2. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at small movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2015. – № 13.
3. Dobrobab Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at average movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2016. – № 1.
4. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Sinyuk V.P. Definition of power characteristics of the precision position electric drive of a direct current at big movements of his executive body // Scientific works of KUBGTU. – 2016. – № 5.