

УДК 62.83.52:62.503.56

*ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ПЕРВОГО ВИДА ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА*

**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*

Представлена энергоэффективная первого вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока, состоящая из восьми этапов. Приведены алгоритмы, позволяющие определить параметры диаграмм для различных случаев: а) если ограничения угловой скорости и ее производных отсутствуют; б) если максимальное значение третьей производной угловой скорости равно допустимому; в) если максимальное значение третьей производной угловой скорости равно допустимому и длительности первого и четвертого этапов равны; г) если максимальные значения второй и третьей производных угловой скорости равны допустимым; д) если максимальные значения угловой скорости и ее третьей производной равны допустимым; е) если максимальные значения второй и третьей производных угловой скорости равны допустимым и длительности первого и четвертого этапов равны; ж) если максимальные значения угловой скорости и ее второй и третьей производных равны допустимым. Получена аналитическая зависимость электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, от заданного перемещения исполнительного органа электропривода и параметров его силовой части.

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

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 первого вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода

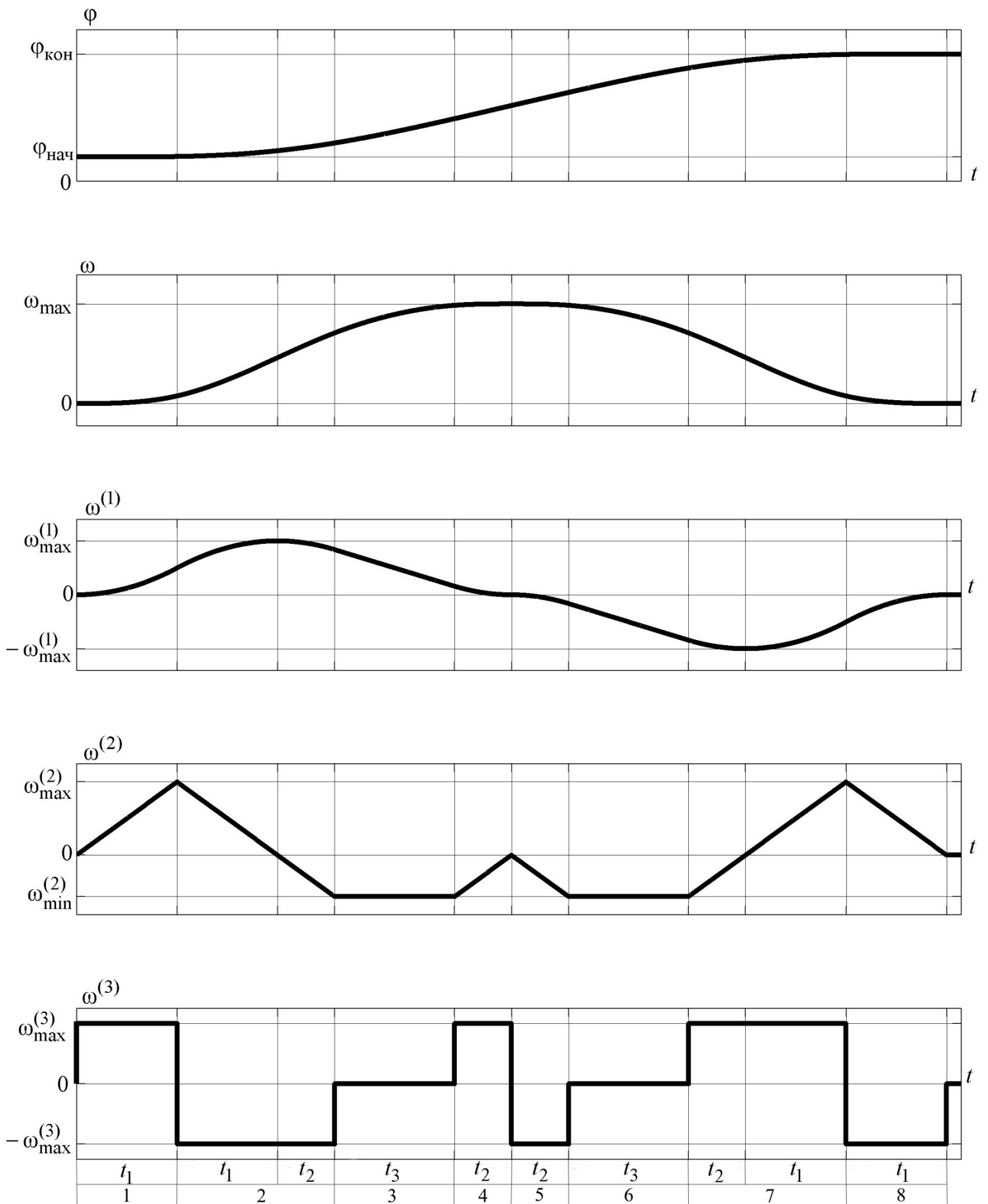


Рисунок 1 – Энергоэффективная первого вида диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока

постоянного тока. На первом, четвертом и седьмом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению  $\omega_{\max}^{(3)}$ ; на втором, пятом и восьмом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению со знаком минус  $-\omega_{\max}^{(3)}$ ; на третьем и шестом этапах третья производная скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. Длительность первого и восьмого этапов равна  $t_1$ ; длительность второго и седьмого этапов равна  $t_1 + t_2$ ; длительность третьего и шестого этапов равна  $t_3$ ; длительность четвертого и пятого этапов равна  $t_2$ . В моменты времени  $t_1$  и  $3t_1 + 4t_2 + 2t_3$  вторая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}^{(2)}$ ; на третьем и шестом этапах вторая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает минимального значения  $\omega_{\min}^{(2)}$ . В момент времени  $2t_1$  первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}^{(1)}$ ; в момент времени  $2t_1 + 4t_2 + 2t_3$  первая производная скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения со знаком минус  $-\omega_{\max}^{(1)}$ . В момент времени  $2t_1 + 2t_2 + t_3$  скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения  $\omega_{\max}$ . Угол поворота (перемещение) увеличивается от начального значения угла поворота  $\varphi_{\text{нач}}$  до конечного значения угла поворота  $\varphi_{\text{кон}}$ .

Для диаграммы справедливы соотношения:

$$\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1; \quad \omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2; \quad \omega_{\min}^{(2)} = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_2;$$

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

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

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

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

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

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1; \quad \omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2; \quad \omega_{\text{min}}^{(2)} = -\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_2;$$

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

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

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

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

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

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

Таким образом, если заданы значения длительности первого и восьмого этапов  $t_1$ , то по вышеприведенным формулам определяются все параметры энергоэффективной первого вида диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока.

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

$$t_1 = t_2 = 4\sqrt{\frac{1}{8} \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}}; \quad t_3 = 0.$$

При этом достигается максимально возможное быстродействие.

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

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}.$$

Если  $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}$  и  $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$ , то справедлива система уравнений:

$$\begin{cases} \omega_{\text{доп}} = \omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot \left( t_1 + t_2 + \frac{1}{2}t_3 \right); \\ t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} - t_2. \end{cases}$$

Из системы уравнений следует, что

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

$$t_2^2 + 2 \cdot \left[ t_1 - \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} \right] \cdot t_2 + t_1^2 = 0;$$

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

Если  $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$ ,  $\omega_{\text{max}}^{(3)} = \omega_{\text{доп}}^{(3)}$  и  $t_1 = t_2$ , то  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.1}}$ .

При этом

$$t_1 = t_2 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; \varphi_{\text{гр.1}} = 8 \cdot \frac{[\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^4}{[\omega_{\text{доп}}^{(3)}]^3}.$$

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

При этом

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)}}; t_2 = \left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} - t_1 \right] - \sqrt{\left[ \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(3)} \cdot t_1^2} - t_1 \right]^2 - t_1^2}; t_3 = \frac{t_1^2}{t_2} - t_2;$$

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

Электроненергия, потребляемая якорной цепью электропривода за цикл, равна:

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{co}} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot 2 \cdot \left[ \left( 2t_1t_2^3 + 3t_1t_2^2t_3 + t_1t_2t_3^2 \right) + \left( 2t_2^4 + 4t_2^3t_3 + \frac{7}{3}t_2^2t_3^2 + \frac{1}{3}t_2t_3^3 \right) \right] +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot (4t_1 + 4t_2 + 2t_3) +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{23}{15} t_1^5 + 2t_1^4 t_2 - \frac{2}{3} t_1^2 t_2^3 + \frac{1}{5} t_2^5 + \frac{1}{2} t_2^4 t_3 + t_2^3 t_3^2 + \frac{2}{3} t_2^2 t_3^3 \right),$$

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

$C_{\text{м}}$  – коэффициент пропорциональности между током и электромагнитным моментом электродвигателя,  $\text{В} \cdot \text{с}$ ;

$M_{\text{со}}$  – момент сопротивления электропривода,  $\text{Н} \cdot \text{м}$ ;

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

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

$J$  – момент инерции электропривода,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ .

Так как  $2\omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left[ \left( 2t_1 t_2^3 + 3t_1 t_2^2 t_3 + t_1 t_2 t_3^2 \right) + \left( 2t_2^4 + 4t_2^3 t_3 + \frac{7}{3} t_2^2 t_3^2 + \frac{1}{3} t_2 t_3^3 \right) \right] =$

$= (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ , то

$$W = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot (4t_1 + 4t_2 + 2t_3) +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{23}{15} t_1^5 + 2t_1^4 t_2 - \frac{2}{3} t_1^2 t_2^3 + \frac{1}{5} t_2^5 + \frac{1}{2} t_2^4 t_3 + t_2^3 t_3^2 + \frac{2}{3} t_2^2 t_3^3 \right).$$

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

$$W = \frac{C_e}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{со}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot T_{\text{ц}} +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot J^2 \cdot \left[ \omega_{\text{max}}^{(3)} \right]^2 \cdot \left( \frac{23}{15} t_1^5 + 2t_1^4 t_2 - \frac{2}{3} t_1^2 t_2^3 + \frac{1}{5} t_2^5 + \frac{1}{2} t_2^4 t_3 + t_2^3 t_3^2 + \frac{2}{3} t_2^2 t_3^3 \right).$$

В статье рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

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

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

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

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

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

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

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

$$= 7,95 - 7,949842766 = 0,000157234 \text{ с};$$

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

$$\varphi_{\text{гр.1}*} = 40 \cdot (0,0000157234 + 0,794985587 + 0,000000049 +$$

$$+ 0,00499995 + 84,26694458) = 3402,677835 \text{ рад}.$$

Проведен численный эксперимент. При определенных значениях начального угла поворота  $\varphi_{\text{нач}}$  и конечного значения угла поворота  $\varphi_{\text{кон}}$  задавали различные значения длительности первого и восьмого этапов  $t_1$  и определяли: все параметры серии энергоэффективных первого 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 существуют такие значения длительности первого и восьмого этапов  $t_1$ , при которых 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 Ju.P., Koshkin G.A., Sinjuk V.P. Opredelenie jenergeticheskikh harakteristik precizionnogo pozicionnogo jelektroprivoda postojannogo toka pri malyh peremeshhenijah ego ispolnitel'nogo organa // Nauchnye trudy KubGTU. – 2015. – № 13.

2 Dobrobaba Ju.P., Koshkin G.A., Sinjuk V.P. Opredelenie jenergeticheskikh harakteristik precizionnogo pozicionnogo jelektroprivoda postojannogo toka pri <http://ntk.kubstu.ru/file/1985>



nebol'shikh peremeshhenijah ego ispolnitel'nogo organa // Nauchnye trudy KubGTU. – 2015. – № 13.

3 Dobrobaba Ju.P., Koshkin G.A., Sinjuk V.P. Opredelenie jenergeticheskikh karakteristik precizionnogo pozicionnogo jelektroprivoda postojannogo toka pri srednih peremeshhenijah ego ispolnitel'nogo organa // Nauchnye trudy KubGTU. – 2016. – № 1.

4 Dobrobaba Ju.P., Koshkin G.A., Sinjuk V.P. Opredelenie jenergeticheskikh karakteristik precizionnogo pozicionnogo jelektroprivoda postojannogo toka pri bol'shikh peremeshhenijah ego ispolnitel'nogo organa // Nauchnye trudy KubGTU. – 2016. – № 5.

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

**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*

Submitted energy efficient first type diagram for movement of executive body of precision dc electric drive, which consist of 8 stage. Algorithms for determining the parameters of the diagrams are given for different cases: there is no restriction of the angular velocity and its derivatives, if the maximum value of the third derivative of the angular velocity is equal to the admissible value, if the maximum value of the third derivative of the angular velocity is equal to the admissible value and the durations of the first and fourth stages are equal, if the maximum the values of the second and third derivatives of the angular velocity are equal to the admissible, if the maximum values of the angular velocity and its third derivative are equal to the admissible, if the maximum values of the second and third derivatives of the angular velocities are equal and the durations of the first and fourth stages are equal, if the maximum value of the angular velocity and its second and third derivatives are equal to the admissible. The analytical dependences of electric power, consumed by anchor circuit, on specified movement of electric drive's executive body and it parameters are gotten. **Key words:** precision electric drive, movement of executive body of electric drive, energy efficient diagram, electric power.