

*ДИАГРАММА ДЛЯ ГИБРИДНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПЕРВОЙ И ВТОРОЙ ПРОИЗВОДНЫХ СКОРОСТИ*

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

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

При управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока предлагается одно из следующих требований: обеспечить максимальное быстродействие либо максимальное потребление электроэнергии за цикл. Предлагается использовать гибридные диаграммы для управления перемещением исполнительного органа электропривода, при которых требуемое перемещением исполнительного органа достигается за заданное время при максимально возможном потреблении электроэнергии. Из четырёх возможных диаграмм для гибридного управления перемещением исполнительного органа в данной рассматривается диаграмма с ограничениями первой и второй производных скорости.

Ключевые слова: гибридное управление, электропривод, диаграмма перемещения исполнительного органа.

Для достижения максимально возможной производительности промышленных механизмов перемещения их исполнительных органов осуществляется в соответствии с типовыми оптимальными по быстродействию диаграммами [1,2]:

- с ограничением второй производной скорости;
- с ограничениями первой и второй производных скорости;
- с ограничениями скорости и её второй производной;
- с ограничениями скорости её первой и второй производных.

При этом максимальное быстродействие перемещения исполнительного органа электропривода достигается за счёт значительного потребления электроэнергии.

В данной работе предлагается разработать диаграмму для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости, которая обеспечивает требуемое перемещение исполнительного органа

электропривода за заданное время с минимально возможным потреблением электроэнергии.

На рисунке представлена диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости, состоящая из пяти этапов. На первом и пятом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $\omega_{\max}^{(2)}$; на втором и четвертом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю; на третьем этапе вторая производная угловой скорости равна минимальному значению $\omega_{\min}^{(2)}$. Длительность первого и пятого этапов равна t_1 , длительность второго и четвертого этапов равна t_3 ; длительность третьего этапа равна $2t_2$. На втором этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $\omega_{\max}^{(1)}$; на четвертом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению со знаком «минус» $-\omega_{\max}^{(1)}$. В момент времени $(t_1 + t_2 + t_3)$ угловая скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения ω_{\max} . За время цикла $T_{\text{ц}} = 2t_1 + 2t_2 + 2t_3$ исполнительный орган электропривода перемещается от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для определения параметров гибридной диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости найдены аналитические зависимости координат электропривода от времени при его движении в соответствии с указанной диаграммой.

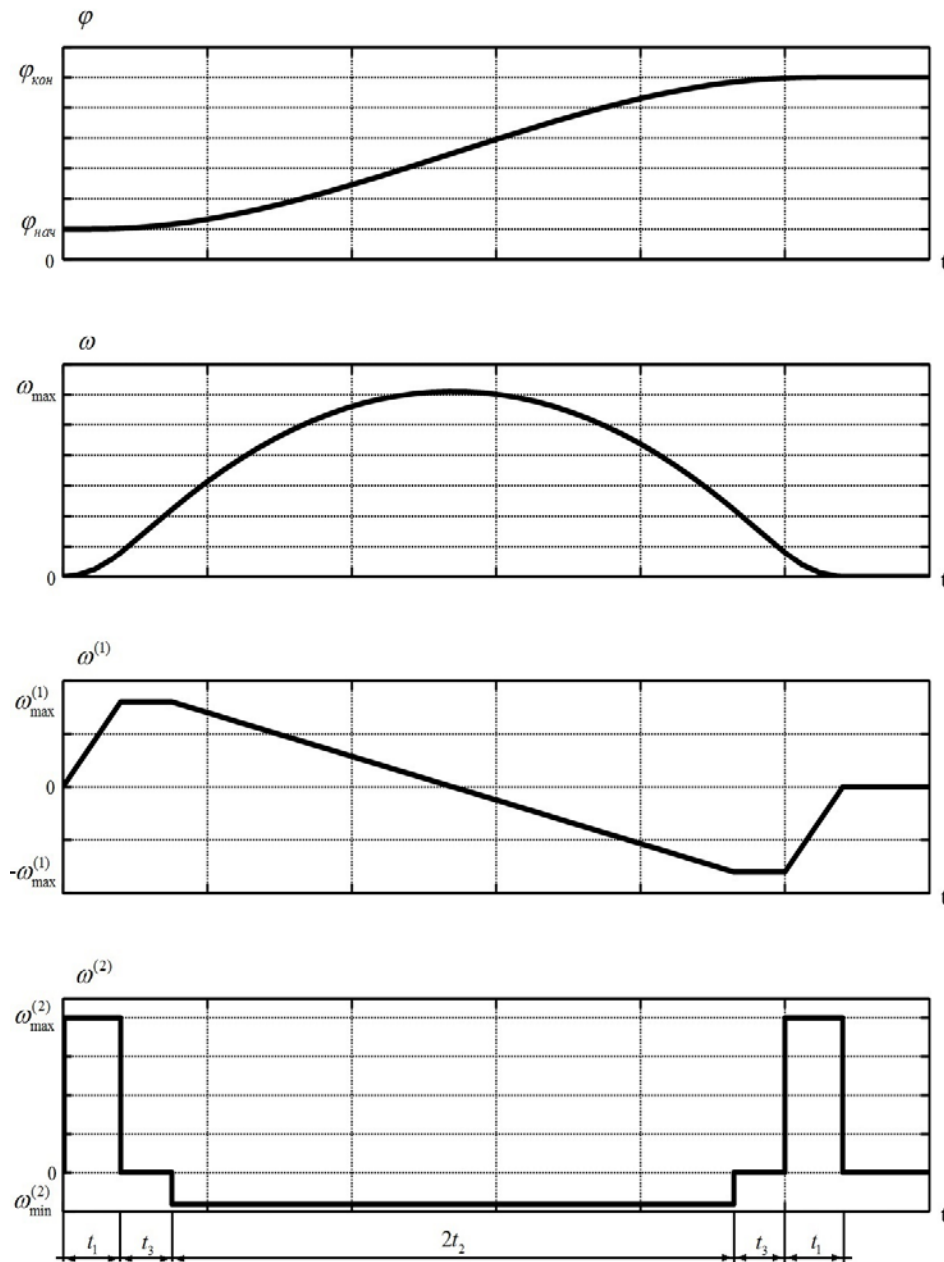


Рисунок – Диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости.

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

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{со}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t];$$

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

$$U(t) = \frac{1}{2} C_{\text{е}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{со}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} ,$$

где $I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;

$I_{\text{я}}^{(1)}$ – первая производная тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{\text{А}}{\text{с}}$;

U – напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$C_{\text{е}}$ – коэффициент пропорциональности между скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;

$C_{\text{М}}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с;

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

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

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

$M_{\text{со}}$ – момент сопротивления электропривода, Н·м.

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

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{со}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1] ;$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0 ;$$

$$\begin{aligned} U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{со}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1] . \end{aligned}$$

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

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[t_1 - \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_3) \right] \right\};$$

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

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_3 \right) + t_1 \cdot (t - t_1 - t_3) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_3)^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left\{ M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[t_1 - \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_3) \right] \right\} - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2}.$$

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

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

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{сo}} - J\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_{\text{е}}\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 t_3 \right) - t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_3) \right] + \\ + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{сo}} - J\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1].$$

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

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

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

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

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

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

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

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

При $t = t_1$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1.$$

При $t = t_1 + t_2 + t_3$

$$\omega_*^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2;$$

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

При $t = t_1 + 2t_2 + t_3$

$$\omega_3^{(1)} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + 2\omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2.$$

При $t = 2t_1 + 2t_2 + 2t_3$

$$\omega_5^{(1)} = 2\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + 2\omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2.$$

$$\omega_5 = \omega_{\max}^{(2)} \cdot (2t_1^2 + 2t_1 t_2 + 2t_1 t_3) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot (2t_1 t_2 + 2t_2^2 + 2t_2 t_3).$$

$$\varphi_5 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \left(\frac{4}{3} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + 3t_1^2 t_3 + 2t_1 t_2^2 + 4t_1 t_2 t_3 + 2t_1 t_3^2 \right) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(t_1^2 t_2 + 2t_1 t_2^2 + 2t_1 t_2 t_3 + \frac{4}{3} t_2^3 + 2t_2^2 t_3 + t_2 t_3^2 \right).$$

Так как $\omega = \omega_{\max}^{(1)}$, то

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

Так как $\omega_*^{(1)} = 0$, то

$$\omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 = -\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1.$$

Так как $\omega_* = \omega_{\max}$, то

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

$$\omega_{\max} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(1)} \cdot (t_1 + t_2 + 2t_3).$$

Так как $\omega_2^{(1)} = -\omega_{\max}^{(1)}$, то

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

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

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

$$-\omega_{\max}^{(1)} = -\omega_{\max}^{(1)}.$$

Если задано $T_{ц}$ и выполняются условия $\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$ и $\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, то

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

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

$$t_3 = \left(\frac{1}{2}T_{ц} - t_1\right) - \sqrt{\frac{3}{4}T_{ц}^2 - \frac{3}{2}T_{ц}t_1 + t_1^2 - 3 \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}}.$$

Этап 1. Зависимость мощности, потребляемой якорной цепью электропривода, от времени имеет вид

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[M_{\text{со}} \cdot t^2 + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t^3 \right] +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}} J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t + J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \right]^2 \cdot t^2 \right\} +$$

$$+ \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[M_{\text{со}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t \right].$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за первый этап равна

$$W_1 = \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^4 +$$

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

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

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

$$P(t) = \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t + t_1) \right] + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - t_1) \right] \right\} +$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2M_{\text{co}}J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2 \right\}; \\
 W_2 = & \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{co}}\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2t_3 + \frac{1}{2}t_1t_3^2 \right) + \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \cdot J[\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^3t_3 + \frac{1}{2}t_1^2t_3^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_3 + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} M_{\text{co}}J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1t_3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2t_3.
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_3 \right) + t_1(t-t_1-t_3) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t-t_1-t_3)^2 \right] + \right. \\
 & + J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^3 + t_1^2t_3 \right) + t_1^2 \cdot (t-t_1-t_3) - \frac{t_1}{t_2} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_3 \right) \times \right. \\
 & \left. \left. \times (t-t_1-t_3) - \frac{3}{2} \cdot \frac{t_1^2}{t_2} \cdot (t-t_1-t_3)^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} (t-t_1-t_3)^3 \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{co}}^2 + 2M_{\text{co}}J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[t_1 - \frac{t_1}{t_2} \cdot (t-t_1-t_3) \right] + \right. \\
 & \left. + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2 \frac{t_1^2}{t_2} (t-t_1-t_3) + \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t-t_1-t_3)^2 \right] \right\} - \\
 & + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \frac{t_1}{t_2} + J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\frac{t_1^2}{t_2} - \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t-t_1-t_3) \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 W_3 = & \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{co}}\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(t_1^2t_2 + \frac{2}{3}t_1t_2^2 + 2t_1t_2t_3 \right) t_1^3 + 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{co}}^2 \cdot t_2 + \\
 & + \frac{2}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2t_2 - 2 \cdot \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{co}}\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1.
 \end{aligned}$$

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

$$P(t) = \frac{C_{\text{e}}}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{co}} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_3 \right) - t_1(t-t_1-2t_2-t_3) \right] - \right.$$

$$\begin{aligned}
 & -J\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2}t_1^3 + t_1^2t_3 \right) - t_1^2 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_3) \right] \Bigg\} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 - 2M_{\text{со}}J\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2 \right\}; \\
 W_4 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2t_3 + \frac{1}{2}t_1t_3^2 \right) - \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^3t_3 + \frac{1}{2}t_1^2t_3^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_3 - 2\frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}J\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1t_3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2t_3.
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^2 - t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3) + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3)^2 \right] + \right. \\
 & + J\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[-\frac{1}{2}t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3) - \frac{3}{2}t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3)^2 + \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3)^3 \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}}J\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3) \right] + \right. \\
 & \left. + J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3) + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3)^2 \right] \right\} + \\
 & + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3) \right] \right\}; \\
 W_4 = & \frac{1}{6} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_3 - \frac{1}{8} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^4 + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}J\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^3 + \\
 & + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}}J^2}{C_{\text{М}}^2} \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

Суммарная электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за цикл:

$$W = \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}}\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{3}t_1^3 + t_1^2t_2 + t_1^2t_3 + \frac{2}{3}t_1t_2^2 + 2t_1t_2t_3 + t_1t_3^2 \right) +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{со}^2 \cdot (2t_1 + 2t_2 + 2t_3) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(2)}]^2 \cdot \left(\frac{2}{3}t_1^3 + \frac{2}{3}t_1^2t_2 + 2t_1^2t_3 \right).$$

Так как $\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{3}t_1^3 + t_1^2t_2 + t_1^2t_3 + \frac{2}{3}t_1t_2^2 + 2t_1t_2t_3 + t_1t_3^2 \right) = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$;

$\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 = \omega_{\max}^{(1)}$ и $(2t_1 + 2t_2 + 2t_3) = T_{ц}$, то

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{со} (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{со}^2 \cdot T_{ц} + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\max}^{(1)}]^2 \cdot \left(\frac{2}{3}t_1^3 + \frac{2}{3}t_1^2t_2 + 2t_1^2t_3 \right).$$

При выполнении условия $\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{дон}}^{(1)}$ справедливы диаграмма гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением второй производной скорости, рассмотренная в статье [3], так и диаграмма гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости.

Если $\omega_{\min}^{(2)} = -\omega_{\max}^{(2)}$ то, $t_1 = t_2$ и $T_{ц} = 4t_1 + 2T_3$, при этом справедливы зависимости:

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

$$t_3 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{4 \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \left[\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2} - \frac{3}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}};$$

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

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

При $t_3 = 0$ угол поворота (перемещение) исполнительного органа электропривода имеет первое граничное значение

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

При $\omega_{max}^{(2)} = \omega_{дон}^{(2)}$ угол поворота (перемещение) исполнительного органа электропривода имеет второе граничное значение

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

В данной работе рассматривается электропривод, имеющий 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 условия угловой скорости и её первой и второй производных наложены ограничения: $\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}$;

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

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

При этом граничные значения угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равны $\varphi_{гр.1} = 6,4 рад$ и $\varphi_{гр.2} = 352 рад$.

Если задано $T_{ц}$ и выполняются условия $\omega_{max} = \omega_{доп}$ и $\omega_{max}^{(1)} = \omega_{дон}^{(1)}$, и $\omega_{max}^{(2)} = \omega_{дон}^{(2)}$, то

$$t_1 = \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$t_2 = T_{ц} - 2 \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп}^{(1)}} - \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

$$t_3 = 2 \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}} - \frac{1}{2} T_{ц};$$

$$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = \omega_{доп}^{(1)} \cdot \left\{ -\frac{1}{12} T_{ц}^2 + \left[\frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп}^{(1)}} + \frac{1}{6} \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}} \right] \cdot T_{ц} - \right.$$

$$\left. -\frac{4}{3} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^2}{\left[\omega_{\text{доп}}^{(1)}\right]^2} - \frac{4}{3} \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right\}.$$

Если задано значение угла поворота (перемещения) исполнительного органа электропривода, то длительность цикла $T_{\text{ц2}}$ определяется по форме

$$T_{\text{ц2}} = \left[8 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right] - \sqrt{48 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^2}{\left[\omega_{\text{доп}}^{(1)}\right]^2} + \left[\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2 - 12 \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}}}.$$

Если для заданного перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода выполняются условия

$$\varphi_{\text{гр.1}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \varphi_{\text{гр.2}},$$

то длительность цикла можно изменять в следующем интервале

$$T_{\text{ц min}} \leq T_{\text{ц}} \leq T_{\text{ц.гр}}.$$

При этом справедлива зависимость [3]

$$T_{\text{ц.гр}} = \sqrt{6 \cdot \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right]^2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}.$$

Если для заданного перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода выполняются условия

$$\varphi_{\text{гр.2}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \varphi_{\text{гр.кр}},$$

то длительность цикла можно изменять в следующем интервале

$$T_{\text{ц2}} \leq T_{\text{ц}} \leq T_{\text{ц.гр}}.$$

При этом справедлива зависимость [3]

$$\varphi_{\text{гр.кр}} = \frac{2}{3} \omega_{\text{доп}} \cdot \left[4 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right].$$

Представленная на рисунке диаграмма для гибридного управлением перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока имеет следующие параметры: $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 100$ рад; $T_{\text{ц}} = 2,7$ с; $t_1 = 0,2$ с;

$$t_2 = 0,973396116 \text{ с}; \quad t_2 = 0,176603884 \text{ с}; \quad \omega_{\min}^{(2)} = -82,18647957 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{\max} = 61,06415536 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad W = 362,1361585 \text{ Дж.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров Ю.П. Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. - М.: Изд-во «Энергия», 1971.-144с.
2. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. – М: «Энергия», 1976.-488с.
3. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А, Махова В.А. Диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями второй производной скорости// Научные труды КубГТУ, 2016, №5. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/957>.

REFERENCES

1. Petrov Yu.P. Optimalnoe upravlenie elektricheskim privodom s uchetom ogranicheniy po nagrevu. - M.: Izd-vo «Energiya», 1971.-144s.
2. Sokolov M.M. Avtomatizirovannyy elektroprivod obshchepromyshlennykh mekhanizmov. – M: «Energiya», 1976.-488s.
3. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A, Makhova V.A. Diagramma dlya gibridnogo upravleniya peremeshcheniem ispolnitelnogo organa elektroprivoda postoyannogo toka s ogranicheniyami vtoroy proizvodnoy skorosti// Nauchnye trudy KubGTU, 2016, №5. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/957>.

DIAGRAM FOR HYBRID CONTROL THE MOVEMENT OF ELECTRIC DRIVES EXECUTIVE AUTHORITY, CONSTANT CURRENT LIMITS OF THE FIRST AND SECOND DERIVATIVES OF SPEED

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

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

When you control the movement of electric drives Executive authority DC it is proposed one of the following requirements: to ensure maximum performance or maximum power

consumption per cycle. It is proposed to use a hybrid diagram to control the movement of electric drives Executive authority, in which the required displacement of the Executive body is achieved a predetermined time at the maximum possible power consumption. Of the four possible diagrams for hybrid motion control of the Executive body in this diagram is considered with constraints on the first and second derivatives of the velocity.

Key words: hybrid control, electric drives, diagram of movement of the Executive body.