

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

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

*Кубанский государственный технологический университет
350002, Российская федерация, г. Краснодар, ул. Московская 2;
электронная почта: viktorya.mah@yandex.ru*

Перемещение исполнительного органа электропривода постоянного тока в настоящее время реализуется по одной из общепринятых диаграмм, обеспечивающих: либо максимальное быстродействие; либо минимальное потребление электроэнергии за цикл. В данной работе предлагается осуществлять перемещение исполнительного органа электропривода за заданное по технологии время и обеспечивать минимальное потребление электрической энергии. Для электропривода постоянного тока разработаны следующие гибридные диаграммы перемещения исполнительного органа: диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничением второй производной скорости, диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости, - диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной.

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

Гибридное управление перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока находит все более широкое использование, так как позволяет осуществлять перемещение исполнительного органа электропривода за заданное время и обеспечить минимальное потребление электрической энергии за цикл.

В данной работе предлагается разработать диаграмму для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её первой и второй производных. Эта диаграмма обеспечивает требуемое перемещение исполнительного органа электропривода за заданное время с минимально возможным потреблением электроэнергии, её целесообразно использовать при больших перемещениях исполнительного органа электропривода.

На рисунке представлена диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её первой и второй производных, состоящая из семи этапов. На первом и седьмом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению $\omega_{\max}^{(2)}$; на втором, четвертом и шестом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю; на третьем и пятом этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна минимальному значению $\omega_{\min}^{(2)}$. Длительность первого и седьмого этапов равна t_1 ; длительность второго и шестого этапов равна t_3 ; длительность третьего и пятого этапов равна t_2 ; длительность четвертого этапа равна t_4 . 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 нулю; на седьмом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению со знаком «минус» - $-\omega_{\max}^{(1)}$. На четвертом этапе угловая скорости исполнительного органа электропривода равна максимальному значению ω_{\max} . За время цикла $T_{\text{ц}} = 2t_1 + 2t_2 + 2t_3 + t_4$ 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 скорости и её первой и второй производных найдены аналитические зависимости координат электропривода от времени при его движении в соответствии с указанной диаграммой.

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

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

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

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

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

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

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

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

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.

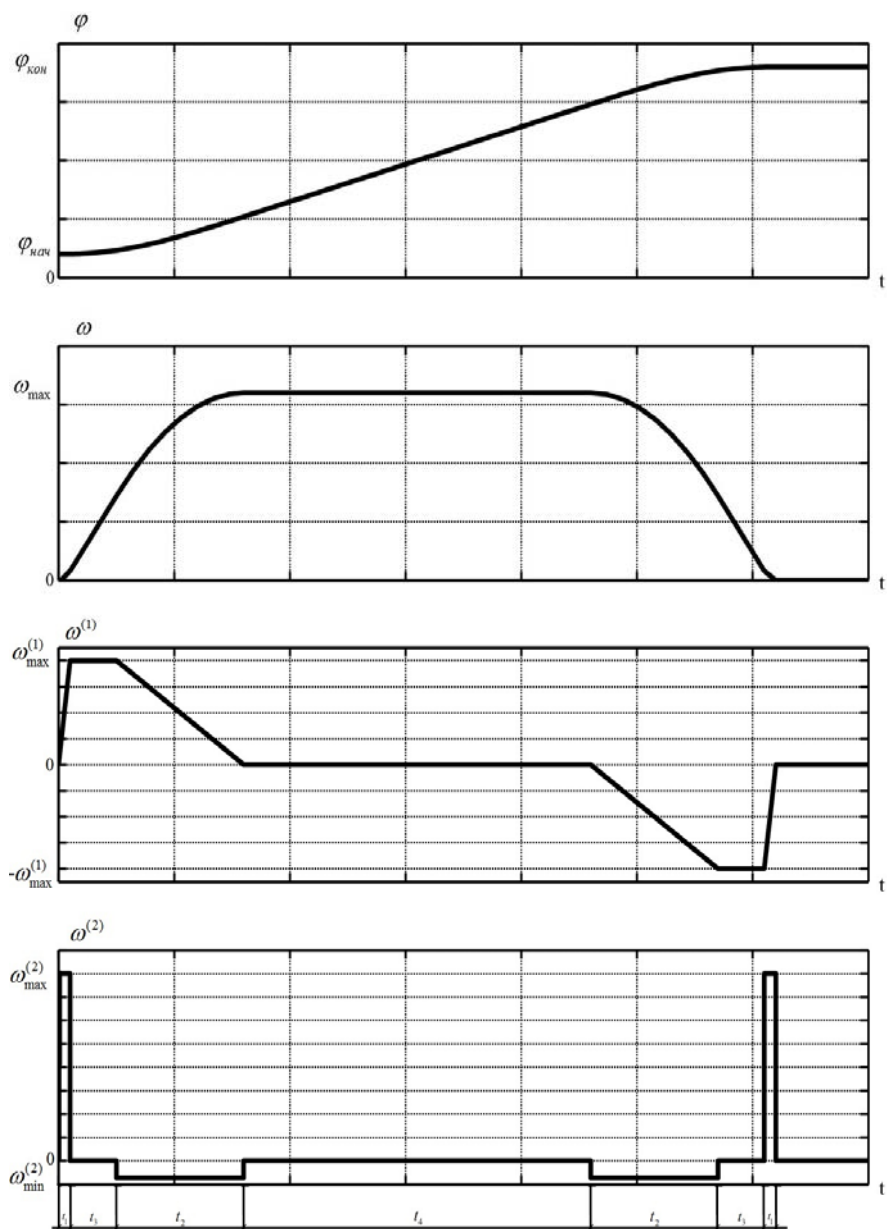


Рисунок 1– Диаграмма для гибридного управления перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её первой и второй производных

При $t = t_1$

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

$$\omega_1 = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2;$$

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^3.$$

Так как $\omega_1^{(1)} = \omega_{\max}^{(1)}$, то

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

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

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

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

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

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

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

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

При $t = t_1 + t_3$

$$\omega_2^{(1)} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1;$$

$$\omega_2 = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_3 \right);$$

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right).$$

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

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

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

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

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

При $t = t_1 + t_2 + t_3$

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

$$\omega_3 = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2;$$

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^3.$$

Так как $\omega_3^{(1)} = 0$, то

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

Так как $\omega_3 = \omega_{\max}$, то

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

При этом справедлива зависимость

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 + t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right).$$

Для электрических координат электропривода на третьем этапе справедливы зависимости:

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

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

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

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

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

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

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

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

При $t = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$

$$\omega_4 = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right);$$

$$\varphi_3 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 + t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right].$$

Для электрических координат электропривода на четвертом этапе справедливы зависимости:

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

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

Этап 5. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4)$:

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

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4);$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 + t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right] + \\ + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^3. \end{aligned}$$

При $t = t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4$

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

$$\omega_5 = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2 = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_3 \right);$$

$$\varphi_5 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{5}{6} t_1 t_2^2 + 2 t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) + \right.$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \Big] + \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^3 = \\
 = & \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 + 2 t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right].
 \end{aligned}$$

Для электрических координат электропривода на пятом этапе справедливы зависимости:

$$\begin{aligned}
 I_{\text{я}}(t) &= \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \right]; \\
 I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= -\frac{J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2}; \\
 U(t) &= C_{\text{е}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot \left[M_{\text{с0}} - J \omega_{\max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \right] - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2}.
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 \omega^{(2)}(t) &= 0; \\
 \omega^{(1)}(t) &= -\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1; \\
 \omega(t) &= \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_3 \right) - \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4); \\
 \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 + 2 t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) + \right. \\
 & \quad \left. + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right] + \\
 & + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_3 \right) \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4) - \\
 & + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - t_3 - t_4)^2.
 \end{aligned}$$

При $t = t_1 + 2t_2 + 2t_3 + t_4$

$$\omega_6^{(1)} = -\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1;$$

$$\omega_6 = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2;$$

$$\varphi_6 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 + 2 t_1 t_2 t_3 + t_1 t_3^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right].$$

Для электрических координат электропривода на шестом этапе справедливы зависимости:

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

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = 0;$$

$$U(t) = C_{\text{е}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_3 \right) - t_1 \cdot (t - t_1 - 2 t_2 - t_3 - t_4) \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{со}} - J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1].$$

Этап 7. В интервале

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

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

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - 2 t_2 - 2 t_3 - t_4);$$

$$\omega(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - 2 t_2 - 2 t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - 2 t_2 - 2 t_3 - t_4)^2;$$

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 + 2 t_1 t_2 t_3 + t_1 t_3^2 \right) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right] + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1 - 2 t_2 - 2 t_3 - t_4) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - 2 t_2 - 2 t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - 2 t_2 - 2 t_3 - t_4)^3.$$

При $t = 2 t_1 + 2 t_2 + 2 t_3 + t_4$

$$\omega_7^{(1)} = 0;$$

$$\omega_7 = 0;$$

$$\varphi_7 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3}t_1^3 + t_1^2t_2 + t_1^2t_3 + \frac{2}{3}t_1t_2^2 + 2t_1t_2t_3 + t_1t_3^2 \right) + \left(\frac{1}{2}t_1^2 + \frac{1}{2}t_1t_2 + t_1t_3 \right) \cdot t_4 \right].$$

Так как $\varphi_7 = \varphi_{\text{кон}}$, то

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3}t_1^3 + t_1^2t_2 + t_1^2t_3 + \frac{2}{3}t_1t_2^2 + 2t_1t_2t_3 + t_1t_3^2 \right) + \left(\frac{1}{2}t_1^2 + \frac{1}{2}t_1t_2 + t_1t_3 \right) \cdot t_4 \right];$$

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

Для электрических координат электропривода на седьмом этапе справедливы зависимости:

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot [-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4)] \right\};$$

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

$$U(t) = C_{\text{е}}\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4) + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot [-t + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4)] \right\} + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)}.$$

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

$$P(t) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot [M_{\text{со}} \cdot t^2 + J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t^3] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2M_{\text{со}}J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t + J^2 \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t^2 \right\} + \frac{L_{\text{я}}J}{C_{\text{м}}^2} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot [M_{\text{со}} + J\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t].$$

Электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за первый этап равна

$$\begin{aligned}
 W_1 = & \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^4 + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_1 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 + \\
 & + \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 \cdot (t - t_1) \right] + J \omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 \cdot (t - t_1) \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 + 2 M_{co} J \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 \right\};
 \end{aligned}$$

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

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

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

$$\begin{aligned}
 W_3 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 + t_1 t_2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^3 t_2 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3 \right) + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_2 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co} J \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2 t_2 - \\
 & - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2; \\
 W_4 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{co}^2 \cdot t_4.
 \end{aligned}$$

Этап 5. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) \leq t \leq (t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4)$:

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_e}{C_M} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2 \right] - \right. \\
 & - J \omega_{max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{t_1^3}{t_2} + \frac{1}{2} t_1^2 + \frac{t_1^2 t_3}{t_2} \right) \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) - \right. \\
 & \left. \left. - \frac{1}{2} \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^3 \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot \left\{ M_{co}^2 - 2 M_{co} J \omega_{max}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) + \right. \\
 & \left. + J^2 \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4)^2 \right\} - \\
 & - \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot \omega_{max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{co} \cdot \frac{t_1}{t_2} - J \omega_{max}^{(2)} \cdot \frac{t_1^2}{t_2^2} \cdot (t - t_1 - t_3 - t_4) \right\}; \\
 W_5 = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{co} \omega_{max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{3} t_1 t_2^2 + t_1 t_2 t_3 \right) - \\
 & - \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{max}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{1}{4} t_1^3 t_2 + \frac{1}{8} t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 t_3 \right) +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_2 - \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2 t_2 - \\
 & - \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{\text{я}} J^2}{C_{\text{М}}^2} \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

Этап 6. В интервале времени

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

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_3 \right) - t_1 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \right] - \right. \\
 & \left. - J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{2} t_1^3 + t_1^2 t_3 \right) - t_1^2 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3 - t_4) \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 - 2 M_{\text{со}} J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 + J [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2 \right\}; \\
 W_6 = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) - \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot J \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^3 t_3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3^2 \right) + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_3 - 2 \cdot \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 t_3 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot J^2 \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot t_1^2 t_3.
 \end{aligned}$$

Этап 7. В интервале времени

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

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \frac{C_{\text{е}}}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} \cdot \left[\frac{1}{2} t_1^2 - t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] + \right. \\
 & \left. + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[-\frac{1}{2} t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4) - \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{3}{2} t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4)^2 + \frac{1}{2} \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4)^3 \right] \right\} + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}^2} \cdot \left\{ M_{\text{со}}^2 + 2 M_{\text{со}} J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left[-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4) \right] + \right. \\
 & \left. + J^2 \cdot [\omega_{\text{max}}^{(2)}]^2 \cdot \left[t_1^2 - 2t_1 \cdot (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4)^2 \right] \right\} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left\{ M_{\text{со}} + J \omega_{\max}^{(2)} \left[-t_1 + (t - t_1 - 2t_2 - 2t_3 - t_4) \right] \right\}; \\
 W_7 = & \frac{1}{6} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{8} \cdot \frac{C_e}{C_M} \cdot J \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^4 + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot t_1 - \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{3} \cdot \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^3 + \\
 & + \frac{L_{я} J}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{1}{2} \cdot \frac{L_{я} J^2}{C_M^2} \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \right]^2 \cdot t_1^2.
 \end{aligned}$$

Суммарная электроэнергия, потребляемая якорной цепью электропривода, за цикл:

$$\begin{aligned}
 W = & \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{со}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3} t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 + 2 t_1 t_2 t_3 + t_1 t_3^2 \right) + \right. \\
 & \left. + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right] + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot M_{\text{со}}^2 \cdot (2 t_1 + 2 t_2 + 2 t_3 + t_4) + \\
 & + \frac{R_{я}}{C_M^2} \cdot J^2 \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \right]^2 \cdot \left(\frac{2}{3} t_1^3 + \frac{2}{3} t_1^2 t_2 + 2 t_1^2 t_3 \right).
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Так как } \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{3} t_1^3 + t_1^2 t_2 + t_1^2 t_3 + \frac{2}{3} t_1 t_2^2 + 2 t_1 t_2 t_3 + t_1 t_3^2 \right) + \right. \\
 \left. + \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) \cdot t_4 \right] = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}});
 \end{aligned}$$

$\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 = \omega_{\max}^{(1)}$ и $(2 t_1 + 2 t_2 + 2 t_3 + t_4) = T_{\text{ц}}$, то

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

Если задана длительность цикла $T_{\text{ц}}$ и $\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}$; $\omega_{\max}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$;

$\omega_{\max}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, то справедливы соотношения:

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

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

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

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

$$\left. + \left(\frac{1}{2}t_1 + \frac{1}{2}t_2 + t_3 \right) \cdot t_4 \right];$$

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

Отсюда следуют следующие зависимости для длительностей этапов:

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

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

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

$$t_4 = T_{\text{ц}} - 2 \cdot \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} -$$

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

Если $\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{доп}}$, $\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{доп}}^{(1)}$; $\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$; и $t_4 = 0$, то

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

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

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

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

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

После преобразований

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

При выполнении этого условия справедливы диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями первой и второй производных скорости, рассмотренное в статье [1], и диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её первой и второй производных.

Если $\omega_{max} = \omega_{доп}$, $\omega_{max}^{(1)} = \omega_{доп}^{(1)}$; $\omega_{max}^{(2)} = -\omega_{доп}^{(2)}$; , то

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

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

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

$$T_{ц.min} = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} + \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(1)}} + \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}}.$$

При $t_4 = 0$ перемещение (поворот) исполнительного органа электропривода достигает второго граничного значения

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

Если $\omega_{max} = \omega_{доп}$, $\omega_{max}^{(1)} = \omega_{доп}^{(1)}$; $\omega_{max}^{(2)} = \omega_{доп}^{(2)}$; $t_3 = 0$, то

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

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

$$t_4 = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{доп}} - \frac{8}{3} \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(1)}} + \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}};$$

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

$$\omega_{\text{мин}}^{(2)} = -\frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{t_2}.$$

При $t_4 = 0$ перемещение (поворот) исполнительного органа электропривода достигает граничного критического значения

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

При выполнении этого условия $t_3 = 0$ справедливы диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями по скорости её второй производной, рассмотренная в статье [2], и диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её первой и второй производных.

Если для заданного перемещение (поворота) исполнительного органа электропривода выполняется условие

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

то длительность цикла можно изменять в следующем интервале

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

Если для заданного перемещение (поворота) исполнительного органа электропривода выполняется условие

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

то длительность цикла можно изменять в следующем интервале

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

В данной работе 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 её первой и второй производных наложены ограничения $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

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

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

При этом второе граничное экстремальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода постоянного тока равно $\varphi_{гр.2} = 352$ рад, а значение граничного критического угла поворота равно $\varphi_{гр.кр} = 832$ рад.

Представленная на рисунке диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её первой и второй производных имеет следующие параметры: $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 1600$ рад; $T_{ц} = 12,4$ с; $t_1 = 0,2$ с; $t_2 = 2,2$ с; $t_3 = 0,8$ с; $t_4 = 6$ с; $\omega_{min}^{(2)} = -36 \frac{4}{11} \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$; $W = 4000 + 248 + 163,84 = 4411,84$ Дж.

В таблице 1 приведены результаты численного эксперимента рассматриваемого электропривода, обрабатывающего перемещение (поворот) исполнительного органа $\Delta\varphi = (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 1600$ рад за заданное время. При этом $T_{ц.гр} = 12,8$ с и $T_{ц.min} = 12,2$ с.

Таблица 1 – Результаты численного эксперимента

$T_{ц},$ с	$t_1,$ с	$t_2,$ с	$t_3,$ с	$t_4,$ с	$\omega_{min}^{(2)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	$W,$ Дж
12,8	0,2	3,8	0	4,8	$-21 \frac{1}{19}$	$4392 \frac{8}{15}$
12,4	0,2	2,2	0,8	6	$-36 \frac{4}{11}$	4411,84
12,2	0,2	0,2	1,8	7,8	-400	$4441 \frac{73}{75}$

Таким образом, задавшись значением длительности цикла $T_{ц}$, можно определить параметры гибридной диаграммы управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её первой и второй производных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П. Добробаба 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 / Научные труды КубГТУ -Краснодар, 2016 №8. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1073>

2. Ю.П. Добробаба Диаграмма для гибридного управления перемещением исполнительного органа электропривода постоянного тока с ограничениями скорости и её второй производной // Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, В.А. Махова / Научные труды КубГТУ -Краснодар, 2016 № 12. URL: <http://ntk/kubstu.ru/file/1222>

REFERENCES

1. YU.P. Dobrobaba Diagramma dlya gibridnogo upravleniya peremeshcheniem ispolnitelnogo organa elektroprivoda postoyannogo toka s ogranicheniyami pervoy i vtoroy proizvodnykh skorosti // YU.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, V.A. Makhova / Nauchnye trudy KubGTU -Krasnodar, 2016 №8. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1073>

2. YU.P. Dobrobaba Diagramma dlya gibridnogo upravleniya peremeshcheniem ispolnitelnogo organa elektroprivoda postoyannogo toka s ogranicheniyami skorosti i ee vtoroy proizvodnoy // YU.P. Dobrobaba, G.A. Koshkin, V.A. Makhova / Nauchnye trudy KubGTU -Krasnodar, 2016 № 12. URL: <http://ntk/kubstu.ru/file/1222>

CHART FOR HYBRID OF MOTION OF THE EXECUTIVE BODY ELECTRIC DC SPEED LIMITS AND ITS FIRST AND SECOND DERIVATIVES

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

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350002;
e-mail: viktorya.mah@yandex.ru*

Moving the executive body of the DC electric drive it is currently being implemented by one of the common diagrams that provide either maximum performance; or a minimum energy consumption per cycle. In this paper, we propose to carry out the movement of the executive body of the drive within the specified time and technology to ensure minimal consumption of electric energy. The following chart hybrid movement executive body designed for dc drive: Diagram of the second derivative of the speed for DC hybrid control of the executive body of the electric displacement limited, Diagram for a hybrid motion control of the executive body of the electric DC constraints first and second derivatives of the velocity, Diagram for a hybrid motion control of the executive body of the electric DC speed limits and its second derivative.

Key words: chart movement of the executive body, the hybrid control, the electric drive.