

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УПРАВЛЯЮЩЕГО СИГНАЛА ДЛЯ ОСОБО ТОЧНОГО
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ СРЕДНИХ
ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА**

Ю.П. ДОБРОБАБА, А.Л. ХОРЦЕВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: tolyahortsev@gmail.com*

В статье разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока, учитывающая инерционность системы автоматического регулирования. Определены аналитические зависимости управляющего сигнала системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода постоянного тока от времени, обеспечивающего особо точное движение в соответствии с разработанной диаграммой.

Ключевые слова: оптимальная по быстродействию диаграмма, средние перемещения, ошибка по перемещению, управляющее воздействие.

Математическая модель силовой части электропривода постоянного тока описывается системой дифференциальных уравнений третьего порядка. Поэтому при разработке известных типовых оптимальных по быстродействию диаграмм для средних перемещений исполнительного органа электропривода формировалась третья производная угла поворота электропривода (вторая производная угловой скорости). Данные диаграммы получены без учета влияния инерционности системы автоматического регулирования (САР) положения исполнительного органа электропривода. Их использование для прецизионных электроприводов постоянного тока приводит к тому, что реальное перемещение исполнительного органа электропривода $\varphi_p(t)$ отличается от перемещения исполнительного органа электропривода $\varphi(t)$, формируемого задающим устройством, на величину ошибки $\Delta\varphi(t)$ [1].

Поэтому актуальной является задача по разработке оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока (с учетом инерционности САР положения), позволяющей избавиться от ошибки по перемещению исполнительного органа электропривода.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока, состоящая из десяти этапов. За время цикла $T_{ц} = 8t_1 + 2t_2$ исполнительный орган электропривода перемещается от начального значения угла поворота $\varphi_{нач}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{кон}$.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

ω_{max} – максимальное значение угловой скорости исполнительного органа механизма, $\frac{рад}{с}$;

$\omega_{доп}^{(1)}$ – максимально допустимое значение первой производной угловой скорости исполнительного органа механизма, $\frac{рад}{с^2}$;

$\omega_{доп}^{(2)}$ – максимально допустимое значение второй производной угловой скорости исполнительного органа механизма, $\frac{рад}{с^3}$;

$\omega_{max}^{(3)}$ – максимальное значение третьей производной угловой скорости исполнительного органа механизма, $\frac{рад}{с^4}$;

t_1 – длительность первого, второго, четвертого, пятого, шестого, седьмого, девятого и десятого этапов, с;

t_2 – длительность третьего и восьмого этапов, с.

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока, представленной на рисунке 1, справедливы следующие соотношения:

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

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

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

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

Область существования оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа электропривода:

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

где
$$\varphi_{гр.1} = 8 \cdot \frac{\left[\omega_{доп}^{(1)} \right]^3}{\left[\omega_{доп}^{(2)} \right]^2};$$

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

$\omega_{доп}$ –максимально допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, *рад / с*.

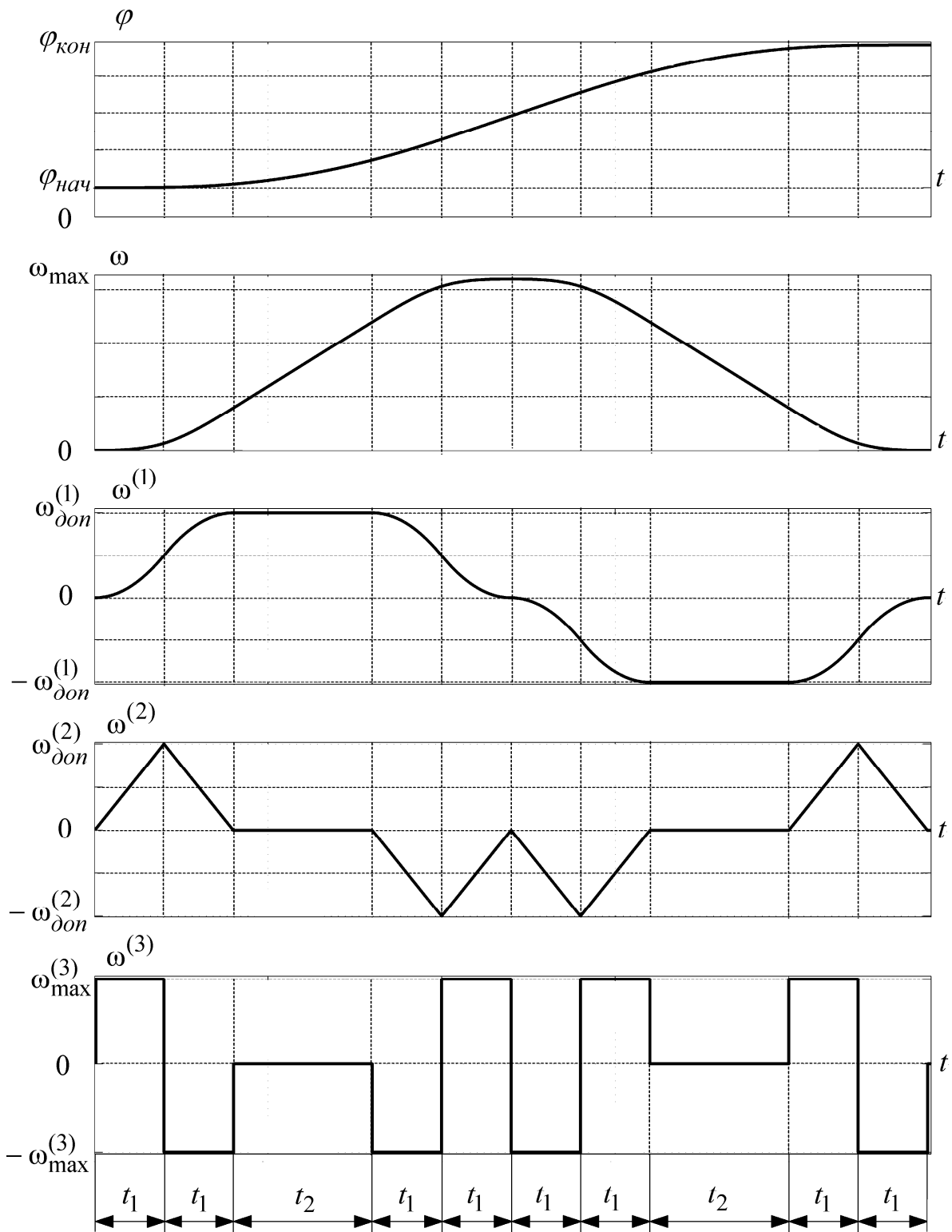


Рис. 1

Аналитические зависимости координат электропривода постоянного тока от времени при средних перемещениях его исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой, представленной на рисунке 1, имеют следующий вид.

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

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(3)}; \quad (1)$$

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t; \quad (2)$$

$$\omega^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^2; \quad (3)$$

$$\omega(t) = \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^3; \quad (4)$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^4. \quad (5)$$

Этап 2. В интервале времени $t_1 \leq t \leq 2t_1$:

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)}; \quad (6)$$

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1); \quad (7)$$

$$\omega^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^2; \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \omega(t) = & \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \\ & - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^3; \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{нач} + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^4 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1)^2 + \\ & + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^3 - \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^4. \end{aligned} \quad (10)$$

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

$$\omega^{(3)}(t) = 0; \quad (11)$$

$$\omega^{(2)}(t) = 0; \quad (12)$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2; \quad (13)$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1); \quad (14)$$

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \frac{7}{12} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^4 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^2. \quad (15)$$

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

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)}; \quad (16)$$

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2); \quad (17)$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2; \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \omega(t) = & \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2) - \\ & - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2) + \\ & + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4. \end{aligned} \quad (20)$$

Этап 5. В интервале времени $(3t_1 + t_2) \leq t \leq (4t_1 + t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(3)}; \quad (21)$$

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2); \quad (22)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \omega(t) = & \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \\ & - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \\ & + \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 + \\ & + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4. \end{aligned} \quad (25)$$

Этап 6. В интервале времени $(4t_1 + t_2) \leq t \leq (5t_1 + t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)}; \quad (26)$$

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2); \quad (27)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2)^2; \quad (28)$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2)^3; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2}t_1^2 t_2^2) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2) - \\ - \frac{1}{24}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2)^4. \end{aligned} \quad (30)$$

Этап 7. В интервале времени $(5t_1 + t_2) \leq t \leq (6t_1 + t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(3)}; \quad (31)$$

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2); \quad (32)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2) + \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2)^2; \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (\frac{11}{6}t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2) - \\ - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2)^3; \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (\frac{143}{24}t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2}t_1^2 t_2^2) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (\frac{11}{6}t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 5t_1 - t_2) - \\ - \frac{1}{4}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2)^3 + \\ + \frac{1}{24}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2)^4. \end{aligned} \quad (35)$$

Этап 8. В интервале времени $(6t_1 + t_2) \leq t \leq (6t_1 + 2t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = 0; \quad (36)$$

$$\omega^{(2)}(t) = 0; \quad (37)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2; \quad (38)$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2); \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2)^2. \end{aligned} \quad (40)$$

Этап 9. В интервале времени $(6t_1 + 2t_2) \leq t \leq (7t_1 + 2t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(3)}; \quad (41)$$

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2); \quad (42)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2)^2; \quad (43)$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2) + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2)^3; \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2)^4. \end{aligned} \quad (45)$$

Этап 10. В интервале времени $(7t_1 + 2t_2) \leq t \leq (8t_1 + 2t_2)$:

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)}; \quad (46)$$

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2); \quad (47)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^2; \quad (48)$$

$$\begin{aligned} \omega(t) = \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^2 - \\ - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^3; \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2) - \\ - \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^3 - \end{aligned}$$

$$-\frac{1}{24}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^4. \quad (50)$$

Передаточная функция САР положения исполнительного органа электропривода постоянного тока имеет вид [2]:

$$\frac{\varphi_p(p)}{U_{zn}(p)} = \frac{1}{K_{on}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{64}T_{\mu}^4 p^4 + \frac{1}{8}T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2}T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1},$$

где U_{zn} – входное напряжение контура положения, В;

K_{on} – коэффициент обратной связи по положению, $\frac{B}{рад}$;

T_{μ} – постоянная времени, с.

Аналитические зависимости управляющего сигнала САР положения исполнительного органа электропривода постоянного тока от времени, обеспечивающего особо точное движение в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой для средних перемещений, предлагается определять в виде

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left[\varphi(t) + T_{\mu} \cdot \omega(t) + \frac{1}{2}T_{\mu}^2 \cdot \omega^{(1)}(t) + \frac{1}{8}T_{\mu}^3 \cdot \omega^{(2)}(t) + \frac{1}{64}T_{\mu}^4 \cdot \omega^{(3)}(t) \right]. \quad (51)$$

На первом этапе, в интервале времени $0 \leq t \leq t_1$, уравнение (51) с учетом зависимостей (1) – (5) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left[\varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{24}t^4 + \frac{1}{6}T_{\mu}t^3 + \frac{1}{4}T_{\mu}^2t^2 + \frac{1}{8}T_{\mu}^3t + \frac{1}{64}T_{\mu}^4 \right) \right].$$

На втором этапе, в интервале времени $t_1 \leq t \leq 2t_1$, уравнение (51) с учетом зависимостей (6) – (10) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{1}{24}t_1^4 + \frac{1}{6}T_{\mu}t_1^3 + \frac{1}{4}T_{\mu}^2t_1^2 + \frac{1}{8}T_{\mu}^3t_1 - \frac{1}{64}T_{\mu}^4 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{1}{6}t_1^3 + \frac{1}{2}T_{\mu}t_1^2 + \frac{1}{2}T_{\mu}^2t_1 - \frac{1}{8}T_{\mu}^3 \right) \cdot (t - t_1) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{1}{4}t_1^2 + \frac{1}{2}T_{\mu}t_1 - \frac{1}{4}T_{\mu}^2 \right) \cdot (t - t_1)^2 + \left(\frac{1}{6}t_1 - \frac{1}{6}T_{\mu} \right) \cdot (t - t_1)^3 - \right. \right. \\ \left. \left. \left. \left(\frac{1}{24}t_1^4 + \frac{1}{6}T_{\mu}t_1^3 + \frac{1}{4}T_{\mu}^2t_1^2 + \frac{1}{8}T_{\mu}^3t_1 - \frac{1}{64}T_{\mu}^4 \right) \cdot (t - 2t_1) \right] \right\}$$

$$\left. \left. -\frac{1}{24} \cdot (t - t_1)^4 \right] \right\}.$$

На третьем этапе, в интервале времени $2t_1 \leq t \leq (2t_1 + t_2)$, уравнение (51) с учетом зависимостей (11) – (15) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{7}{12} t_1^4 + T_\mu t_1^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 t_1^2 \right) + (t_1^3 + T_\mu t_1^2) \cdot (t - 2t_1) + \frac{1}{2} t_1^2 \cdot (t - 2t_1)^2 \right] \right\}.$$

На четвертом этапе, в интервале времени $(2t_1 + t_2) \leq t \leq (3t_1 + t_2)$, уравнение (51) с учетом зависимостей (16) – (20) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{7}{12} t_1^4 + t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + T_\mu t_1^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 t_1^2 - \frac{1}{64} T_\mu^4 \right) + (t_1^3 + t_1^2 t_2 + T_\mu t_1^2 - \frac{1}{8} T_\mu^3) \cdot (t - 2t_1 - t_2) + \left(\frac{1}{2} t_1^2 - \frac{1}{4} T_\mu^2 \right) \cdot (t - 2t_1 - t_2)^2 - \frac{1}{6} T_\mu \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4 \right] \right\}.$$

На пятом этапе, в интервале времени $(3t_1 + t_2) \leq t \leq (4t_1 + t_2)$, уравнение (51) с учетом зависимостей (21) – (25) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{49}{24} t_1^4 + 2t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + \frac{11}{6} T_\mu t_1^3 + T_\mu t_1^2 t_2 + \frac{1}{4} T_\mu^2 t_1^2 - \frac{1}{8} T_\mu^3 t_1 + \frac{1}{64} T_\mu^4 \right) + \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} T_\mu t_1^2 - \frac{1}{2} T_\mu^2 t_1 + \frac{1}{8} T_\mu^3 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) + \left(\frac{1}{4} t_1^2 - \frac{1}{2} T_\mu t_1 + \frac{1}{4} T_\mu^2 \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \left(\frac{1}{6} t_1 - \frac{1}{6} T_\mu \right) \cdot (t - 3t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 3t_1 - t_2)^4 \right] \right\}.$$

На шестом этапе, в интервале времени $(4t_1 + t_2) \leq t \leq (5t_1 + t_2)$, уравнение (51) с учетом зависимостей (26) – (30) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[(4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2T_\mu t_1^3 + T_\mu t_1^2 t_2 - \frac{1}{64} T_\mu^4) + \right. \right. \\ \left. \left. + (2t_1^3 + t_1^2 t_2 - \frac{1}{8} T_\mu^3) \cdot (t - 4t_1 - t_2) - \frac{1}{4} T_\mu^2 \cdot (t - 4t_1 - t_2)^2 - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{6} T_\mu \cdot (t - 4t_1 - t_2)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - 4t_1 - t_2)^4 \right] \right\}.$$

На седьмом этапе, в интервале времени $(5t_1 + t_2) \leq t \leq (6t_1 + t_2)$, уравнение (51) с учетом зависимостей (31) – (35) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + \frac{11}{6} T_\mu t_1^3 + T_\mu t_1^2 t_2 - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{4} T_\mu^2 t_1^2 - \frac{1}{8} T_\mu^3 t_1 + \frac{1}{64} T_\mu^4) + \right. \right. \\ \left. \left. + (\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 - \frac{1}{2} T_\mu t_1^2 - \frac{1}{2} T_\mu^2 t_1 + \frac{1}{8} T_\mu^3) \cdot (t - 5t_1 - t_2) - \right. \right. \\ \left. \left. - (\frac{1}{4} t_1^2 + \frac{1}{2} T_\mu t_1 - \frac{1}{4} T_\mu^2) \cdot (t - 5t_1 - t_2)^2 - \right. \right. \\ \left. \left. - (\frac{1}{6} t_1 - \frac{1}{6} T_\mu) \cdot (t - 5t_1 - t_2)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 5t_1 - t_2)^4 \right] \right\}.$$

На восьмом этапе, в интервале времени $(6t_1 + t_2) \leq t \leq (6t_1 + 2t_2)$, уравнение (51) с учетом зависимостей (36) – (40) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + T_\mu t_1^3 + T_\mu t_1^2 t_2 - \frac{1}{2} T_\mu^2 t_1^2) + \right. \right. \\ \left. \left. + (t_1^3 + t_1^2 t_2 - T_\mu t_1^2) \cdot (t - 6t_1 - t_2) - \frac{1}{2} t_1 \cdot (t - 6t_1 - t_2)^2 \right] \right\}.$$

На девятом этапе, в интервале времени $(6t_1 + 2t_2) \leq t \leq (7t_1 + 2t_2)$: уравнение (51) с учетом зависимостей (41) – (45) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + T_\mu t_1^3 - \frac{1}{2} T_\mu^2 t_1^2 + \frac{1}{64} T_\mu^4 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + (t_1^3 - T_\mu t_1^2 + \frac{1}{8} T_\mu^3) \cdot (t - 6t_1 - 2t_2) - \left(\frac{1}{2} t_1^2 - \frac{1}{4} T_\mu^2 \right) \cdot (t - 6t_1 - 2t_2)^2 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{6} T_\mu \cdot (t - 6t_1 - 2t_2)^3 + \frac{1}{24} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2)^4 \right] \right\}.$$

На десятом этапе, в интервале времени $(7t_1 + 2t_2) \leq t \leq (8t_1 + 2t_2)$:
уравнение (51) с учетом зависимостей (46) – (50) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + \frac{1}{6} T_\mu t_1^3 - \frac{1}{4} T_\mu^2 t_1^2 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{8} T_\mu^3 t_1 - \frac{1}{64} T_\mu^4 \right) + \left(\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} T_\mu t_1^2 + \frac{1}{2} T_\mu^2 t_1 - \frac{1}{8} T_\mu^3 \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2) - \right. \\ \left. - \left(\frac{1}{4} t_1^2 - \frac{1}{2} T_\mu t_1 + \frac{1}{4} T_\mu^2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{1}{6} t_1 - \frac{1}{6} T_\mu \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2)^4 \right] \right\}.$$

После цикла, в интервале времени $(8t_1 + 2t_2) \leq t$, уравнение (51) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left[\varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2) \right].$$

Выводы

Разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока. Определены: её параметры; область существования; аналитические зависимости координат электропривода от времени при перемещениях его исполнительного органа в соответствии с данной диаграммой; аналитические зависимости управляющего сигнала САР положения исполнительного органа электропривода постоянного тока от времени, обеспечивающего особо точное движение в соответствии с предложенной диаграммой.

Внедрение предлагаемого математического обеспечения позволит избавиться от ошибки, вызванной влиянием инерционности САР положения, при средних перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.П. Добробаба, А.Л. Хорцев. Аналитические зависимости выходной координаты системы автоматического регулирования положения от времени при отработке типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для средних перемещений исполнительного органа электропривода. - Научные труды КубГТУ, №1, 2014 год. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/3>.

2. Патент на изобретение № 2401501. Позиционный программно-управляемый электропривод. /Ю.П. Добробаба, Д.С. Прохоренко: Оpubл. 10.10.2010, Бюл № 28.

REFERENCES

1. Ju.P. Dobrobaba, A.L. Horcev. - Nauchnye trudy KubGTU, №1, 2014. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/3>.

2. Patent na izobretenie № 2401501. Pozicionnyj programmno-upravljajemyj jelektroprivod. /Ju.P. Dobrobaba, D.S. Prohorenko: Opubl. 10.10.2010, Bjul № 28.

DETERMINATION OF CONTROL SIGNAL FOR MEDIUM MOVEMENTS OF ULTRA PRECISE ELECTRIC DRIVE ACTUATING DEVICE

YU.P. DOBROBABA, A.L. KHORTSEV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, 350072; e-mail: tolyahortsev@gmail.com*

In this article were developed optimum speed diagrams for medium movements of electric drive's actuating device. Were identified analytical dependences of position automatic regulation system's control signal of time, which allows to provide medium movements of electric drive's actuating device with ultra-precision.

keywords: optimum speed of diagram, medium movement, moving error, control signal.