

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

Ю.П. ДОБРОБАБА, А.Л. ХОРЦЕВ

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

В статье разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для больших 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, большие перемещения, ошибка по перемещению, управляющее воздействие.

Силовая часть электропривода постоянного тока описывается системой дифференциальных уравнений третьего порядка. Поэтому известная типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода формировалась для систем третьего порядка. Данная диаграмма получена без учета влияния инерционности системы автоматического регулирования (САР) положения исполнительного органа электропривода. Её использование для прецизионных электроприводов постоянного тока приведет к тому, что реальное перемещение исполнительного органа электропривода $\varphi_p(t)$, будет отличаться от перемещения исполнительного органа электропривода $\varphi(t)$, формируемого задающим устройством, на величину ошибки $\Delta\varphi(t)$ [1].

Актуальной является задача по разработке оптимальной по быстродействию диаграммы для больших 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 больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока, состоящая из одиннадцати этапов. За время цикла $T_{ц} = 8t_1 + 2t_2 + t_3$ исполнительный орган электропривода перемещается от начального значения угла поворота $\varphi_{нач}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{кон}$.

На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

$\omega_{доп}$ – максимально допустимое 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, седьмого, восьмого, десятого и одиннадцатого этапов, с;

t_2 – длительность третьего и девятого этапов, с.

t_3 – длительность шестого этапа, с.

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

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

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

$$t_3 = \frac{\varphi_{кон} - \varphi_{нач}}{\omega_{\partial on}} - \frac{\omega_{\partial on}}{\omega_{\partial on}^{(1)}} - 2 \cdot \frac{\omega_{\partial on}^{(1)}}{\omega_{\partial on}^{(2)}};$$

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

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

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

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

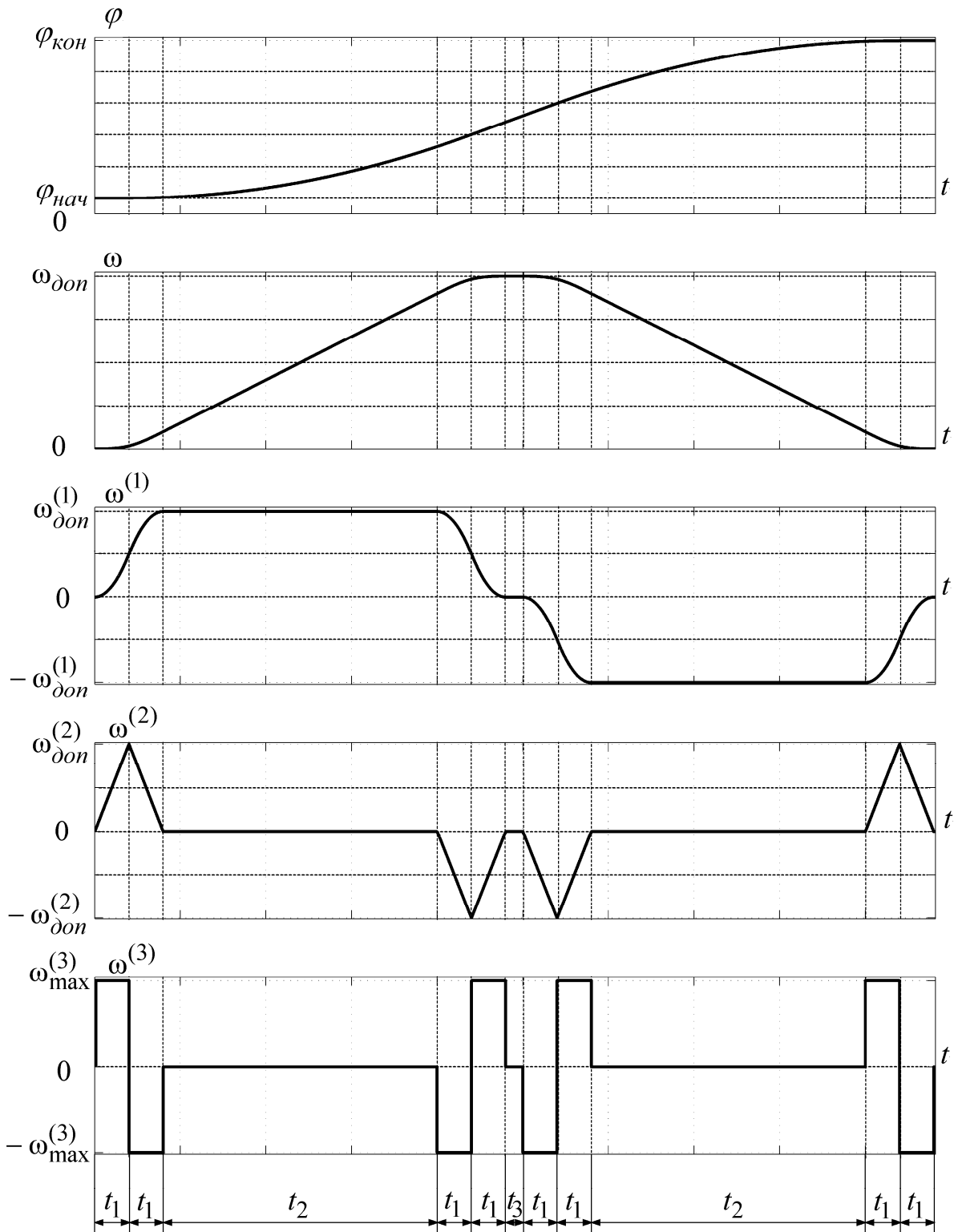


Рис. 1

Аналитические зависимости координат электропривода постоянного тока от времени при больших 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 $(2t_1 + t_2) \leq t \leq (3t_1 + t_2)$:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Этап 6. В интервале времени $(4t_1 + t_2) \leq t \leq (4t_1 + t_2 + t_3)$:

$$\omega^{(3)}(t) = 0; \quad (26)$$

$$\omega^{(2)}(t) = 0; \quad (27)$$

$$\omega^{(1)}(t) = 0; \quad (28)$$

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

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

Этап 7. В интервале времени $(4t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (5t_1 + t_2 + t_3)$:

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

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3); \quad (32)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2; \quad (33)$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3; \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (4t_1^4 + 3t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) + \\ + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^4. \end{aligned} \quad (35)$$

Этап 8. В интервале времени $(5t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + t_2 + t_3)$:

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

$$\omega^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3); \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \omega^{(1)}(t) = -\frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2; \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} \omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3; \end{aligned} \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{143}{24} t_1^4 + 4t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \\ + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + t_1^2 t_2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{4} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \\ - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4. \end{aligned} \quad (40)$$

Этап 9. В интервале времени $(6t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + 2t_2 + t_3)$:

$$\omega^{(3)}(t) = 0; \quad (41)$$

$$\omega^{(2)}(t) = 0; \quad (42)$$

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

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3); \quad (44)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 5t_1^3 t_2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \\ + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^3 + t_1^2 t_2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^2. \end{aligned} \quad (45)$$

Этап 10. В интервале времени $(6t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (7t_1 + 2t_2 + t_3)$:

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

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3); \quad (47)$$

$$\omega^{(1)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2; \quad (48)$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3; \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 \right) + \\ + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \\ + \frac{1}{24} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^4. \end{aligned} \quad (50)$$

Этап 11. В интервале времени $(7t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (8t_1 + 2t_2 + t_3)$:

$$\omega^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)}; \quad (51)$$

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3); \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \omega^{(1)}(t) = & -\frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \\ & -\frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2; \end{aligned} \quad (53)$$

$$\begin{aligned} \omega(t) = & \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) + \\ & + \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 - \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3; \end{aligned} \quad (54)$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) = & \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{191}{24}t_1^4 + 6t_1^3t_2 + t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 \right) + \\ & + \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \frac{1}{4}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \\ & + \frac{1}{6}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \frac{1}{24}\omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4. \end{aligned} \quad (55)$$

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

$$\frac{\varphi(p)}{U_{зп}(p)} = \frac{1}{K_{оп}} \cdot \frac{1}{\frac{1}{64}T_{\mu}^4 p^4 + \frac{1}{8}T_{\mu}^3 p^3 + \frac{1}{2}T_{\mu}^2 p^2 + T_{\mu} p + 1},$$

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

$K_{оп}$ – коэффициент обратной связи по положению, $\frac{В}{рад}$;

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 больших перемещений, предлагается определять в виде

$$U_{зп}(t) = K_{оп} \cdot \left[\varphi(t) + T_{\mu} \cdot \omega(t) + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 \cdot \omega^{(1)}(t) + \frac{1}{8} T_{\mu}^3 \cdot \omega^{(2)}(t) + \frac{1}{64} T_{\mu}^4 \cdot \omega^{(3)}(t) \right]. \quad (56)$$

На первом этапе, в интервале времени $0 \leq t \leq t_1$, уравнение (56) с учетом зависимостей (1) – (5) принимает вид

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

На втором этапе, в интервале времени $t_1 \leq t \leq 2t_1$, уравнение (56) с учетом зависимостей (6) – (10) принимает вид

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

На третьем этапе, в интервале времени $2t_1 \leq t \leq (2t_1 + t_2)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (11) – (15) принимает вид

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

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

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

$$\left. -\frac{1}{6}T_{\mu} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^3 - \frac{1}{24} \cdot (t - 2t_1 - t_2)^4 \right\}.$$

На пятом этапе, в интервале времени $(3t_1 + t_2) \leq t \leq (4t_1 + t_2)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (21) – (25) принимает вид

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

На шестом этапе, в интервале времени $(4t_1 + t_2) \leq t \leq (4t_1 + t_2 + t_3)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (26) – (30) принимает вид

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

На седьмом этапе, в интервале времени $(4t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (5t_1 + t_2 + t_3)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (31) – (35) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\left(4t_1^4 + 3t_1^3t_2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 + 2T_{\mu}t_1^3 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + T_{\mu}t_1^2t_2 - \frac{1}{64}T_{\mu}^4 \right) + \right. \\ \left. \left. \left(2t_1^3 + t_1^2t_2 - \frac{1}{8}T_{\mu}^3 \right) \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3) - \right. \right. \\ \left. \left. \left. - \frac{1}{4}T_{\mu}^2 \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^2 - \right. \right. \right.$$

$$\left. \begin{aligned} & -\frac{1}{6}T_{\mu} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^3 - \\ & -\frac{1}{24} \cdot (t - 4t_1 - t_2 - t_3)^4 \end{aligned} \right\}.$$

На восьмом этапе, в интервале времени $(5t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + t_2 + t_3)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (36) – (40) принимает вид

$$\begin{aligned} U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{143}{24}t_1^4 + 4t_1^3t_2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + \frac{11}{6}T_{\mu}t_1^3 + T_{\mu}t_1^2t_2 - \frac{1}{4}T_{\mu}^2t_1^2 - \frac{1}{8}T_{\mu}^3t_1 + \frac{1}{64}T_{\mu}^4 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{11}{6}t_1^3 + t_1^2t_2 - \frac{1}{2}T_{\mu}t_1^2 - \frac{1}{2}T_{\mu}^2t_1 + \frac{1}{8}T_{\mu}^3 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3) - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{1}{4}t_1^2 + \frac{1}{2}T_{\mu}t_1 - \frac{1}{4}T_{\mu}^2 \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^2 - \right. \right. \\ \left. \left. - \left(\frac{1}{6}t_1 - \frac{1}{6}T_{\mu} \right) \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^3 + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{24} \cdot (t - 5t_1 - t_2 - t_3)^4 \right] \right\}. \end{aligned}$$

На девятом этапе, в интервале времени $(6t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (6t_1 + 2t_2 + t_3)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (41) – (45) принимает вид

$$\begin{aligned} U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12}t_1^4 + 5t_1^3t_2 + \frac{1}{2}t_1^2t_2^2 + 2t_1^3t_3 + t_1^2t_2t_3 + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. + T_{\mu}t_1^3 + T_{\mu}t_1^2t_2 - \frac{1}{2}T_{\mu}^2t_1^2 \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + (t_1^3 + t_1^2t_2 - T_{\mu}t_1^2) \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3) - \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{1}{2}t_1^2 \cdot (t - 6t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] \right\}. \end{aligned}$$

На десятом этапе, в интервале времени $(6t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (7t_1 + 2t_2 + t_3)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (46) – (50) принимает вид

$$\begin{aligned}
 U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{89}{12} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 + \right. \right. \right. \\
 \left. \left. \left. + T_{\mu} t_1^3 - \frac{1}{2} T_{\mu}^2 t_1^2 + \frac{1}{64} T_{\mu}^4 \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. + (t_1^3 - T_{\mu} t_1^2 + \frac{1}{8} T_{\mu}^3) \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \right. \\
 \left. \left. - \left(\frac{1}{2} t_1^2 - \frac{1}{4} T_{\mu}^2 \right) \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \right. \right. \\
 \left. \left. + \frac{1}{6} T_{\mu} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^3 + \right. \right. \\
 \left. \left. \left. + \frac{1}{24} \cdot (t - 6t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

На одиннадцатом этапе, в интервале времени $(7t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (8t_1 + 2t_2 + t_3)$, уравнение (56) с учетом зависимостей (51) – (55) принимает вид

$$\begin{aligned}
 U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left\{ \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left[\left(\frac{191}{24} t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3 + \right. \right. \right. \\
 \left. \left. \left. + \frac{1}{6} T_{\mu} t_1^3 - \frac{1}{4} T_{\mu}^2 t_1^2 + \frac{1}{8} T_{\mu}^3 t_1 - \frac{1}{64} T_{\mu}^4 \right) + \right. \right. \\
 \left. \left. + \left(\frac{1}{6} t_1^3 - \frac{1}{2} T_{\mu} t_1^2 + \frac{1}{2} T_{\mu}^2 t_1 - \frac{1}{8} T_{\mu}^3 \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3) - \right. \right. \\
 \left. \left. - \left(\frac{1}{4} t_1^2 - \frac{1}{2} T_{\mu} t_1 + \frac{1}{4} T_{\mu}^2 \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \right. \right. \\
 \left. \left. + \left(\frac{1}{6} t_1 - \frac{1}{6} T_{\mu} \right) \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \right. \right. \\
 \left. \left. \left. - \frac{1}{24} \cdot (t - 7t_1 - 2t_2 - t_3)^4 \right] \right\}.
 \end{aligned}$$

На десятом этапе, в интервале времени $(8t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t$, уравнение (56) принимает вид

$$U_{zn}(t) = K_{on} \cdot \left[\varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (8t_1^4 + 6t_1^3 t_2 + t_1^2 t_2^2 + 2t_1^3 t_3 + t_1^2 t_2 t_3) \right].$$

Выводы

В статье разработана оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного

тока. Для предложенной диаграммы определены: 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.

Использование предлагаемого математического обеспечения для управления прецизионными электроприводами, позволит избавиться от ошибки, вызванной влиянием инерционности САР положения, при больших 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 больших перемещений исполнительного органа электропривода. - Научные труды КубГТУ, № 3, 2014 год. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/61>.

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, №3, 2014. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/61>.

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 LARGE MOVEMENTS OF ULTRA
PRECISE ELECTRIC DRIVE ACTUATING DEVICE*

YU.P. DOBROBABA, A.L. KHORTSEV

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

In this article were developed optimum speed diagrams for large 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 large movements of electric drive's actuating device with ultra-precision.

Keywords: optimum speed of diagram, large movement, moving error, control signal.