

*АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ВЫХОДНОЙ КООРДИНАТЫ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ ПРИ
ОТРАБОТКЕ ТИПОВОЙ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
ДИАГРАММЫ ДЛЯ СРЕДНИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО
ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА*

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 для электропривода, осуществляющего перемещение исполнительного органа в соответствии с существующей типовой оптимальной по быстродействию диаграммой для средних перемещений, определены аналитические зависимости выходной координаты системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода и величины его ошибки по перемещению от времени.

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

Система автоматического управления перемещением исполнительного органа электропривода представляет собой электротехнический комплекс, который состоит из:

устройства для формирования сигнала, соответствующего заданной диаграмме перемещения;

системы автоматического регулирования (САР) положения исполнительного органа электропривода, обрабатывающего заданную диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода.

В настоящее время известна типовая оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода, представленная на рис. 1, [1, 2]. На рис. 1 приняты обозначения:

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

$\omega_{\text{доп}}^{(1)}$ – максимально допустимое значение первой производной угловой

скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с^2}$;

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

t_1 – длительность первого и пятого этапов, с;

$2t_1$ – длительность второго и четвертого этапов, с;

t_2 – длительность третьего этапа, с;

$\varphi_{нач}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

$\varphi_{кон}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад.

Для типовой оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, представленной на рис. 1, справедливы следующие соотношения:

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

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

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

где $T_{ц}$ – длительность цикла, с.

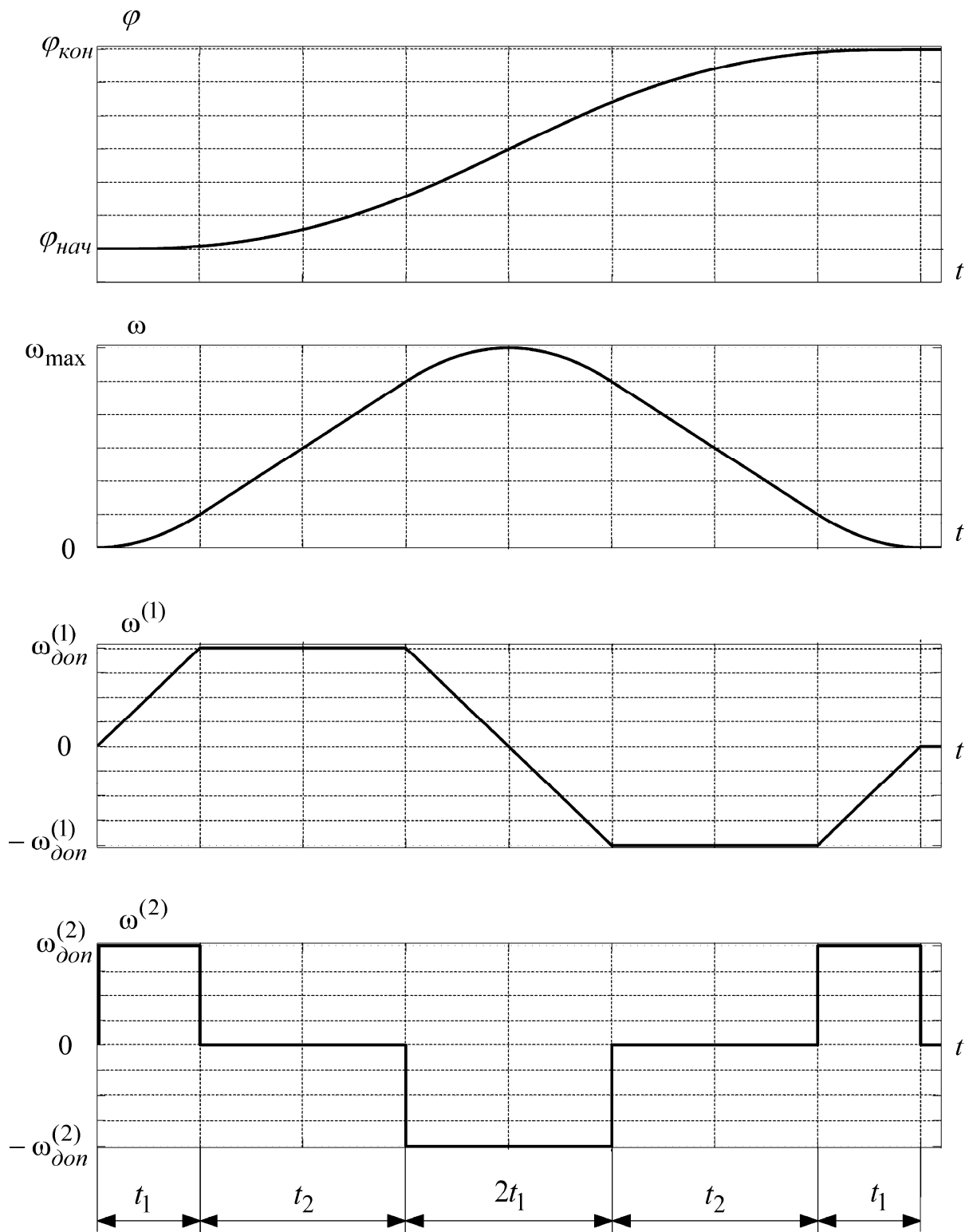


Рис. 1

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

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

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

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

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

Математическая модель силовой части электропривода постоянного тока представляет собой систему дифференциальных уравнений третьего порядка, и типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода сформирована для системы третьего порядка.

Система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода обладает инерционностью (математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений четвертого порядка) [3]. Из-за влияния инерционности САР положения реальное перемещение исполнительного органа электропривода $\varphi_p(t)$ отличается от перемещения исполнительного органа электропривода $\varphi(t)$, формируемого задающим устройством, на величину ошибки $\Delta\varphi(t)$.

Передаточная функция САР положения четвертого порядка имеет вид [3]

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

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

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

T_{μ} – постоянная времени, с.

Определены аналитические зависимости, позволяющие при обработке типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для средних

перемещений исполнительного органа электропривода определить реальное перемещение исполнительного органа электропривода φ_p , а также величину ошибки по его перемещению $\Delta\varphi$ в любой момент времени t .

На первом этапе, на интервале времени $0 \leq t \leq t_1$, сигнал, задаваемый на входе САР положения исполнительного органа электропривода, имеет вид

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

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_1 \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t}{T_\mu} + B_1 \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t}{T_\mu} + \\ & + C_1 \cdot t \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t}{T_\mu} + D_1 \cdot t \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t}{T_\mu} + \\ & + \frac{1}{6} \omega_{доп}^{(2)} \cdot t^3 - \frac{1}{2} T_\mu \omega_{доп}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{1}{2} T_\mu^2 \omega_{доп}^{(2)} \cdot t + \varphi_{нач} - \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{доп}^{(2)}, \end{aligned}$$

где $A_1 = -\frac{3}{16} T_\mu^3 \omega_{доп}^{(2)};$

$$B_1 = \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{доп}^{(2)};$$

$$C_1 = 0;$$

$$D_1 = \frac{1}{8} T_\mu^2 \omega_{доп}^{(2)}.$$

На втором этапе, на интервале времени $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$, сигнал, задаваемый на входе САР положения исполнительного органа электропривода, имеет вид

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

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_2 \cdot e^{-\frac{2(t-t_1)}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + B_2 \cdot e^{-\frac{2(t-t_1)}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + \\ & + C_2 \cdot (t - t_1) \cdot e^{-\frac{2(t-t_1)}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + D_2 \cdot (t - t_1) \cdot e^{-\frac{2(t-t_1)}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{2} \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \omega_{don}^{(2)} \cdot (T_\mu t_1 - \frac{1}{2} t_1^2) \cdot (t - t_1) + \\ + \varphi_{нач} + \omega_{don}^{(2)} (\frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{2} T_\mu \cdot t_1^2 + \frac{1}{6} t_1^3),$$

где

$$A_2 = -B_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_1}{T_\mu} + A_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_1}{T_\mu} - \\ - D_1 \cdot t_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_1}{T_\mu} + C_1 \cdot t_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_1}{T_\mu} + \frac{3}{16} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)};$$

$$B_2 = A_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_1}{T_\mu} + B_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_1}{T_\mu} + \\ + C_1 \cdot t_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_1}{T_\mu} + D_1 \cdot t_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_1}{T_\mu} - \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)};$$

$$C_2 = -D_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_1}{T_\mu} + C_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_1}{T_\mu};$$

$$D_2 = C_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_1}{T_\mu} + D_1 \cdot e^{-\frac{2t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_1}{T_\mu} - \frac{1}{8} T_\mu^2 \omega_{don}^{(2)}.$$

На третьем этапе, на интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (3t_1 + t_2)$, сигнал, задаваемый на входе САР положения исполнительного органа электропривода, имеет вид

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

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\varphi_p(t) = A_3 \cdot e^{-\frac{2(t-t_1-t_2)}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu} + B_3 \cdot e^{-\frac{2(t-t_1-t_2)}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu} + \\ + C_3 \cdot (t - t_1 - t_2) \cdot e^{-\frac{2(t-t_1-t_2)}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu} +$$

$$\begin{aligned}
 & + D_3 \cdot (t - t_1 - t_2) \cdot e^{-2\frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1-t_2}{T_\mu} - \\
 & - \frac{1}{6}\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^3 + \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu + \frac{1}{2}t_1\right) \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \\
 & - \omega_{\text{дон}}^{(2)} \left(\frac{1}{2}T_\mu^2 + T_\mu \cdot t_1 - \frac{1}{2}t_1^2 - t_1 t_2\right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \varphi_{\text{нач}} + \\
 & + \omega_{\text{дон}}^{(2)} \left(\frac{1}{8}T_\mu^3 + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1^2 - T_\mu \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{6}t_1^3 + \frac{1}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 t_2^2\right),
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 A_3 &= -B_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + A_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \\
 & - D_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + C_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \frac{3}{16}T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}; \\
 B_3 &= A_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + B_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \\
 & + C_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + D_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \frac{1}{8}T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}; \\
 C_3 &= -D_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + C_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu}; \\
 D_3 &= C_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + D_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \frac{1}{8}T_\mu^2 \omega_{\text{дон}}^{(2)}.
 \end{aligned}$$

На четвертом этапе, на интервале времени $(3t_1 + t_2) \leq t \leq (3t_1 + 2t_2)$, сигнал, задаваемый на входе САР положения исполнительного органа электропривода, имеет вид

$$\begin{aligned}
 \varphi(t) &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 t_2^2\right) + \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 t_2\right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \\
 & - \frac{1}{2}\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2.
 \end{aligned}$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_4 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu} + B_4 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu} + \\ & + C_4 \cdot (t-3t_1-t_2) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu} + \\ & + D_4 \cdot (t-3t_1-t_2) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-t_2}{T_\mu} - \\ & - \frac{1}{2} \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t-3t_1-t_2)^2 + \omega_{don}^{(2)} \cdot (T_\mu \cdot t_1 + \frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t-3t_1-t_2) + \\ & + \varphi_{нач} - \omega_{don}^{(2)} \left(\frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot t_1 + \frac{1}{2} T_\mu \cdot t_1^2 + T_\mu \cdot t_1 t_2 - \frac{11}{6} t_1^3 - \frac{5}{2} t_1^2 t_2 - \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_4 = & -B_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + A_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} - \\ & - 2D_3 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + 2C_3 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} - \frac{3}{16} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)}; \\ B_4 = & A_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + B_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} + \\ & + 2C_3 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + 2D_3 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)}; \\ C_4 = & -D_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + C_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu}; \\ D_4 = & C_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + D_3 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^2 \omega_{don}^{(2)}. \end{aligned}$$

На пятом этапе, на интервале времени $(3t_1 + 2t_2) \leq t \leq (4t_1 + 2t_2)$, сигнал, задаваемый на входе САР положения исполнительного органа электропривода, имеет вид

$$\varphi(t) = \varphi_{нач} + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) -$$

$$-\frac{1}{2}\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{6}\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3.$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_5 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu} + B_5 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu} + \\ & + C_5 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu} + \\ & + D_5 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-2t_2}{T_\mu} + \\ & + \frac{1}{6}\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 - \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu + \frac{1}{2}t_1\right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \\ & + \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu^2 + \frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1 + \frac{1}{2}t_1^2\right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \\ & + \varphi_{\text{нач}} - \omega_{\text{дон}}^{(2)} \left(\frac{1}{8}T_\mu^3 + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t_1 + \frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1^2 - \frac{11}{6}t_1^3 - 3t_1^2 t_2 - t_1 t_2^2\right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_5 = & -B_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + A_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \\ & - D_4 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + C_4 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \frac{3}{16}T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}; \\ B_5 = & A_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + B_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \\ & + C_4 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + D_4 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \frac{1}{8}T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}; \\ C_5 = & -D_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + C_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu}; \\ D_5 = & C_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + D_4 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \frac{1}{8}T_\mu^2 \omega_{\text{дон}}^{(2)}. \end{aligned}$$

Ошибка по перемещению исполнительного органа электропривода $\Delta\varphi$ определяется как разница между сигналом на входе САР φ и реальным перемещением исполнительного органа электропривода φ_p .

В качестве критерия для определения максимальной ошибки перемещения исполнительного органа электропривода целесообразно использовать значение наибольшей ошибки $\Delta\varphi_*$, в момент времени $t = 2t_1 + t_2$.

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_* = & -A_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} - B_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \\ & - C_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} - D_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \\ & + \omega_{дон}^{(2)} \cdot (T_\mu \cdot t_1^2 + T_\mu \cdot t_1 t_2 - \frac{1}{8} T_\mu^3). \end{aligned}$$

Рассмотрим электропривод, для которого справедливы следующие значения допустимых величин угловой скорости, ее первой и второй производных: $\omega_{дон} = 160 \frac{рад}{с}$; $\omega_{дон}^{(1)} = 80 \frac{рад}{с^2}$; $\omega_{дон}^{(2)} = 400 \frac{рад}{с^3}$.

Для таких электроприводов справедливы следующие граничные значения угла поворота исполнительного органа: $\varphi_{зр.1} = 6,4 рад$, $\varphi_{зр.2} = 352 рад$.

Определим значение ошибки по перемещению исполнительного органа электропривода при постоянной времени $T_\mu = 0,001 с$.

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 134,4 рад$, то типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для средних перемещений исполнительного органа электропривода имеет следующие параметры: $t_1 = 0,2 с$; $t_2 = 1 с$; $T_\mu = 2,8 с$. При этом наибольшая ошибка составляет $\Delta\varphi_* = 0,096 рад$.

На рис. 2 представлены зависимости: угла поворота исполнительного органа электропривода φ от времени t при его средних перемещениях в соответствии с типовой оптимальной по быстродействию диаграммой;

выходной координаты системы автоматического регулирования положения φ_p от времени t ; ошибки по перемещению исполнительного органа электропривода $\Delta\varphi$ от времени t .

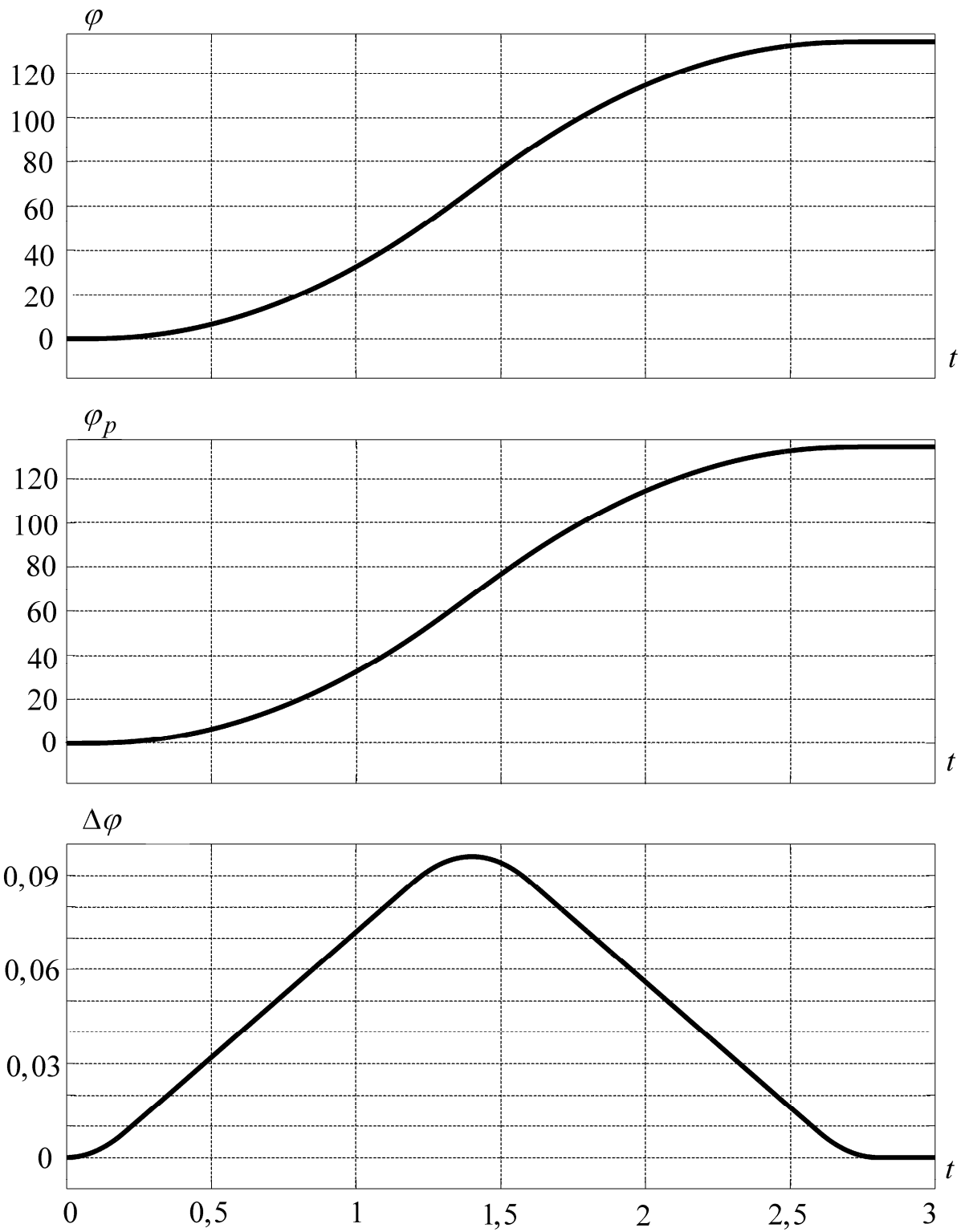


Рис. 2

ВЫВОДЫ

Для электроприводов, осуществляющих перемещение исполнительного органа в соответствии с существующей типовой оптимальной по быстродействию диаграммой для средних перемещений, определены аналитические зависимости выходной координаты системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода и величины его ошибки по перемещению от времени.

Полученное математическое обеспечение позволяет определить реальное перемещение исполнительного органа электропривода и величину его ошибки по перемещению в конкретный момент времени. Если величина ошибки не удовлетворяет требованиям, предъявляемым технологическим процессом, то необходимо разработать особо точную (с учетом инерционности САР положения) оптимальную по быстродействию диаграмму для средних перемещений исполнительного органа электропривода и формирующий ее задатчик интенсивности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Петров Ю.П.** Оптимальное управление электрическим приводом с учетом ограничений по нагреву. Л.: Изд-во «Энергия», 1971. 144 с.
2. **Соколов М.М.** Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. М.: Энергия, 1976. 488 с.
3. Пат. 2401501 RU. Позиционный программно-управляемый электропривод / Ю.П. Добробаба, Д.С. Прохоренко // БИПМ. 10.10.2010.

REFERENCES

1. Petrov Yu.P., *Optimalnoe upravlenie elektricheskim privodom s uchetom ogranicheniy po nagrevu* (Optimal control of the electric drive, with restrictions on heating), Leningrad, 1971. 144 p.
2. Sokolov M.M., *Avtomatizirovannyy elektroprivod obshchepromyshlennykh mekhanizmov* (Automated electric drive of general industrial machinery), Moscow, 1976. 488 p.

3. Dobrobaba Yu.P., Prokhorenko D.S., *Pozitsionnyy programmno-upravlyaemyy elektroprivod* (Positional software-controlled electric drive), Pat. 2401501 RU // BIPM. 10.10.2010.

Поступила 20.03.14 г.

*ANALYTICAL DEPENDENCES OF POSITION AUTOMATIC CONTROL SYSTEM
OUTPUT COORDINATE FOR OPTIMUM SPEED DIAGRAMS FOR MEDIUM
MOVEMENTS
OF ACTUATING DEVICE OF ELECTRIC DRIVE*

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 identified analytical dependences of position automatic control system output coordinate for optimum speed diagrams for medium movements of actuating device of electric drive and his moving error value.

Key words: optimum speed diagrams, medium movement, moving error.