

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

Ю.П. ДОБРОБАБА, А.Л. ХОРЦЕВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, 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 больших 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, большие перемещения, ошибка по перемещению.

Управление перемещением исполнительного органа прецизионного электропривода осуществляется системой автоматического управления, которая состоит из командоаппарата, формирующего сигнал согласно заданной диаграмме перемещения, и системы автоматического регулирования (САР) положения исполнительного органа электропривода, обрабатывающей заданную диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода.

В настоящее время управление прецизионными электроприводами осуществляется по известным типовым оптимальным по быстродействию диаграммам. При больших перемещениях исполнительного органа электропривода используется диаграмма, представленная на рисунке 1 [1, 2]. На рисунке 1 приняты обозначения:

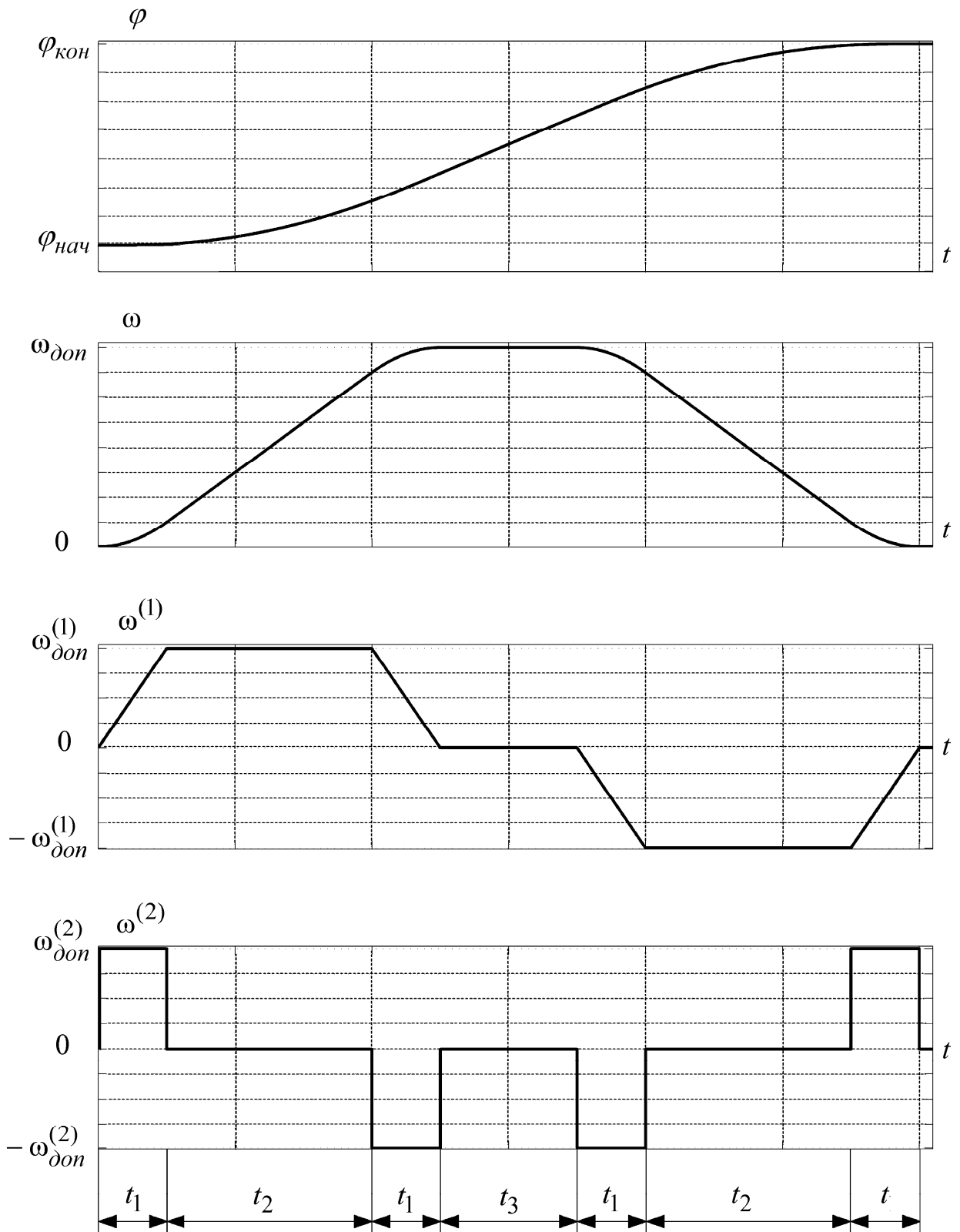


Рис. 1

$\omega_{доп}$ – максимально допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с}$;

$\omega_{доп}^{(1)}$ – 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, третьего, пятого и седьмого этапов, с;

t_2 – длительность второго и шестого этапов, с;

t_3 – длительность четвертого 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 для больших перемещения исполнительного органа электропривода справедливы следующие соотношения:

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

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

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

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

где $T_{ц}$ – длительность цикла, с.

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

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

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

Математическая модель силовой части электропривода представляет собой систему дифференциальных уравнений третьего порядка, так как учитываются электромагнитная постоянная времени ротора, электромеханическая постоянная времени привода и механическая постоянная времени равная единице. Поэтому при разработке существующей типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для больших перемещений формировалась третья производная угла поворота исполнительного органа электропривода.

Система автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода также обладает инерционностью, из-за влияния которой 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]:

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

где U_{zn} – 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 отработке типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для больших

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, в интервале времени $0 \leq t \leq t_1$, справедливо уравнение

$$\frac{1}{64}T_{\mu}^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8}T_{\mu}^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2}T_{\mu}^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_{\mu} \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \varphi_{нач} + \frac{1}{6}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t^3.$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

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

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

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

$$C_1 = 0;$$

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

На втором этапе, в интервале времени $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$, справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{1}{64}T_{\mu}^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8}T_{\mu}^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2}T_{\mu}^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_{\mu} \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\ & = \varphi_{нач} + \frac{1}{6}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2. \end{aligned}$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_2 \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + B_2 \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + \\ & + C_2 \cdot (t-t_1) \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + D_2 \cdot (t-t_1) \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + \\ & + \frac{1}{2}\omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t-t_1)^2 - \omega_{don}^{(2)} \cdot (T_\mu t_1 - \frac{1}{2}t_1^2) \cdot (t-t_1) + \\ & + \varphi_{нач} + \omega_{don}^{(2)} (\frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1^2 + \frac{1}{6}t_1^3), \end{aligned}$$

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

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

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

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

На третьем этапе, в интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (2t_1 + t_2)$, справедливо уравнение

$$\frac{1}{64}T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8}T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) =$$

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

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

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

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

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

$$+ D_3 \cdot (t - t_1 - t_2) \cdot e^{-2 \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t-t_1-t_2}{T_\mu} -$$

$$- \frac{1}{6} \omega_{дон}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^3 + \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} T_\mu + \frac{1}{2} t_1 \right) \cdot (t - t_1 - t_2)^2 -$$

$$- \omega_{дон}^{(2)} \left(\frac{1}{2} T_\mu^2 + T_\mu \cdot t_1 - \frac{1}{2} t_1^2 - t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) + \varphi_{нач} +$$

$$+ \omega_{дон}^{(2)} \left(\frac{1}{8} T_\mu^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{2} T_\mu \cdot t_1^2 - T_\mu \cdot t_1 t_2 + \frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right),$$

где

$$A_3 = -B_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_2}{T_\mu} + A_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_2}{T_\mu} -$$

$$- D_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_2}{T_\mu} + C_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_2}{T_\mu} + \frac{3}{16} T_\mu^3 \omega_{дон}^{(2)};$$

$$B_3 = A_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_2}{T_\mu} + B_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_2}{T_\mu} +$$

$$+ C_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_2}{T_\mu} + D_2 \cdot t_2 \cdot e^{-2 \frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_2}{T_\mu} - \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{дон}^{(2)};$$

$$C_3 = -D_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + C_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu};$$

$$D_3 = C_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + D_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \frac{1}{8} T_\mu^2 \omega_{don}^{(2)}.$$

На четвертом этапе, в интервале времени $(2t_1 + t_2) \leq t \leq (2t_1 + t_2 + t_3)$, справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{1}{64} T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8} T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\ & = \varphi_{нач} + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \omega_{don}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2). \end{aligned}$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

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

где

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

$$B_4 = A_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + B_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} +$$

$$+ C_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + D_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)};$$

$$C_4 = -D_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + C_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu};$$

$$D_4 = C_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + D_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^2 \omega_{don}^{(2)}.$$

На пятом этапе, в интервале времени $(2t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (3t_1 + t_2 + t_3)$, справедливо уравнение

$$\frac{1}{64} T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8} T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) =$$

$$= \varphi_{нач} + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) +$$

$$+ \omega_{don}^{(2)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{6} \omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3.$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\varphi_p(t) = A_5 \cdot e^{-2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu} +$$

$$+ B_5 \cdot e^{-2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu} +$$

$$+ C_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) \cdot e^{-2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu} +$$

$$+ D_5 \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3) \cdot e^{-2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-2t_1-t_2-t_3}{T_\mu} -$$

$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{6}\omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^3 + \frac{1}{2}T_\mu\omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 2t_1 - t_2 - t_3)^2 - \\
 & - \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu^2 - t_1^2 - t_1 t_2\right)(t - 2t_1 - t_2 - t_3) + \varphi_{нач} + \\
 & + \omega_{don}^{(2)} \left(\frac{1}{8}T_\mu^3 - T_\mu \cdot t_1^2 - T_\mu \cdot t_1 t_2 + t_1^3 + \frac{3}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3\right),
 \end{aligned}$$

где $A_5 = -B_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_3}{T_\mu} + A_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_3}{T_\mu} -$
 $- D_4 \cdot t_3 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_3}{T_\mu} + C_4 \cdot t_3 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_3}{T_\mu} + \frac{3}{16}T_\mu^3\omega_{don}^{(2)};$

$$\begin{aligned}
 B_5 = & A_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_3}{T_\mu} + B_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_3}{T_\mu} + \\
 & + C_4 \cdot t_3 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_3}{T_\mu} + D_4 \cdot t_3 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_3}{T_\mu} - \frac{1}{8}T_\mu^3\omega_{don}^{(2)};
 \end{aligned}$$

$$C_5 = -D_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_3}{T_\mu} + C_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_3}{T_\mu};$$

$$D_5 = C_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_3}{T_\mu} + D_4 \cdot e^{-2\frac{t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_3}{T_\mu} - \frac{1}{8}T_\mu^2\omega_{don}^{(2)}.$$

На шестом этапе, в интервале времени $(3t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (3t_1 + 2t_2 + t_3)$,

справедливо уравнение

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{64}T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8}T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\
 & = \varphi_{нач} + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2 t_2 + \frac{1}{2}t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3\right) + \\
 & + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1 t_2\right) \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3) - \frac{1}{2}\omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2 - t_3)^2.
 \end{aligned}$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_6 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu} + \\ & + B_6 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu} + \\ & + C_6 \cdot (t-3t_1-t_2-t_3) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu} + \\ & + D_6 \cdot (t-3t_1-t_2-t_3) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-t_2-t_3}{T_\mu} - \\ & - \frac{1}{2} \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t-3t_1-t_2-t_3)^2 + \\ & + \omega_{don}^{(2)} \cdot (T_\mu \cdot t_1 + \frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2)(t-3t_1-t_2-t_3) + \varphi_{нач} - \\ & - \omega_{don}^{(2)} (\frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot t_1 + \frac{1}{2} T_\mu \cdot t_1^2 + T_\mu \cdot t_1 t_2 - \frac{11}{6} t_1^3 - \frac{5}{2} t_1^2 t_2 - \frac{1}{2} t_1 t_2^2 - \\ & - t_1^2 t_3 - t_1 t_2 t_3), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} A_6 = & -B_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + A_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \\ & - D_5 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + C_5 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \frac{3}{16} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)}; \\ B_6 = & A_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + B_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \\ & + C_5 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + D_5 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)}; \\ C_6 = & -D_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + C_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu}; \end{aligned}$$

$$D_6 = C_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + D_5 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^2 \omega_{don}^{(2)}.$$

На седьмом этапе, в интервале времени $(3t_1 + 2t_2 + t_3) \leq t \leq (4t_1 + 2t_2 + t_3)$, справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{1}{64} T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8} T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\ & = \varphi_{нач} + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 + t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) - \\ & - \frac{1}{2} \omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3. \end{aligned}$$

При этом реальное перемещение исполнительного органа электропривода

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_7 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu} + \\ & + B_7 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu} + \\ & + C_7 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu} + \\ & + D_7 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1-2t_2-t_3}{T_\mu} + \\ & + \frac{1}{6} \omega_{don}^{(2)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^3 - \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} T_\mu + \frac{1}{2} t_1 \right) \cdot (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3)^2 + \\ & + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} T_\mu^2 + T_\mu \cdot t_1 + \frac{1}{2} t_1^2 \right) (t - 3t_1 - 2t_2 - t_3) + \varphi_{нач} - \\ & - \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} T_\mu^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot t_1 + \frac{1}{2} T_\mu \cdot t_1^2 - \frac{11}{6} t_1^3 - 3t_1^2 t_2 - t_1 t_2^2 - \right. \\ & \left. - t_1^2 t_3 - t_1 t_2 t_3 \right), \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{где } A_7 &= -B_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + A_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \\
 &\quad - D_6 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + C_6 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} - \frac{3}{16} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)}; \\
 B_7 &= A_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + B_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \\
 &\quad + C_6 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + D_6 \cdot t_2 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)}; \\
 C_7 &= -D_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + C_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu}; \\
 D_7 &= C_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_2}{T_\mu} + D_6 \cdot e^{-2\frac{t_2}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_2}{T_\mu} + \frac{1}{8} T_\mu^2 \omega_{don}^{(2)}.
 \end{aligned}$$

Ошибка по перемещению исполнительного органа электропривода $\Delta\varphi$ определяется как разница между сигналом, формируемым задающим устройством, 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 $t = 2t_1 + t_2$.

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

Рассмотрим электропривод, для которого справедливы следующие значения допустимых величин угловой скорости, её 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 $T_{\mu} = 0,001с$.

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 400 рад$, то типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода имеет следующие параметры: $t_1 = 0,2с$; $t_2 = 1,8с$; $t_3 = 0,3с$; $T_{\psi} = 4,7с$. При этом наибольшая ошибка составляет $\Delta\varphi_* = 0,16 рад$.

На рисунке 2 представлены зависимости: угла поворота исполнительного органа электропривода φ от времени t при его больших 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 .

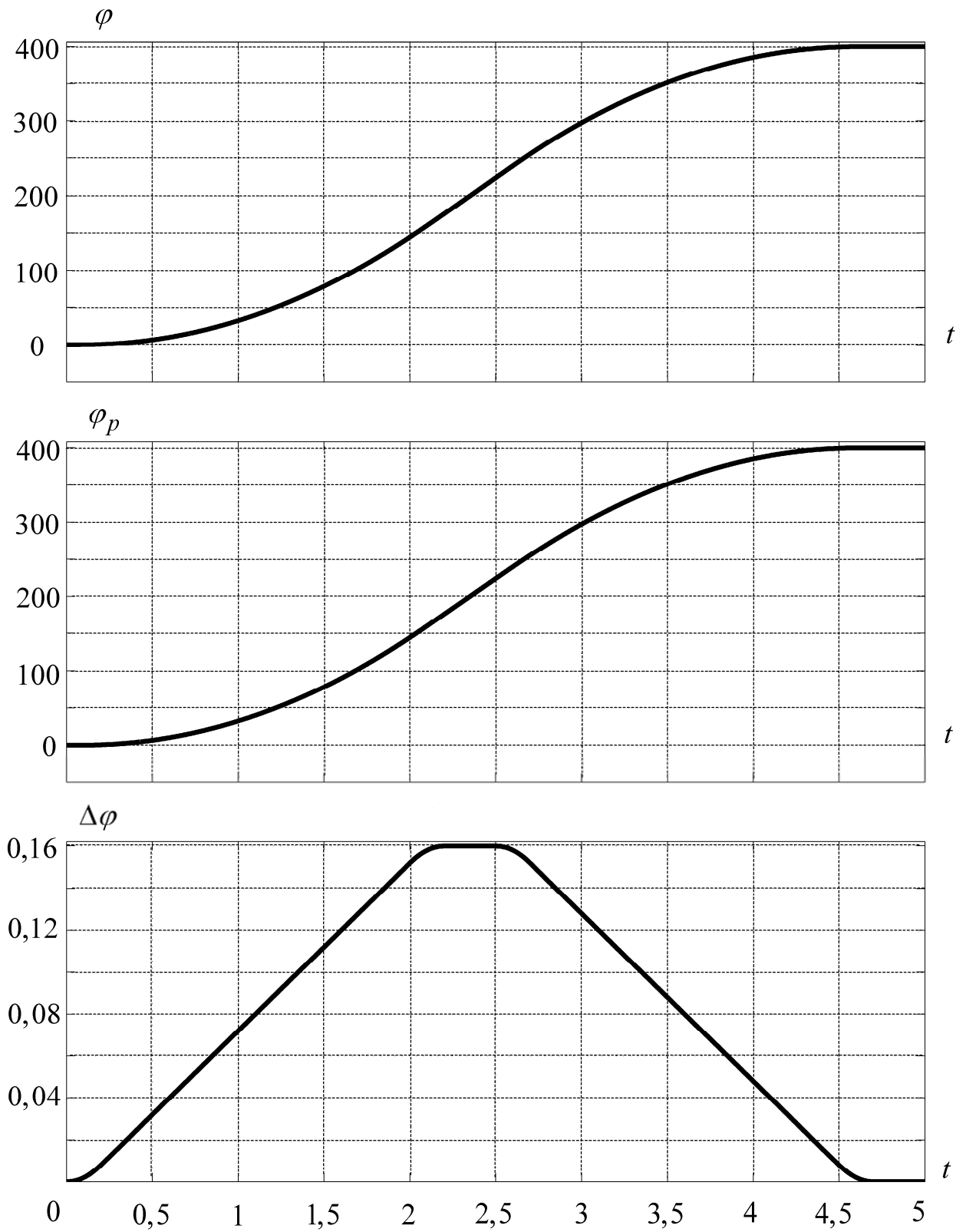


Рис. 2

Выводы

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

Полученное математическое обеспечение позволит определить реальное перемещение исполнительного органа электропривода и величину его ошибки по перемещению в конкретный момент времени.

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

REFERENCES

1. Petrov Ju.P. Optimal'noe upravlenie jelektricheskim privodom s uchetom ogranichenij po nagrevu. L.: Izd-vo «Jenergija», 1971. – 144 s.
2. Sokolov M.M. Avtomatizirovannyj jelektroprivod obshhepromyshlennyh me-hanizmov. M.: «Jenergija», 1976. 488 s.
3. Patent na izobretenie № 2401501. Pozicionnyj programmno-upravljajemyj jelektroprivod /Ju.P. Dobrobaba, D.S. Prohorenko; Opubl 10.10.2010, Bjul. №28.

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

YU.P. DOBROBABA, A.L. KHORTSEV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya St. Krasnodar, 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 large movements of actuating device of electric drive and his moving error value.

keywords: optimum speed diagrams, large movement, moving error.