

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

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

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

Добробаба Юрий Петрович
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yuri Petrovitch
Cand.Tech.Sci., professor

Нечесов Владимир Евгеньевич
студент

Nechesov Vladimir Evgenievich
student

Хорцев Анатолий Леонидович
студент
*Кубанский государственный технологический
университет, Краснодар, Россия*

Khortsev Anatoliy Leonidovich
student
*Kuban State Technological University,
Krasnodar, Russia*

В статье для существующей типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода определены аналитические зависимости выходной координаты системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода и величины его ошибки по перемещению от времени

In this article we have identified analytical dependences of position of an automatic control system output coordinate for optimum speed diagrams for small movements of actuating device of electric drive and its moving error value

Ключевые слова: ОПТИМАЛЬНАЯ ПО
БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА, МАЛЫЕ
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ, ОШИБКА ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ

Keywords: OPTIMUM SPEED DIAGRAMS,
SMALL MOVEMENT, MOVING ERROR

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 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 рисунке 1, [1, 2].

Данная диаграмма состоит из трех этапов. На первом и третьем этапах вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению $\omega_{доп}^{(2)}$; на втором этапе вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком «минус» $-\omega_{доп}^{(2)}$. Длительность первого и третьего этапов равна t_1 ; длительность второго этапа равна $2t_1$. В момент времени t_1 первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода достигает максимального значения $\omega_{max}^{(1)}$; в момент времени $3t_1$ первая производная угловой скорости достигает максимального значения со знаком «минус» $-\omega_{max}^{(1)}$. В момент времени $2t_1$ угловая скорость исполнительного органа электропривода достигает максимального значения ω_{max} . За время цикла $T_{ц} = 4t_1$ исполнительный орган электропривода перемещается от начального значения угла поворота $\varphi_{нач}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{кон}$.

Для типовой оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, представленной на рисунке 1, справедливы следующие соотношения [3]:

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

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

$$\omega_{max}^{(1)} = \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) \cdot [\omega_{доп}^{(2)}]^2}; \quad (3)$$

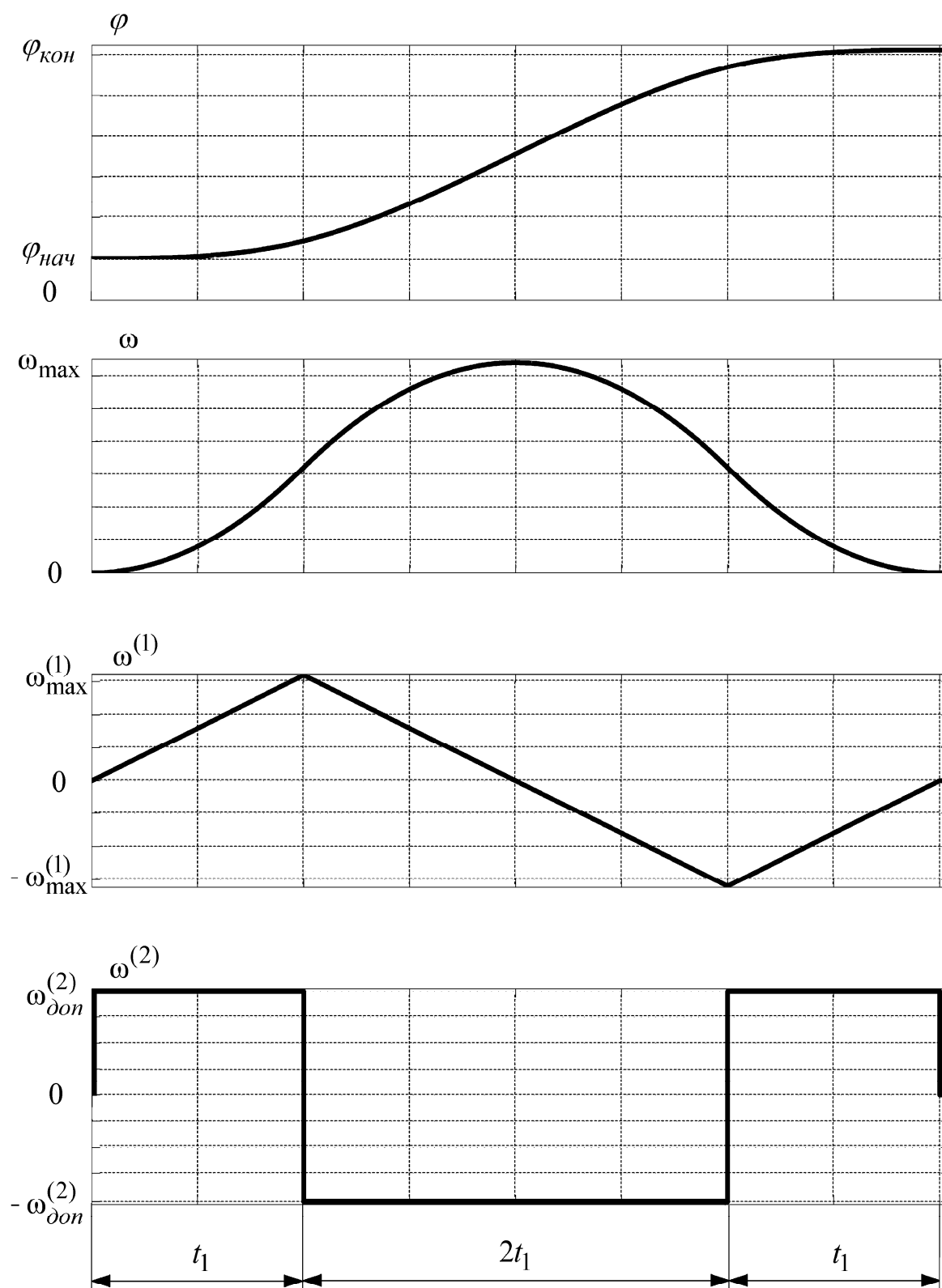


Рисунок 1 – Типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода

$$\omega_{\max} = \sqrt[3]{\frac{1}{4} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})^2 \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}}. \quad (4)$$

Область существования типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода [3]:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \varphi_{\text{зр.1}}, \quad (5)$$

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

$\omega_{\text{доп}}^{(1)}$ –максимально допустимое значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\text{рад} / \text{с}^2$.

На кафедре электроснабжения промышленных предприятий Кубанского государственного технологического университета разработан задачник интенсивности, формирующий типовую оптимальную по быстродействию диаграмму для малых перемещений исполнительного органа электропривода [4].

Аналитические зависимости угла поворота исполнительного органа электропривода от времени при его малых перемещениях в соответствии с типовой оптимальной по быстродействию диаграммой, представленной на рисунке 1, имеют вид:

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

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

Этап 2. В интервале времени $t_1 \leq t \leq 3t_1$:

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

$$-\frac{1}{6}\omega_{доп}^{(2)} \cdot (t - t_1)^3. \quad (7)$$

Этап 3. В интервале времени $3t_1 \leq t \leq 4t_1$:

$$\begin{aligned} \varphi(t) = \varphi_{нач} + \frac{11}{6}\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2}\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{1}{2}\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \\ + \frac{1}{6}\omega_{доп}^{(2)} \cdot (t - 3t_1)^3. \end{aligned} \quad (8)$$

Математическая модель силовой части электропривода постоянного тока представляет собой систему дифференциальных уравнений третьего порядка, поэтому типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для малых 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) [5]. 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 $\Delta\varphi(t)$.

Целью данной работы является определение аналитических зависимостей выходной координаты системы автоматического регулирования положения исполнительного органа электропривода φ_p и величины его ошибки по перемещению $\Delta\varphi$ от времени t при отработке типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода.

Передаточная функция САР положения четвертого порядка имеет вид [5]:

$$\frac{\varphi_p(p)}{U_{zn}(p)} = \frac{1}{\frac{1}{64}T_\mu^4 p^4 + \frac{1}{8}T_\mu^3 p^3 + \frac{1}{2}T_\mu^2 p^2 + T_\mu p + 1}, \quad (9)$$

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

T_μ – постоянная времени, с.

На первом этапе, в интервале времени $0 \leq t \leq t_1$, для САР четвертого порядка с учетом воздействия (6) справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{1}{64}T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8}T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\ & = \varphi_{нач} + \frac{1}{6}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t^3. \end{aligned} \quad (10)$$

При решении уравнения (10) получаем зависимость выходной координаты системы автоматического регулирования положения от времени:

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_1 \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t}{T_\mu} + B_1 \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t}{T_\mu} + \\ & + C_1 \cdot t \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t}{T_\mu} + D_1 \cdot t \cdot e^{-\frac{2t}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t}{T_\mu} + \\ & + \frac{1}{6}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t^3 - \frac{1}{2}T_\mu\omega_{дон}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{1}{2}T_\mu^2\omega_{дон}^{(2)} \cdot t + \varphi_{нач} - \frac{1}{8}T_\mu^3\omega_{дон}^{(2)}, \end{aligned} \quad (11)$$

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

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

$C_1 = 0$;

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

При этом зависимость ошибки по перемещению от времени имеет вид:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(t) = & -A_1 \cdot e^{-2\frac{t}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t}{T_\mu} - B_1 \cdot e^{-2\frac{t}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t}{T_\mu} - \\ & - C_1 \cdot t \cdot e^{-2\frac{t}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t}{T_\mu} - D_1 \cdot t \cdot e^{-2\frac{t}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t}{T_\mu} + \\ & + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu \cdot t^2 - \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t + \frac{1}{8}T_\mu^3\right). \end{aligned} \quad (12)$$

При $t = t_1$

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_1 = & -A_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} - B_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \\ & - C_1 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} - D_1 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \\ & + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1^2 - \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t_1 + \frac{1}{8}T_\mu^3\right). \end{aligned} \quad (13)$$

На втором этапе, в интервале времени $t_1 \leq t \leq 3t_1$, для САР четвертого порядка с учетом воздействия (7) справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{1}{64}T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8}T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\ & = \varphi_{нач} + \frac{1}{6}\omega_{don}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2}\omega_{don}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2}\omega_{don}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \\ & - \frac{1}{6}\omega_{don}^{(2)} \cdot (t - t_1)^3. \end{aligned} \quad (14)$$

При решении уравнения (14) получаем зависимость выходной координаты системы автоматического регулирования положения от времени:

$$\varphi_p(t) = A_2 \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + B_2 \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} +$$

$$\begin{aligned}
 &+ C_2 \cdot (t - t_1) \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + \\
 &+ D_2 \cdot (t - t_1) \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} - \\
 &- \frac{1}{6} \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot (t - t_1)^3 + \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} T_\mu + \frac{1}{2} t_1\right) \cdot (t - t_1)^2 - \\
 &- \omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} T_\mu^2 + T_\mu t_1 - \frac{1}{2} t_1^2\right) \cdot (t - t_1) + \varphi_{\text{нач}} - \\
 &- \omega_{\text{дон}}^{(2)} \left(\frac{1}{8} T_\mu^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{2} T_\mu \cdot t_1^2 + \frac{1}{6} t_1^3\right), \tag{15}
 \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned}
 A_2 &= -B_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + A_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \\
 &- D_1 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + C_1 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{3}{8} T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}; \\
 B_2 &= A_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + B_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \\
 &+ C_1 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + D_1 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \frac{1}{4} T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}; \\
 C_2 &= -D_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + C_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu}; \\
 D_2 &= C_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + D_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \frac{1}{4} T_\mu^2 \omega_{\text{дон}}^{(2)}.
 \end{aligned}$$

При этом зависимость ошибки по перемещению от времени имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi(t) = & -A_2 \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} - B_2 \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} - \\
 & - C_2 \cdot (t-t_1) \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-t_1}{T_\mu} - \\
 & - D_2 \cdot (t-t_1) \cdot e^{-2\frac{t-t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-t_1}{T_\mu} + \\
 & + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left[-\frac{1}{2}T_\mu \cdot (t-t_1)^2 + \left(\frac{1}{2}T_\mu^2 + T_\mu \cdot t_1\right) \cdot (t-t_1) - \right. \\
 & \left. - \left(\frac{1}{8}T_\mu^3 + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1^2\right) \right].
 \end{aligned} \tag{16}$$

При $t = 2t_1$

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi_* = & -A_2 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} - B_2 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \\
 & - C_2 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} - D_2 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \\
 & + \omega_{don}^{(2)} \cdot (T_\mu \cdot t_1^2 - \frac{1}{8}T_\mu^3).
 \end{aligned} \tag{17}$$

При $t = 3t_1$

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi_2 = & -A_2 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} - B_2 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} - \\
 & - 2C_2 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} - 2D_2 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} + \\
 & + \omega_{don}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1^2 + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{8}T_\mu^3\right).
 \end{aligned} \tag{18}$$

На третьем этапе, в интервале времени $3t_1 \leq t \leq 4t_1$, для САР четвертого порядка с учетом воздействия (8) справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \frac{1}{64}T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8}T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\ & = \varphi_{нач} + \frac{11}{6}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{1}{2}\omega_{дон}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \\ & + \frac{1}{6}\omega_{дон}^{(2)} \cdot (t - 3t_1)^3. \end{aligned} \quad (19)$$

При решении уравнения (19) получаем зависимость выходной координаты системы автоматического регулирования положения от времени:

$$\begin{aligned} \varphi_p(t) = & A_3 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1}{T_\mu} + B_3 \cdot e^{-2\frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1}{T_\mu} + \\ & + C_3 \cdot (t - 3t_1) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-3t_1}{T_\mu} + \\ & + D_3 \cdot (t - 3t_1) \cdot e^{-2\frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-3t_1}{T_\mu} + \\ & + \frac{1}{6}\omega_{дон}^{(2)} \cdot (t - 3t_1)^3 - \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu + \frac{1}{2}t_1\right) \cdot (t - 3t_1)^2 + \\ & + \omega_{дон}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2}T_\mu^2 + T_\mu t_1 + \frac{1}{2}t_1^2\right) \cdot (t - 3t_1) + \varphi_{нач} - \\ & - \omega_{дон}^{(2)} \left(\frac{1}{8}T_\mu^3 + \frac{1}{2}T_\mu^2 \cdot t_1 - \frac{1}{2}T_\mu \cdot t_1^2 - \frac{11}{6}t_1^3\right), \end{aligned} \quad (20)$$

где $A_3 = -B_2 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + A_2 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} -$

$$- 2D_2 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4\frac{t_1}{T_\mu} + 2C_2 \cdot t_1 \cdot e^{-4\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4\frac{t_1}{T_\mu} - \frac{3}{8}T_\mu^3 \omega_{дон}^{(2)};$$

$$\begin{aligned}
 B_3 &= A_2 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4 \frac{t_1}{T_\mu} + B_2 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4 \frac{t_1}{T_\mu} + \\
 &+ 2C_2 \cdot t_1 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4 \frac{t_1}{T_\mu} + 2D_2 \cdot t_1 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4 \frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{4} T_\mu^3 \omega_{don}^{(2)}; \\
 C_3 &= -D_2 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4 \frac{t_1}{T_\mu} + C_2 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4 \frac{t_1}{T_\mu}; \\
 D_3 &= C_2 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 4 \frac{t_1}{T_\mu} + D_2 \cdot e^{-4 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 4 \frac{t_1}{T_\mu} + \frac{1}{4} T_\mu^2 \omega_{don}^{(2)}.
 \end{aligned}$$

При этом зависимость ошибки по перемещению от времени имеет вид

$$\begin{aligned}
 \Delta\varphi(t) &= -A_3 \cdot e^{-2 \frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t-3t_1}{T_\mu} - B_3 \cdot e^{-2 \frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t-3t_1}{T_\mu} - \\
 &- C_3 \cdot (t-3t_1) \cdot e^{-2 \frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t-3t_1}{T_\mu} - \\
 &- D_3 \cdot (t-3t_1) \cdot e^{-2 \frac{t-3t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t-3t_1}{T_\mu} + \\
 &+ \omega_{don}^{(2)} \cdot \left[\frac{1}{2} T_\mu \cdot (t-3t_1)^2 - \left(\frac{1}{2} T_\mu^2 + T_\mu \cdot t_1 \right) \cdot (t-3t_1) + \right. \\
 &\left. + \left(\frac{1}{8} T_\mu^3 + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot t_1 + \frac{1}{2} T_\mu \cdot t_1^2 \right) \right]. \tag{21}
 \end{aligned}$$

При $t = 4t_1$

$$\Delta\varphi_3 = -A_3 \cdot e^{-2 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2 \frac{t_1}{T_\mu} - B_3 \cdot e^{-2 \frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2 \frac{t_1}{T_\mu} -$$

$$\begin{aligned}
 & -C_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} - D_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \\
 & + \frac{1}{8} T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}.
 \end{aligned} \tag{22}$$

После цикла, в интервале времени $4t_1 \leq t$, для САР четвертого порядка справедливо уравнение

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{64} T_\mu^4 \cdot \varphi_p^{(4)}(t) + \frac{1}{8} T_\mu^3 \cdot \varphi_p^{(3)}(t) + \frac{1}{2} T_\mu^2 \cdot \varphi_p^{(2)}(t) + T_\mu \cdot \varphi_p^{(1)}(t) + \varphi_p(t) = \\
 & = \varphi_{\text{нач}} + 2\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1^3.
 \end{aligned} \tag{23}$$

При решении уравнения (23) получаем зависимость выходной координаты системы автоматического регулирования положения от времени:

$$\begin{aligned}
 \varphi_p(t) = & A_4 \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-4t_1}{T_\mu} + B_4 \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-4t_1}{T_\mu} + \\
 & + C_4 \cdot (t-4t_1) \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-4t_1}{T_\mu} + \\
 & + D_4 \cdot (t-4t_1) \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-4t_1}{T_\mu} + \varphi_{\text{нач}} + 2\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot t_1^3,
 \end{aligned} \tag{24}$$

где

$$\begin{aligned}
 A_4 = & -B_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + A_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} - \\
 & - D_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + C_3 \cdot t_1 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} + \frac{3}{16} T_\mu^3 \omega_{\text{дон}}^{(2)}; \\
 B_4 = & A_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t_1}{T_\mu} + B_3 \cdot e^{-2\frac{t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t_1}{T_\mu} +
 \end{aligned}$$

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

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

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

При этом зависимость ошибки по перемещению от времени имеет вид

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(t) = & -A_4 \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-4t_1}{T_\mu} - B_4 \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-4t_1}{T_\mu} - \\ & - C_4 \cdot (t-4t_1) \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \sin 2\frac{t-4t_1}{T_\mu} - \\ & - D_4 \cdot (t-4t_1) \cdot e^{-2\frac{t-4t_1}{T_\mu}} \cdot \cos 2\frac{t-4t_1}{T_\mu}. \end{aligned} \quad (25)$$

При $t = \infty$

$$\Delta\varphi_\infty = 0. \quad (26)$$

Зависимости (12), (16), (21) и (25) позволяют определить ошибку по перемещению исполнительного органа электропривода в конкретный момент времени. По зависимостям (13), (18) и (22) определяются значения ошибки в конце каждого этапа. Зависимость (26) показывает, что после цикла ошибка отсутствует. В момент времени $t = 2t_1$ ошибка $\Delta\varphi_*$, определяемая по формуле (17), достигает наибольшего значения, которое целесообразно использовать в качестве критерия для определения максимальной ошибки перемещения исполнительного органа электропривода.

Рассмотрим электроприводы, для которых 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 справедливо следующее граничное значение угла поворота исполнительного органа: $\varphi_{зр.1} = 6,4 рад$.

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

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 6,4 рад$, то типовая оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода имеет следующие параметры: $t_1 = 0,2с$; $T_y = 0,8с$. При этом максимальная ошибка составляет $\Delta\varphi_* = 0,016 рад$.

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

Выводы

Для существующей типовой оптимальной по быстродействию диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода 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

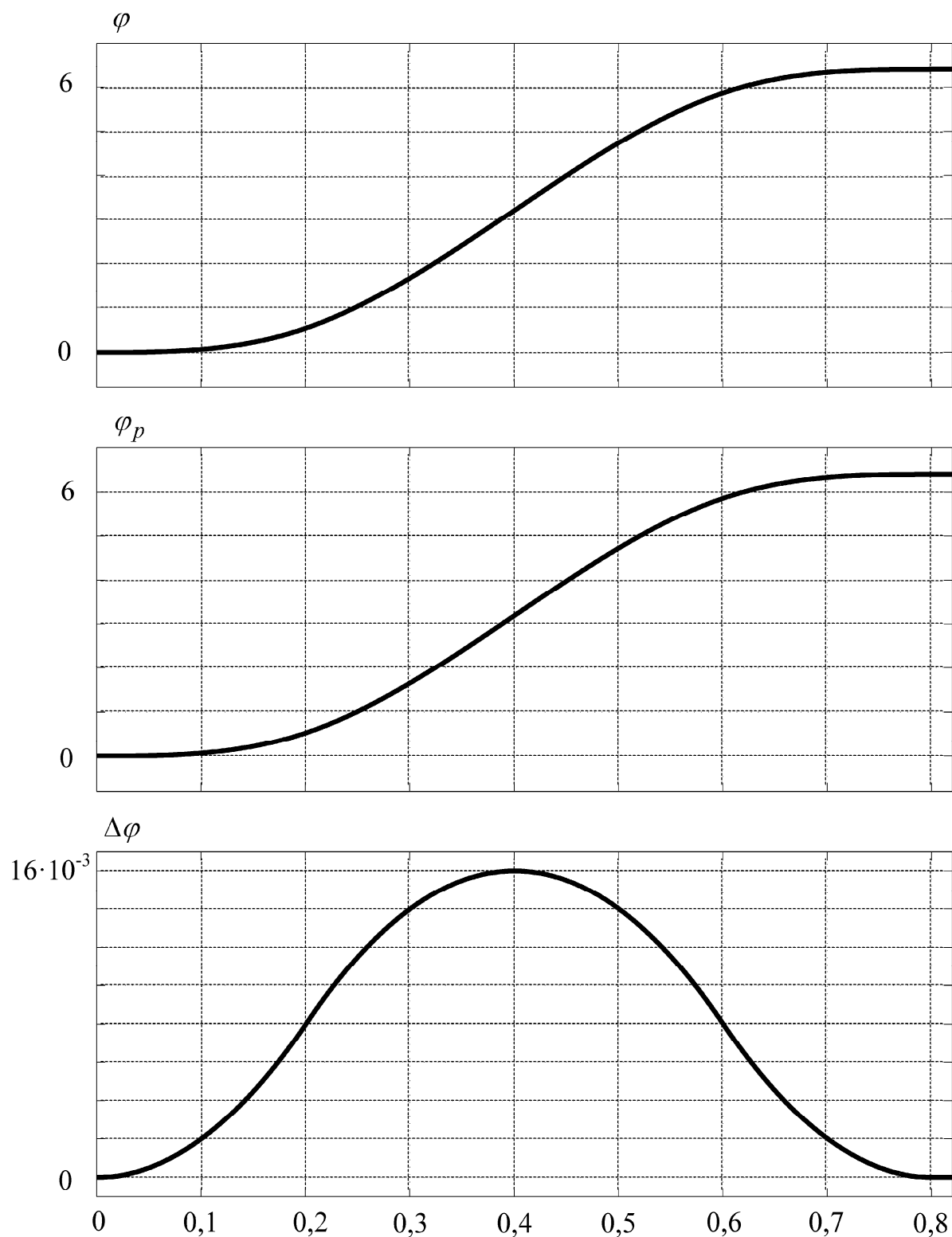


Рисунок 2

величина ошибки не удовлетворяет требованиям, предъявляемым технологическим процессом, то необходимо разработать особо точную (с учетом инерционности САР положения) оптимальную по быстрдействию диаграмму для малых перемещений исполнительного органа электропривода и формирующий её задатчик интенсивности.

Список литературы

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. Коробейников Б.А., Добробаба Ю.П., Добробаба С.В. Теория решения изобретательских задач: учеб.-метод. Пособие для практических занятий и самостоятельного обучения раздела «Устройства для формирования оптимальных по быстрдействию диаграмм перемещения электроприводов» по дисциплине «Теория решения изобретательских задач» для студентов всех форм обучения специальности 140211 (100400) Электроснабжение. – Краснодар: Изд. КубГТУ, 2006. – 31с.
4. Пат. на полезную модель № 32650, МПК 7 Н 02 Р 7/80. Устройство для формирования диаграмм перемещения электропривода с ограничением второй производной скорости /Ю.П. Добробаба, В.А. Мурлина, Г.А. Кошкин, С.В. Добробаба, М.В. Мартыненко; Оpubл. 27.09.2003, Бюл № 27.
5. 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 ograničenij po nagrevu. L.: Izd-vo «Jenergija», 1971. – 144 s.
2. Sokolov M.M. Avtomatizirovannyj jelektroprivod obshhepromyshlennyh mehanizmov. M.: «Jenergija», 1976. 488 s.
3. Korobejnikov B.A., Dobrobaba Ju.P., Dobrobaba S.V. Teorija reshenija izobretatel'skih zadach: ucheb.-metod. Posobie dlja praktičeskikh zanjatij i samostojatel'nogo obuchenija razdela «Ustrojstva dlja formirovanija optimal'nyh po bystrodejstviju diagramm peremeshhenija jelektroprivodov» po discipline «Teorija reshenija izobretatel'skih zadach» dlja studentov vseh form obuchenija special'nosti 140211 (100400) Jelektrosnabzhenie. – Krasnodar: Izd. KubGTU, 2006. – 31s.
4. Pat. na poleznuju model' № 32650, MPK 7 N 02 R 7/80. Ustrojstvo dlja formirovanija diagramm peremeshhenija jelektroprivoda s ogranicheniem vtoroj proizvodnoj skorosti /Ju.P. Dobrobaba, V.A. Murlina, G.A. Koshkin, S.V. Dobrobaba, M.V. Martynenko; Opubl. 27.09.2003, Bjul № 27.
5. Patent na izobretenie № 2401501. Pozicionnyj programmno-upravljaemyj jelektroprivod /Ju.P. Dobrobaba, D.S. Prohorenko; Opubl 10.10.2010, Bjul. №28.