

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММЫ ДЛЯ МАЛЫХ ИЗМЕНЕНИЙ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА С АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ И УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ

Ю.П. ДОБРОБАБА, М.В. ПЕТЕЛИНА

*Кубанский государственный технологический университет,
350072, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: petelinamv@mail.ru*

В статье предлагается оптимальная по быстродействию диаграмма для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом. Для данной диаграммы определены аналитические зависимости для расчета ее параметров и область существования.

Ключевые слова: оптимальная по быстродействию диаграмма, исполнительный орган, малые изменения скорости.

В настоящее время для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем используется типовая диаграмма, состоящая из одного этапа и имеющая ограничение по первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода. При разработке типовой диаграммы для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем не учитывалась упругость валопровода. Использование типовой диаграммы для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем для электроприводов с упругим валопроводом приведет к несанкционированному движению. Поэтому актуальность разработки оптимальной по быстродействию диаграммы для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом не вызывает сомнений.

На рисунках 1÷4 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом, состоящая из трех этапов и имеющая ограничение по третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода.

На рисунке 1 представлены зависимости соответственно следующих координат исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом: угловой скорости исполнительного органа механизма ω_2 , её первой $\omega_2^{(1)}$, второй $\omega_2^{(2)}$ и третьей $\omega_2^{(3)}$ производных от времени t . На рисунке 2 представлены зависимости: упругого момента M_y , его первой $M_y^{(1)}$ и второй $M_y^{(2)}$ производных от времени t . На рисунке 3 представлены зависимости: угловой скорости исполнительного органа двигателя ω_1 и её первой производной $\omega_1^{(1)}$ от времени t . На рисунке 4 представлена зависимость момента асинхронного двигателя M от времени t .

Определим аналитические зависимости координат электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом от времени.

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^2;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^3;$$

$$M_y(t) = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^2;$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t;$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^3 + \frac{J_2}{C_y} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t;$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^2 + \frac{J_2}{C_y} \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M(t) = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 0$

$$\omega_{20}^{(3)} = 0;$$

$$\omega_{20}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{20}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{20} = \omega_{\text{нач}};$$

$$M_{y0} = M_c;$$

$$M_{y0}^{(1)} = 0;$$

$$M_{y0}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{10} = \omega_{\text{нач}};$$

$$\omega_{10}^{(1)} = 0;$$

$$M_0 = M_c.$$

При $t = 0 +$

$$\omega_{20+}^{(3)} = \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$\omega_{20+}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{20+}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{20+} = \omega_{\text{нач}};$$

$$M_{y0+} = M_c;$$

$$M_{y0+}^{(1)} = 0;$$

$$M_{y0+}^{(2)} = J_2 \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$\omega_{10+} = \omega_{\text{нач}};$$

$$\omega_{10+}^{(1)} = \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$M_{0+} = M_c + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)}.$$

При $t = t_1$

$$\omega_{21}^{(3)} = \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$\omega_{21}^{(2)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{21}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{21} = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$M_{y1} = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_{y1}^{(1)} = J_2 \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$M_{y1}^{(2)} = J_2 \omega_{\max}^{(3)} ;$$

$$\omega_{11} = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{J_2}{C_y} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 ;$$

$$\omega_{11}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} ;$$

$$M_1 = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} .$$

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} ;$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1) ;$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^2 ;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^3 ;$$

$$M_y(t) = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^2 ;$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1) ;$$

$$M_y^{(2)}(t) = -J_2 \omega_{\max}^{(3)} ;$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1)^2 - \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^3 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1) ;$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^2 - \frac{J_2}{C_y} \omega_{\max}^{(3)} ;$$

$$M(t) = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) - \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1)^2 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} .$$

При $t = t_{1+}$

$$\omega_{21+}^{(3)} = -\omega_{\max}^{(3)} ;$$

$$\omega_{21+}^{(2)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 ;$$

$$\omega_{21+}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{21+} = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$M_{y1+} = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_{y1+}^{(1)} = J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$M_{y1+}^{(2)} = -J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{11+} = \omega_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{J_2}{C_y} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{11+}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_{1+} = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 2t_1$

$$\omega_{2*}^{(3)} = -\omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{2*}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{2*}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{2*} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$M_{y*} = M_c + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_{y*}^{(1)} = 0;$$

$$M_{y*}^{(2)} = -J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{1*} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$\omega_{1*}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_* = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 3t_1$

$$\omega_{22}^{(3)} = -\omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{22}^{(2)} = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{22}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{22} = \omega_{\text{нач}} + \frac{11}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$M_{y2} = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_{y2}^{(1)} = -J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$M_{y2}^{(2)} = -J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{12} = \omega_{\text{нач}} + \frac{11}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{J_2}{C_y} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{12}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_2 = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1);$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^2;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{нач}} + \frac{11}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^3;$$

$$M_y(t) = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1) + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^2;$$

$$M_y^{(1)}(t) = -J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1);$$

$$M_y^{(2)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{нач}} + \frac{11}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1) - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1)^2 + \\ + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^3 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1);$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^2 + \frac{J_2}{C_y} \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M(t) = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1) + \\ + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1)^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 3t_1+$

$$\omega_{22+}^{(3)} = \omega_{\max}^{(3)};$$

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

$$\omega_{22+}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{22+} = \omega_{\text{нач}} + \frac{11}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$M_{y2+} = M_c + \frac{1}{2} J_2 \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_{y2+}^{(1)} = -J_2 \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$M_{y2+}^{(2)} = J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{12+} = \omega_{\text{нач}} + \frac{11}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{12+}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_{2+} = M_c + \frac{1}{2} (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 4t_1$

$$\omega_{23}^{(3)} = \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{23}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{23}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{23} = \omega_{\text{нач}} + 2\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$M_{y3} = M_c;$$

$$M_{y3}^{(1)} = 0;$$

$$M_{y3}^{(2)} = J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{13} = \omega_{\text{нач}} + 2\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$\omega_{13}^{(1)} = \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_3 = M_c + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 4t_{1+}$

$$\omega_{23+}^{(3)} = 0;$$

$$\omega_{23+}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{23+}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{23+} = \omega_{\text{нач}} + 2\omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$M_{y3+} = M_c;$$

$$M_{y3+}^{(1)} = 0;$$

$$M_{y3+}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{13+} = \omega_{\text{нач}} + 2\omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^3;$$

$$\omega_{13+}^{(1)} = 0;$$

$$M_{3+} = M_c.$$

Так как $\omega_{23} = \omega_{\text{кон}}$, то

$$t_1 = \sqrt[3]{\frac{1}{2} \cdot \frac{\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}}.$$

Время цикла равно

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

Область существования оптимальной по быстродействию диаграммы для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода

$$(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) \leq \omega_{\text{гр.1}},$$

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

$\omega_{\text{доп}}^{(2)}$ – максимально допустимое значение второй производной угловой

скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$.

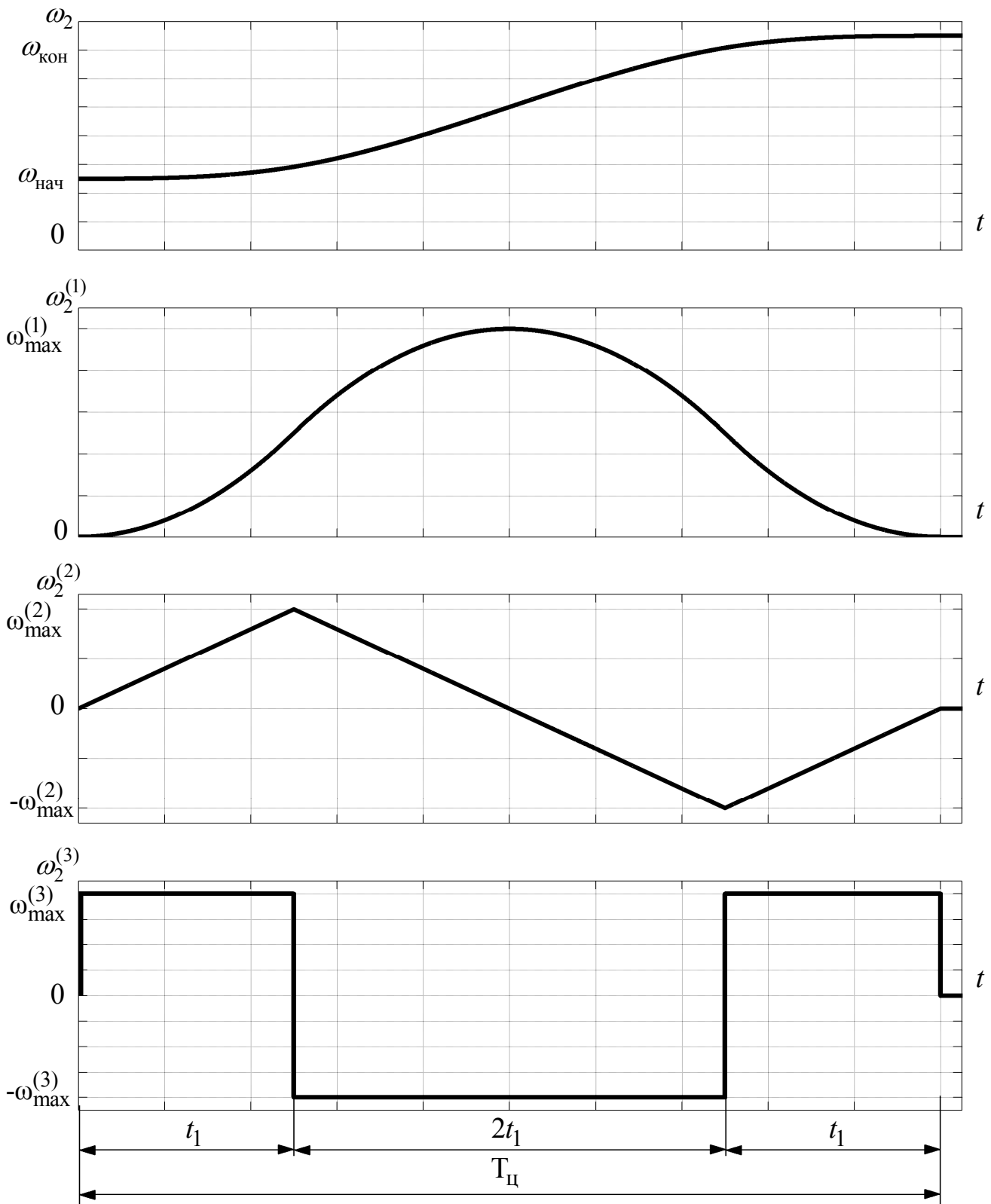


Рисунок 1

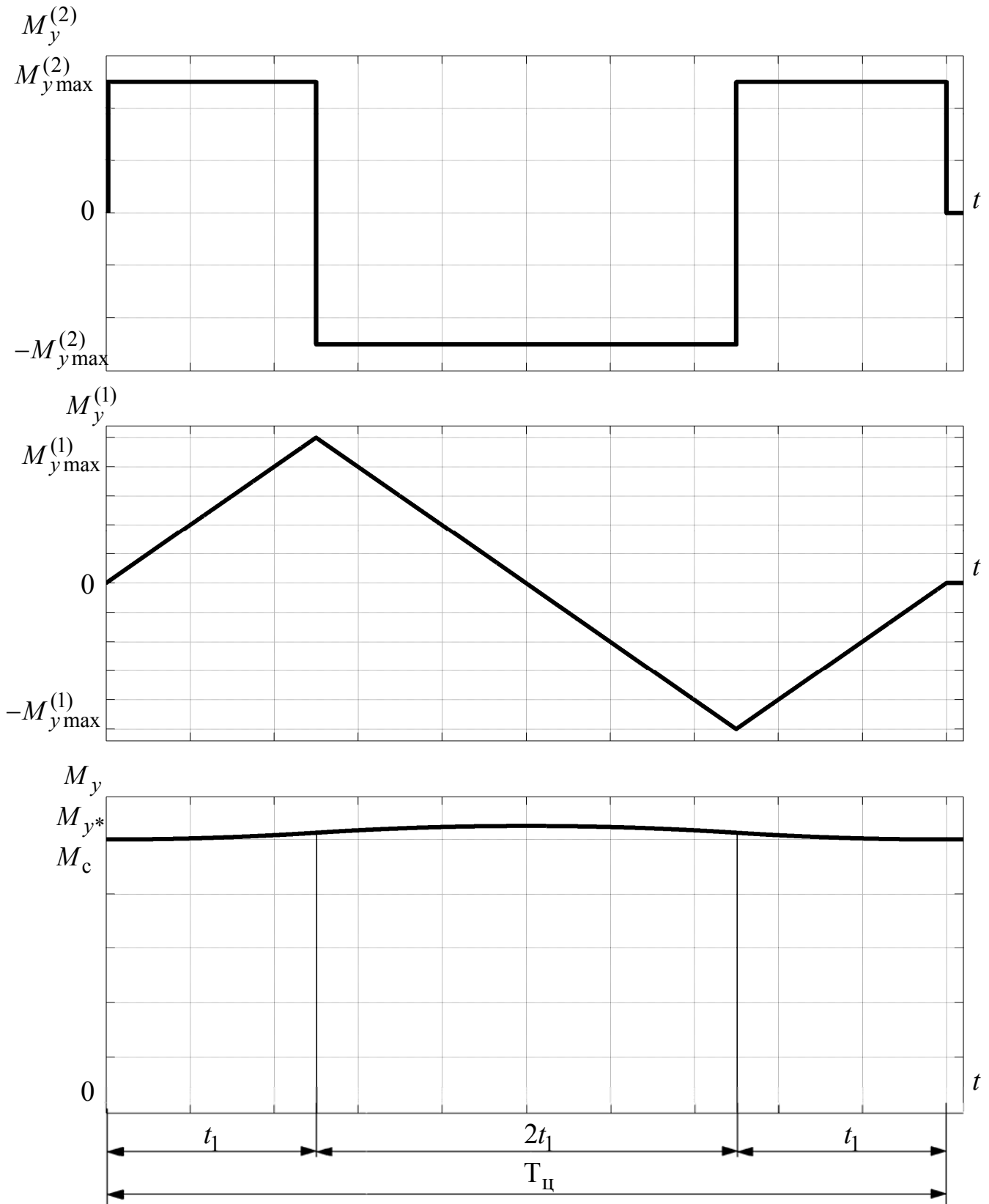


Рисунок 2

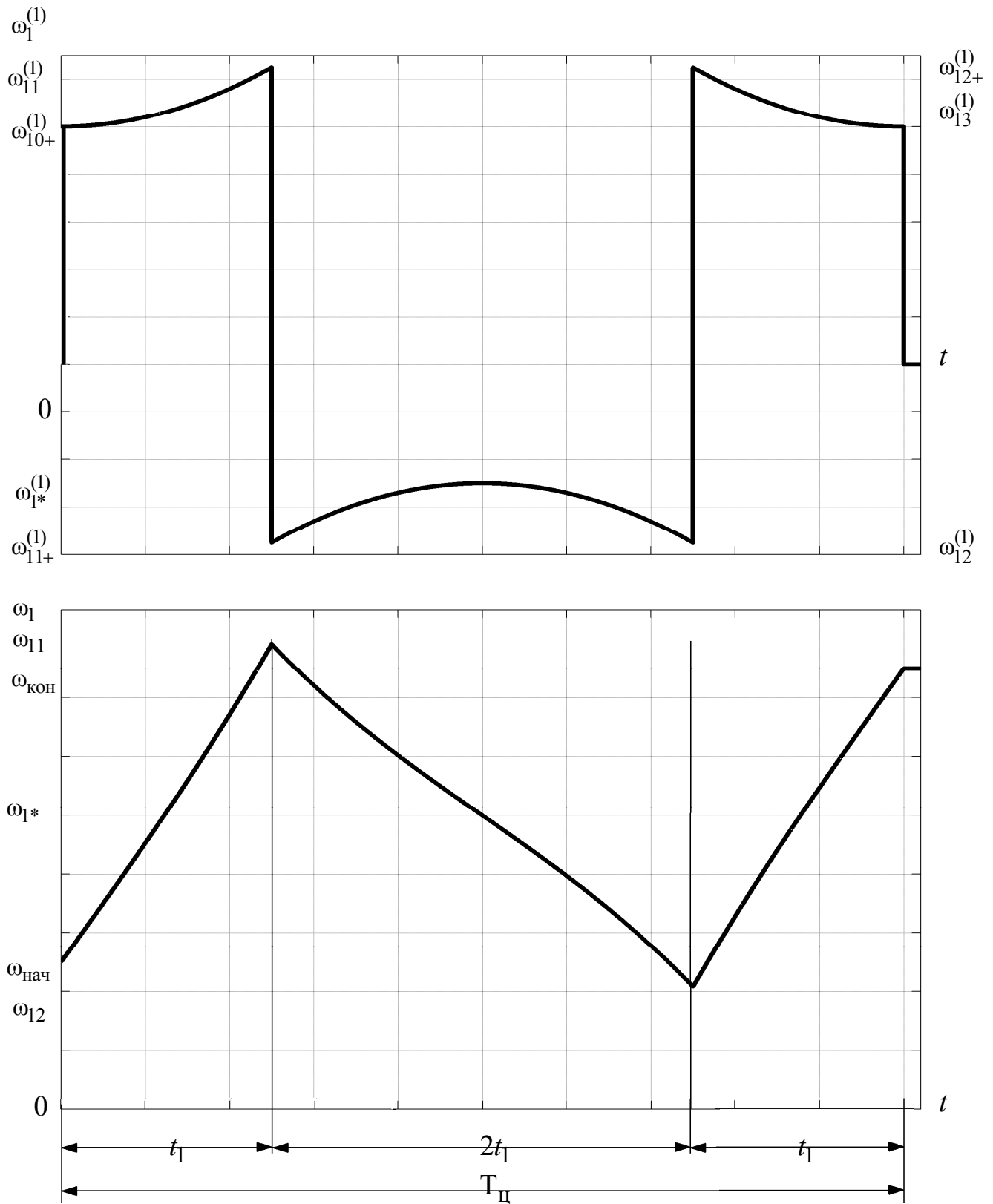


Рисунок 3

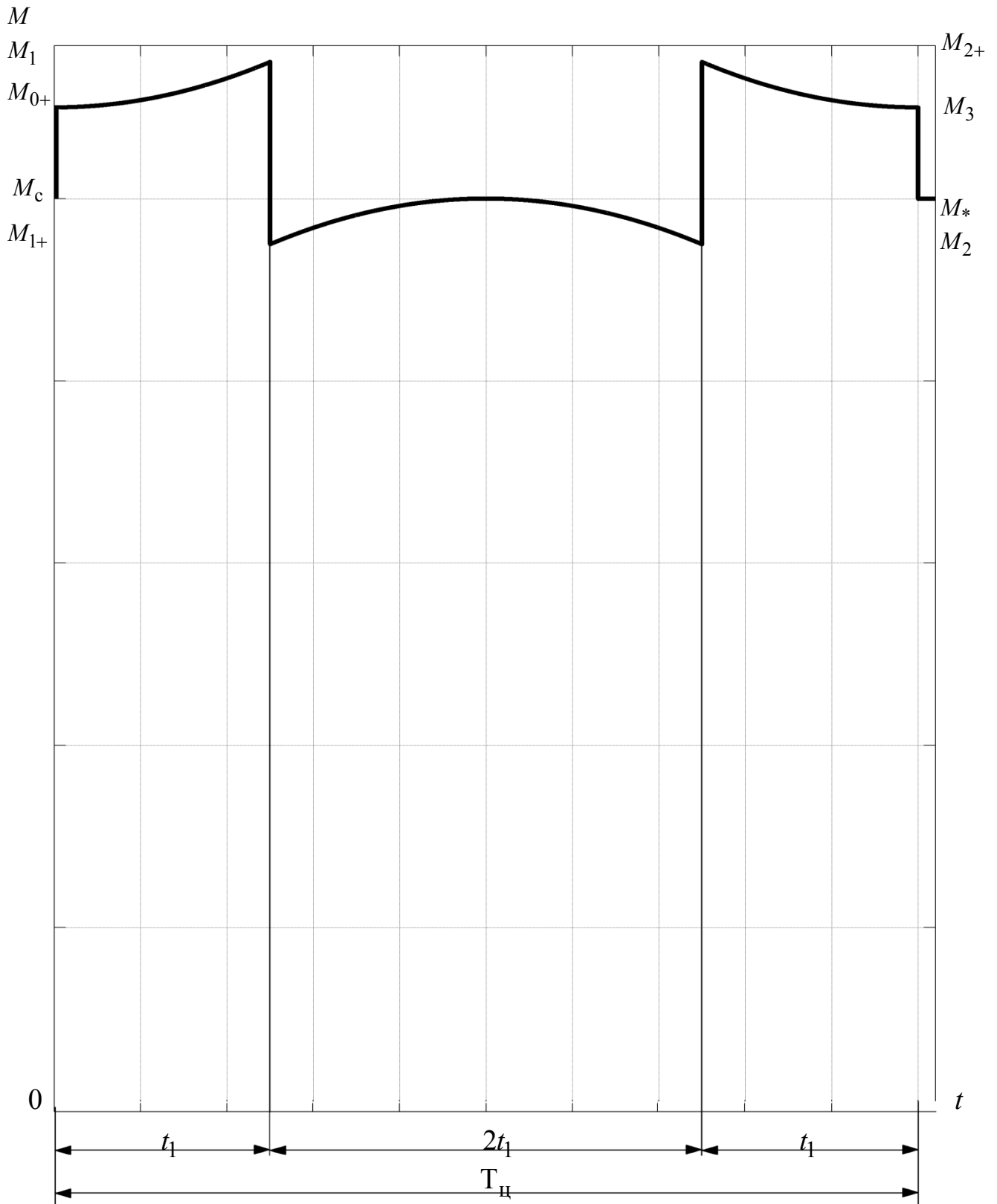


Рисунок 4

Рассмотрим электропривод имеющий следующие параметры: момент инерции исполнительного органа асинхронного двигателя $J_1 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; момент инерции исполнительного органа механизма $J_2 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; жесткость валопровода $C_y = 5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}$. Момент сопротивления электропривода $M_c = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Контролируемые величины электропривода имеют следующие допустимые значения: $\omega_{\text{доп}} = 160 \text{ рад/с}$; $\omega_{\text{доп}}^{(1)} = 80 \text{ рад/с}^2$; $\omega_{\text{доп}}^{(2)} = 200 \text{ рад/с}^3$.

В таблице 1 приведены результаты первой серии численного эксперимента для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом. При этом третья производная угловой скорости имела значение $\omega_{\text{max}}^{(3)} = 1000 \text{ рад/с}^4$. Задание на изменение угловой скорости изменялось от 0 до граничного значения, равного для данной диаграммы $\omega_{\text{гр.1}} = 16 \text{ рад/с}$.

Таблица 1 — Результаты первой серии численного эксперимента для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом.

$(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}})$, рад/с	t_1 , с	$T_{ц}$, с	$\omega_{\text{max}}^{(2)}$, рад/с ³	$\omega_{\text{max}}^{(1)}$, рад/с ²	M_{y*} , Н·м	M_1 , Н·м	M_* , Н·м
0	0	0	0	0	2,5	2,625	2,375
0,016	0,02	0,08	20	0,4	2,51	2,635	2,395
0,128	0,04	0,16	40	1,6	2,54	2,665	2,455
0,432	0,06	0,24	60	3,6	2,59	2,715	2,555
1,024	0,08	0,32	80	6,4	2,66	2,785	2,695
2	0,1	0,4	100	10	2,75	2,875	2,875
3,456	0,12	0,48	120	14,4	2,86	2,985	3,095
5,488	0,14	0,56	140	19,6	2,99	3,115	3,355
8,192	0,16	0,64	160	25,6	3,14	3,265	3,655
11,664	0,18	0,72	180	32,4	3,31	3,435	3,995
16	0,2	0,8	200	40	3,5	3,625	4,375

В таблице 2 приведены результаты второй серии численного эксперимента для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом. При этом

третья производная угловой скорости имела значение $\omega_{\max}^{(3)} = 2000 \text{ рад/с}^4$.
 Задание на изменение скорости изменялось от 0 до граничного значения, равного для данной диаграммы $\omega_{\text{гр.1}} = 4 \text{ рад/с}$.

Таблица 2 — Результаты второй серии численного эксперимента для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом.

$(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}})$ рад/с	$t_1, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\omega_{\max}^{(2)},$ рад/с ³	$\omega_{\max}^{(1)},$ рад/с ²	$M_{y*},$ Н·м	$M_1,$ Н·м	$M^*,$ Н·м
0	0	0	0	0	2,5	2,75	2,25
0,004	0,01	0,04	20	0,2	2,505	2,755	2,26
0,032	0,02	0,08	40	0,8	2,52	2,77	2,29
0,108	0,03	0,12	60	1,8	2,545	2,795	2,34
0,256	0,04	0,16	80	3,2	2,58	2,83	2,41
0,5	0,05	0,2	100	5	2,625	2,875	2,5
0,864	0,06	0,24	120	7,2	2,68	2,93	2,61
1,372	0,07	0,28	140	9,8	2,745	2,995	2,74
2,048	0,08	0,32	160	12,8	2,82	3,07	2,89
2,916	0,09	0,36	180	16,2	2,905	3,155	3,06
4	0,1	0,4	200	20	3	3,25	3,25

В таблице 3 приведены результаты третьей серии численного эксперимента для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом. При этом третья производная угловой скорости имела значение $\omega_{\max}^{(3)} = 4000 \text{ рад/с}^4$.
 Задание на изменение угловой скорости изменялось от 0 до граничного значения, равного для данной диаграммы $\omega_{\text{гр.1}} = 1 \text{ рад/с}$.

Таблица 3 —Результаты третьей серии численного эксперимента для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом.

$(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}),$ рад/с	$t_1, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\omega_{\text{max}}^{(2)},$ рад/с ³	$\omega_{\text{max}}^{(1)},$ рад/с ²	$M_{y*},$ Н·м	$M_1,$ Н·м	$M*,$ Н·м
0	0	0	0	0	2,5	3	2
0,001	0,005	0,02	20	0,1	2,5025	3,0025	2,005
0,008	0,01	0,04	40	0,4	2,51	3,01	2,02
0,027	0,015	0,06	60	0,9	2,5225	3,0225	2,045
0,064	0,02	0,08	80	1,6	2,54	3,04	2,08
0,125	0,025	0,1	100	2,5	2,5625	3,0625	2,125
0,216	0,03	0,12	120	3,6	2,59	3,09	2,18
0,343	0,035	0,14	140	4,9	2,6225	3,1225	2,245
0,512	0,04	0,16	160	6,4	2,66	3,16	2,32
0,729	0,045	0,18	180	8,1	2,7025	3,2025	2,405
1	0,05	0,2	200	10	2,75	3,25	2,5

Представленная на рисунках 1÷4 оптимальная по быстродействию диаграмма для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом имеет следующие параметры: $(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) = 0,5 \text{ рад} / \text{с}; \omega_{\text{max}}^{(3)} = 2000 \text{ рад} / \text{с}^4,$
 $t_1 = 0,05 \text{ с}, T_{\text{ц}} = 0,2 \text{ с}, \omega_{\text{max}}^{(2)} = 100 \text{ рад} / \text{с}^3, \omega_{\text{max}}^{(1)} = 5 \text{ рад} / \text{с}^2, M_{y*} = 2,625 \text{ Н} \cdot \text{м},$
 $M_1 = 2,875 \text{ Н} \cdot \text{м}, M* = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$

ВЫВОДЫ

Электропривод с асинхронным двигателем и упругим валопроводом описывается системой дифференциальных уравнений третьего порядка, поэтому при разработке диаграммы изменения угловой скорости его исполнительного органа формировалась третья производная угловой скорости. В соответствии с теоремой об N интервалах Фельдбаума А.А. диаграмма состоит из трех этапов.

Реализация предлагаемой диаграммы для малых изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и

упругим валопроводом позволит уменьшить время изменения угловой скорости исполнительного органа и ограничить динамические нагрузки в валопроводе.

*DEVELOPMENT OF OPTIMUM SPEED DIAGRAMS FOR SMALL CHANGES
THE ANGULAR VELOCITY OF ACTUATING DEVICE OF AC ELECTRIC DRIVE
WITH ELASTIC SHAFTING*

YU.P. DOBROBABA, M.V. PETELINA

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

In this article described optimum speed diagrams for small changes the angular velocity of actuating device of ac electric drive with elastic shafting. For this diagram are defined dependence analytical for calculation its parameters and the existence region.

Keywords: optimum speed of diagrams, electric drive actuator, small changes speed.