

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММЫ ДЛЯ СРЕДНИХ 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 разрабатывается оптимальная по быстродействию диаграмма для средних изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом. Для данной диаграммы получены аналитические зависимости для расчета ее параметров и область существования.

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

Электропривод с асинхронным двигателем и упругим валопроводом при регулировании угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом описывается системой дифференциальных уравнений третьего порядка, поэтому при разработке диаграмм изменения его угловой скорости необходимо формировать третью производную угловой скорости.

В данной работе предлагается диаграмма для средних изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом, состоящая из пяти этапов.

На рисунках 1÷4 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма для средних изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом, состоящая из пяти 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 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 ее первой производной $\omega_1^{(1)}$ от времени t . На рисунке 4 представлена зависимость момента асинхронного двигателя M от времени t .

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 $t = t_1$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\omega_2^{(3)}(t) = 0;$$

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

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

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

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

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

$$M_y^{(2)}(t) = 0;$$

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

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

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

При $t = t_{1+}$

$$\omega_{21+}^{(3)} = 0;$$

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

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

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

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

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

$$M_{y1+}^{(2)} = 0;$$

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

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

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

При $t = t_1 + t_2$

$$\omega_{22}^{(3)} = 0;$$

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

$$\omega_{22}^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

$$\omega_{22} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right);$$

$$M_{y2} = M_c + J_2 \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

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

$$M_{y2}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{12} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{12}^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

$$M_2 = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right).$$

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

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

$$\omega_2^{(2)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 - \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 (t - t_1 - t_2) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2;$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) +$$

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

$$M_y(t) = M_c + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) -$$

$$- \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2;$$

$$M_y^{(1)}(t) = J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

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

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) \cdot (t - t_1 - t_2) +$$

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

$$+ \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) -$$

$$- \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M(t) = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) -$$

$$- \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = (t_1 + t_2)_+$

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

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

$$\omega_{22+}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

$$\omega_{22+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right);$$

$$M_{y2+} = M_c + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

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

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

$$\omega_{12+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{12+}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_{2+} = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 2t_1 + t_2$

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

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

$$\omega_{2*}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2);$$

$$\omega_{2*} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right);$$

$$M_{y*} = M_c + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2);$$

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

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

$$\omega_{1*} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(t_1^3 + \frac{3}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right);$$

$$\omega_{1*}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_* = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t_1^2 + t_1 t_2) - \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = 3t_1 + t_2$

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

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

$$\omega_{23}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

$$\omega_{23} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right);$$

$$M_{y3} = M_c + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

$$M_{y3}^{(1)} = -J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

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

$$\omega_{13} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{13}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M_3 = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) - \frac{J_1J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

Этап 4. В интервале времени $(3t_1 + t_2) \leq t \leq (3t_1 + 2t_2)$:

$$\omega_2^{(3)}(t) = 0;$$

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

$$\omega_2^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2);$$

$$\omega_2(t) = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2\right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2;$$

$$M_y(t) = M_c + J_2\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) - J_2\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2);$$

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

$$M_y^{(2)}(t) = 0;$$

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2\right) + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) \cdot (t - 3t_1 - t_2) - \frac{1}{2}\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2)^2 - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2);$$

$$M(t) = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right) - (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - t_2).$$

При $t = (3t_1 + t_2)_+$

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

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

$$\omega_{23+}^{(1)} = \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right);$$

$$\omega_{23+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6}t_1^3 + \frac{5}{2}t_1^2t_2 + \frac{1}{2}t_1t_2^2\right);$$

$$M_{y3+} = M_c + J_2\omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2}t_1^2 + t_1t_2\right);$$

$$M_{y3+}^{(1)} = -J_2\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

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

$$\omega_{13+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + \frac{5}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{13+}^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right);$$

$$M_{3+} = M_c + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right).$$

При $t = 3t_1 + 2t_2$

$$\omega_{24}^{(3)} = 0;$$

$$\omega_{24}^{(2)} = -\omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{24}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{24} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right);$$

$$M_{y4} = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_{y4}^{(1)} = -J_2 \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$M_{y4}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{14} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{14}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_4 = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2.$$

Этап 5. В интервале времени $(3t_1 + 2t_2) \leq t \leq (4t_1 + 2t_2)$:

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

$$\omega_2^{(2)}(t) = -\omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2);$$

$$\omega_2^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2;$$

$$\begin{aligned} \omega_2(t) = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3; \end{aligned}$$

$$M_y(t) = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \\ + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2;$$

$$M_y^{(1)}(t) = -J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2);$$

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

$$\omega_1(t) = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) - \\ - \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^3 - \\ - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2);$$

$$\omega_1^{(1)}(t) = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)};$$

$$M(t) = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2 - (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 \cdot (t - 3t_1 - 2t_2) + \\ + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(3)} \cdot (t - 3t_1 - 2t_2)^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\max}^{(3)}.$$

При $t = (3t_1 + t_2)_+$

$$\omega_{24+}^{(3)} = \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{24+}^{(2)} = -\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{24+}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$\omega_{24+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right);$$

$$M_{y4+} = M_c + \frac{1}{2} J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1^2;$$

$$M_{y4+}^{(1)} = -J_2 \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$M_{y4+}^{(2)} = J_2 \omega_{\max}^{(3)};$$

$$\omega_{14+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot \left(\frac{11}{6} t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2 \right) - \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{14+}^{(1)} = \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$M_{4+} = M_c + \frac{1}{2} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1^2 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)}.$$

При $t = 4t_1 + 2t_2$

$$\omega_{25}^{(3)} = \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$\omega_{25}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{25}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{25} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2);$$

$$M_{y5} = M_c;$$

$$M_{y5}^{(1)} = 0;$$

$$M_{y5}^{(2)} = J_2 \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$\omega_{15} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2);$$

$$\omega_{15}^{(1)} = \frac{J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)};$$

$$M_5 = M_c + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max}}^{(3)}.$$

При $t = (4t_1 + 2t_2)_+$

$$\omega_{25+}^{(3)} = 0;$$

$$\omega_{25+}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{25+}^{(1)} = 0;$$

$$\omega_{25+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2);$$

$$M_{y5+} = M_c;$$

$$M_{y5+}^{(1)} = 0;$$

$$M_{y5+}^{(2)} = 0;$$

$$\omega_{15+} = \omega_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot (2t_1^3 + 3t_1^2 t_2 + t_1 t_2^2);$$

$$\omega_{5+} = 0;$$

$$M_{5+} = M_c.$$

Так как $\omega_{21}^{(2)} = \omega_{\text{доп}}^{(2)}$, то

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}.$$

Так как $\omega_{25} = \omega_{\text{кон}}$, то

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

Время цикла равно

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

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

$$\omega_{\text{гр.1}} \leq (\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) \leq \omega_{\text{гр.2}},$$

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

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

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 средних изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом.

При этом третья производная угловой скорости имела значение $\omega_{\max}^{(3)} = 1000 \text{ рад/с}^4$. Задание на изменение угловой скорости изменялось от $\omega_{\text{гр.1}} = 16 \text{ рад/с}$ до $\omega_{\text{гр.2}} = 48 \text{ рад/с}$.

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

$(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}})$, рад/с	t_1 , с	t_2 , с	$T_{\text{ц}}$, с	$\omega_{\max}^{(1)}$, рад/с ²	M_{y^*} , Н·м	M_2 , Н·м	M_{*1} , Н·м
16	0,2	0	0,8	40	3,5	3,5	4,375
22,5		0,05	0,9	50	3,75	4	4,875
30		0,1	1	60	4	4,5	5,375
38,5		0,15	1,1	70	4,25	5	5,875
48		0,2	1,2	80	4,5	5,5	6,375

В таблице 2 приведены результаты второй серии численного эксперимента для средних 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 угловой скорости изменялось от $\omega_{\text{гр.1}} = 4 \text{ рад/с}$ до $\omega_{\text{гр.2}} = 40 \text{ рад/с}$.

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

$(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}})$, рад/с	t_1 , с	t_2 , с	$T_{\text{ц}}$, с	$\omega_{\max}^{(1)}$, рад/с ²	M_{y^*} , Н·м	M_2 , Н·м	M_{*1} , Н·м
4	0,1	0	0,4	20	3	3	3,25
7,5		0,05	0,5	30	3,25	3,5	3,75
12		0,1	0,6	40	3,5	4	4,25
17,5		0,15	0,7	50	3,75	4,5	4,75
24		0,2	0,8	60	4	5	5,25
31,5		0,25	0,9	70	4,25	5,5	5,75
40		0,3	1	80	4,5	6	6,25

В таблице 3 приведены результаты третьей серии численного эксперимента для средних 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 $\omega_{\text{гр.1}} = 1 \text{ рад/с}$ до $\omega_{\text{гр.2}} = 36 \text{ рад/с}$.

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

$(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}),$ рад/с	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\omega_{\max}^{(1)},$ рад/с ²	$M_{y*},$ Н·м	$M_2,$ Н·м	$M_{*1},$ Н·м
1	0,05	0	0,2	10	2,75	2,75	2,5
3		0,05	0,3	20	3	3,25	3
6		0,1	0,4	30	3,25	3,75	3,5
10		0,15	0,5	40	3,5	4,25	4
15		0,2	0,6	50	3,75	4,75	4,5
21		0,25	0,7	60	4	5,25	5
28		0,3	0,8	70	4,25	5,75	5,5
36			0,35	0,9	80	4,5	6,25

Представленная на рисунках 1÷4 оптимальная по быстрдействию диаграмма для средних изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом имеет следующие параметры: $(\omega_{\text{кон}} - \omega_{\text{нач}}) = 24 \text{ рад/с}$; $\omega_{\max}^{(3)} = 2000 \text{ рад/с}^4$; $t_1 = 0,1 \text{ с}$; $t_2 = 0,2 \text{ с}$; $T_{\text{ц}} = 0,8 \text{ с}$; $\omega_{\max}^{(1)} = 60 \text{ рад/с}^2$; $M_{y*} = 4 \text{ Н·м}$; $M_2 = 5 \text{ Н·м}$; $M_* = 5,25 \text{ Н·м}$.

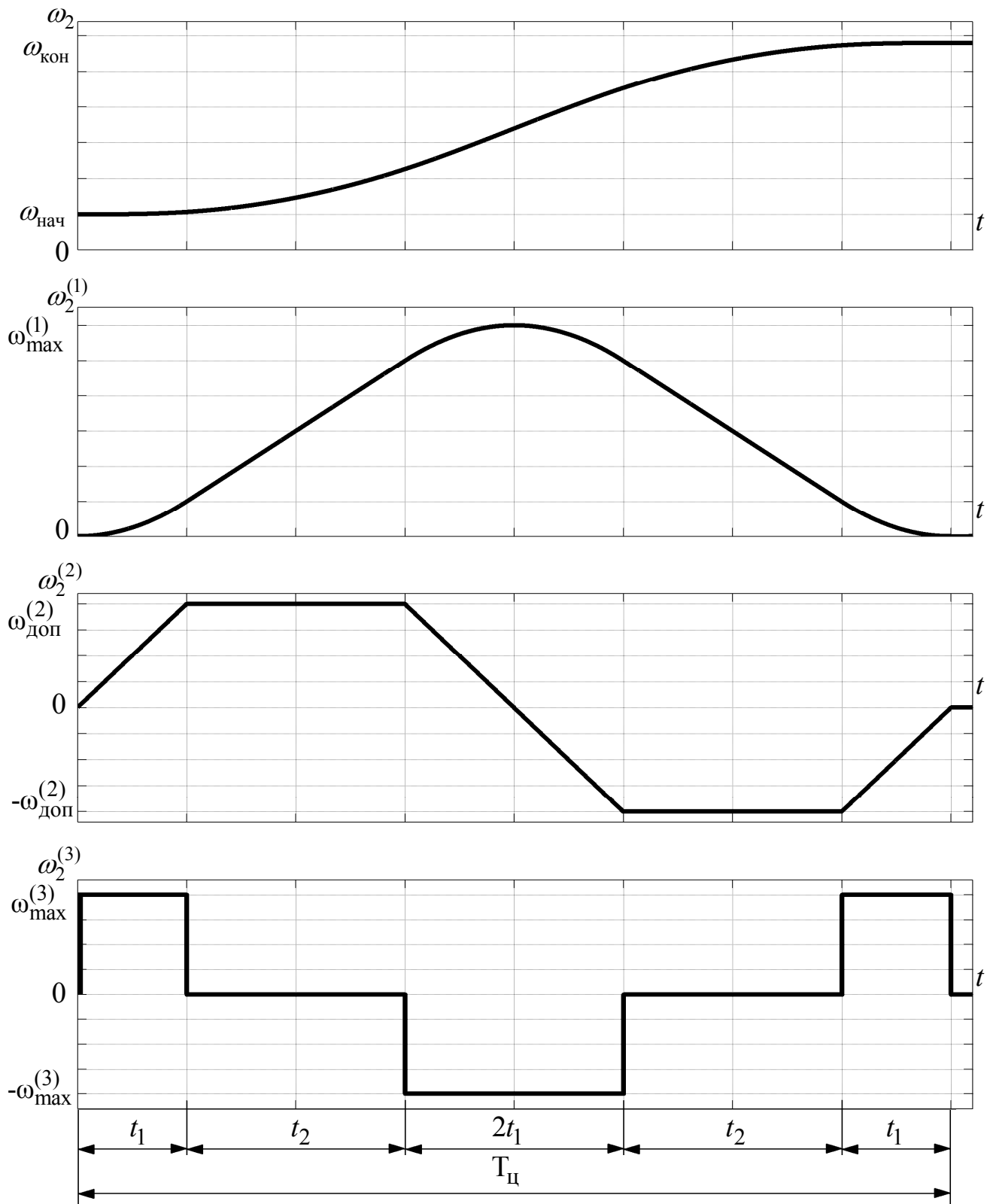


Рисунок 1

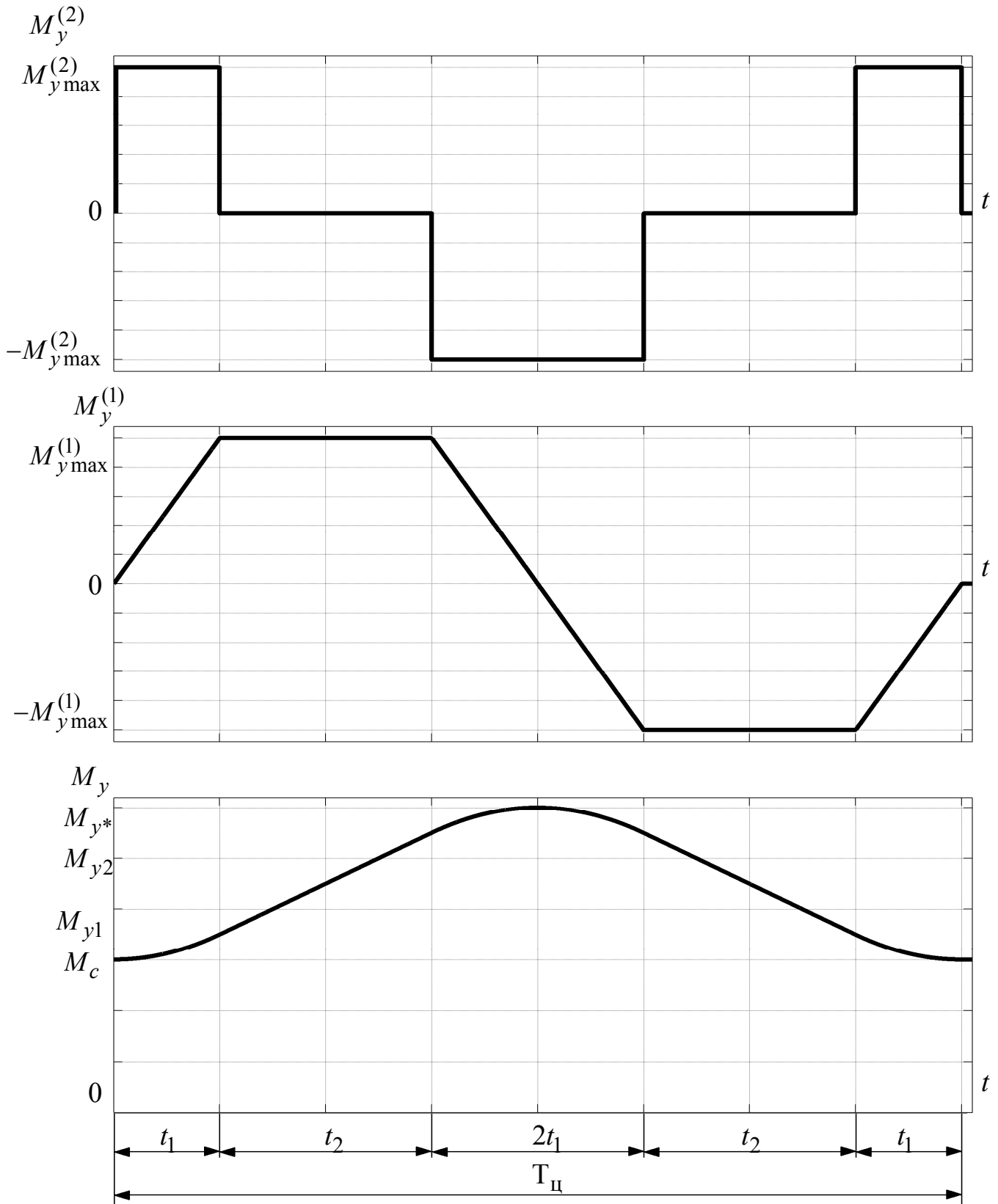


Рисунок 2

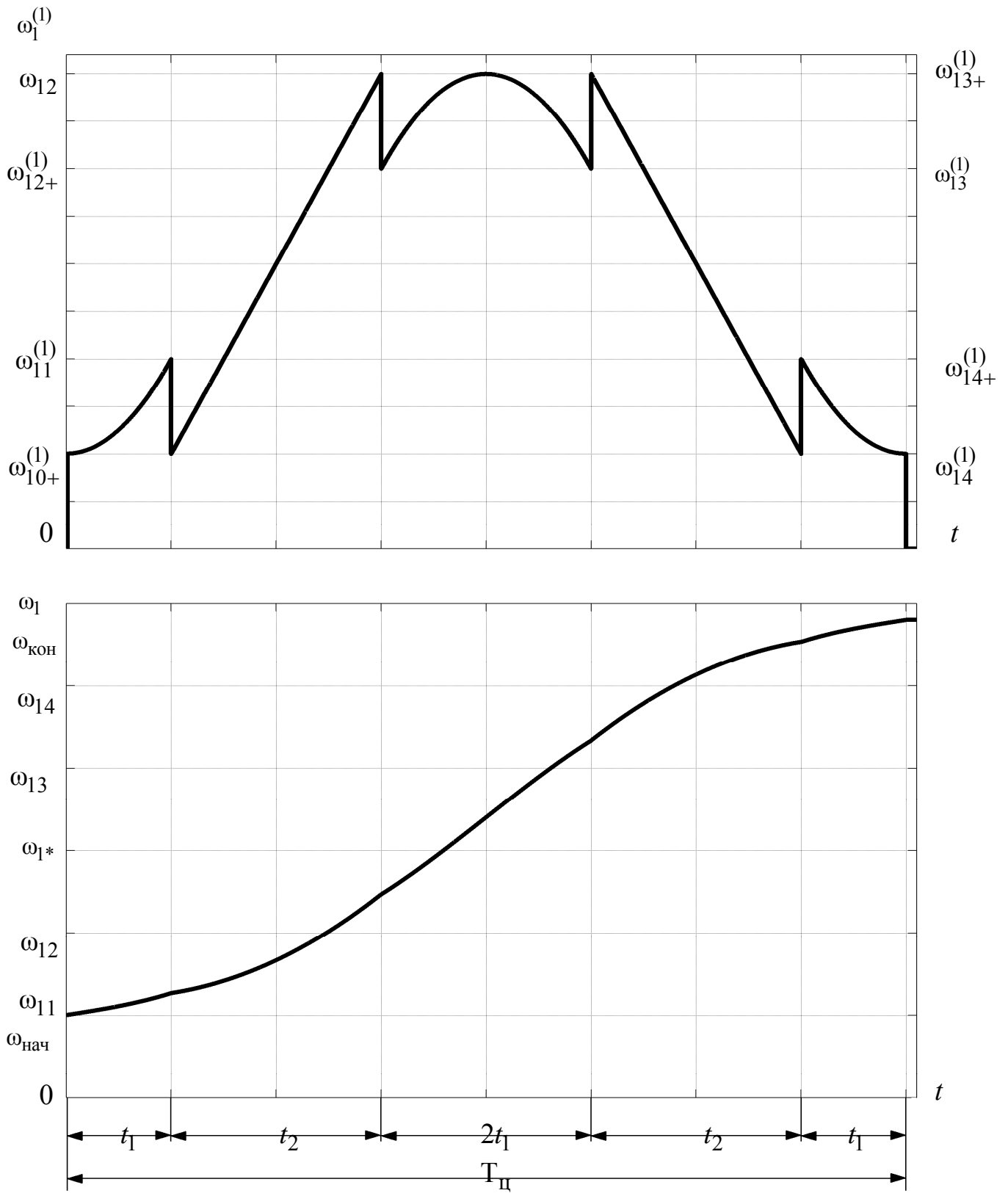


Рисунок 3

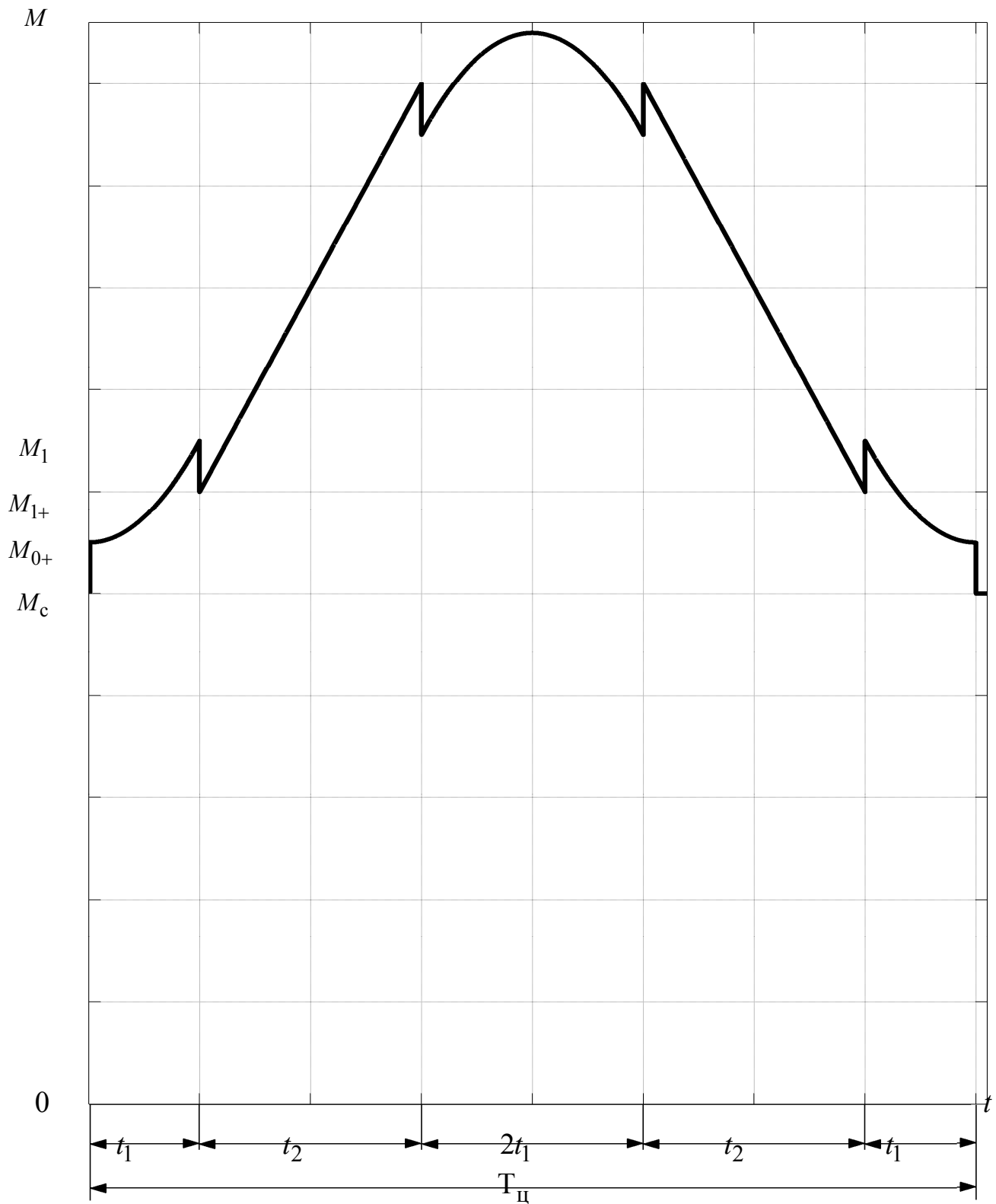


Рисунок 4

ВЫВОДЫ

В соответствии с теоремой об N интервалах Фельдбаума А.А. оптимальная по быстродействию диаграмма изменения координат системы,

описываемая системой дифференциальных уравнений третьего порядка, должна состоять минимум из трех этапов. Предлагаемая оптимальная по быстродействию диаграмма для средних изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом состоит из пяти этапов. Наличие двух дополнительных этапов обусловлены необходимостью ограничений второй производной угловой скорости исполнительного органа механизма.

Использование разработанной диаграммы для средних изменений угловой скорости исполнительного органа электропривода с асинхронным двигателем и упругим валопроводом не только уменьшит время изменения угловой скорости исполнительного органа механизма, но и ограничит динамические нагрузки в валопроводе.

*DEVELOPMENT OF OPTIMUM SPEED DIAGRAMS FOR MEDIUM 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 optimum speed diagrams for medium 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, medium changes speed.