

УДК 62

**БЛИЗКАЯ К ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ ПО НАПРЯЖЕНИЮ
И МАКСИМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕНИЮ ТОКА**



**THE DIAGRAM IS CLOSE TO THE OPTIMUM IN TERMS OF SPEED
ACTUATOR ACTUATOR MOVEMENT DIAGRAM
AT VOLTAGE LIMITS
AND MAXIMUM CURRENT VALUE**

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный
технологический университет

Мурлина Владислава Анатольевна

кандидат технических наук,
доцент кафедры информационных систем
и программирования,
Кубанский государственный
технологический университет

Чернуха Максим Валерьевич

студент,
Кубанский государственный
технологический университет

Аннотация. Разработана близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению и максимальному значению тока. Диаграмма состоит из четырех этапов, определена область существования диаграммы.

Ключевые слова: близкая к оптимальной, с ограничением по напряжению, с ограничением по максимальному значению тока, четырёх этапная диаграмма.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of Department
of Power Supply Industrial Enterprises,
Kuban State Technological University

Zarudny Vladimir Yurievich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor of Department
of Information Systems and Programming,
Kuban State Technological University

Chernukha Maksim Valerevich

Student,
Kuban State Technological University

Annotation. A diagram of the movement of the actuator's actuator, close to optimal in speed, was developed with a limitation on voltage and maximum current value. The diagram consists of four stages, the area of existence of the diagram is determined.

Keywords: close to optimal, with voltage limitation, with maximum current limitation, four-stage diagram.

В монографии [1] приведена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока, состоящая из четырёх этапов. В зависимости от расклада корней характеристического уравнения системы возможны три вида переходных процессов. Это обуславливает необходимость разработки трёх алгоритмов управления перемещением исполнительного органа электропривода.

Чтобы устранить указанный недостаток в данной работе предлагается близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока.

На рисунке 1 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока (механические контролируемые координаты).

На рисунке 2 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока (электрические контролируемые координаты).

На рисунках приняты обозначения:

φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;

ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

$\omega^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;

$\omega^{(2)}$ – вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$;

U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;

$I_{\text{я}}^{(1)}$ – первая производная тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{\text{А}}{\text{с}}$;

$M_{\text{со}}$ – момент сопротивления электропривода, Н·м;

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

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

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

$\omega_{\text{max}}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на втором этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;

$\omega_{\text{min}}^{(1)}$ – минимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на третьем этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;

$\omega_{\text{max}}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на первом этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$;

$\omega_{\text{min}}^{(2)}$ – минимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на третьем этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$;

$\omega_{\text{max}^*}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на четвёртом этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$;

$U_{\text{доп}}$ – допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, В.

$I_{\text{доп}}$ – допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А;

$I_{\text{max}}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной тока якорной цепи электродвигателя на первом этапе, А;

$I_{\text{min}}^{(1)}$ – минимальное значение первой производной тока якорной цепи электродвигателя на третьем этапе, А;

$I_{\text{max}^*}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной тока якорной цепи электродвигателя на четвёртом этапе, А;

t – время, с;

t_1 – длительность первого этапа, с;

t_2 – длительность второго этапа, с;

t_3 – длительность третьего этапа, с;

t_4 – длительность четвёртого этапа, с;

$C_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с.

Определим аналитические зависимости контролируемых координат электропривода от времени при его близком к оптимальному по быстродействию движении при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока.

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

$$\Omega^{(2)}(t) = \omega_{\max}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t;$$

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

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)};$$

$$U(t) = \frac{1}{2} C_{\text{е}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t^2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)},$$

где J – момент инерции исполнительного органа электропривода, кг·м²;
 $C_{\text{е}}$ – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи электродвигателя, Ом;

$L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн.

При $t = 0_+$

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

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

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

$$\varphi_{0+} = \varphi_{\text{нач}};$$

$$I_{\text{я}0+} = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{с0}};$$

$$I_{\text{я}0+}^{(1)} = \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)};$$

$$U_{0+} = \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot M_{\text{с0}} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)}.$$

При $t = t_1$

$$\omega_1^{(2)} = \omega_{\max}^{(2)};$$

$$\omega_1^{(1)} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1;$$

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

$$\varphi_1 = \varphi_{\text{нач}} + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^3;$$

$$I_{\text{я}1} = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1];$$

$$I_{\text{я}}^{(1)} = \frac{J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)};$$

$$U_1 = \frac{1}{2} C_{\text{е}} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\max}^{(2)}.$$

Так как $I_{\text{я}1} = I_{\text{доп}}$, то

$$I_{\text{доп}} = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot [M_{\text{с0}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1];$$

$$\omega_{\max}^{(2)} = \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{с0}}}{J \cdot t_1}.$$

Так как $U_1 = U_{\text{доп}}$, то

$$\begin{aligned}
 U_{\text{доп}} &= \frac{1}{2} C_e \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{м}}} \cdot \left[M_{\text{сo}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 \right] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{м}}} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)}; \\
 \frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{сo}}}{C_e C_{\text{м}}} &= \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J \cdot t_1} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_{\text{м}}} \cdot t_1 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_{\text{м}}} \right); \\
 t_1^2 + 2 \cdot \left[\frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_{\text{м}}} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{сo}}}{C_e C_{\text{м}}} \right) \cdot \frac{J}{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}} \right] \cdot t_1 + 2 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_{\text{м}}} &= 0. \\
 t_1 &= \left[\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{сo}}}{C_e C_{\text{м}}} \right) \cdot \frac{J}{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}} - \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_{\text{м}}} \right] - \\
 &\quad - \sqrt{\left[\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{сo}}}{C_e C_{\text{м}}} \right) \cdot \frac{J}{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}} - \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_{\text{м}}} \right]^2 - 2 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_{\text{м}}}}.
 \end{aligned}$$

Таким образом, определяются два параметра близкой к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока: длительность первого этапа и максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на первом этапе.

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

$$\begin{aligned}
 \omega^{(2)}(t) &= 0; \\
 \omega^{(1)}(t) &= \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 = \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J}; \\
 \omega(t) &= \omega_1 + \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J} \cdot (t - t_1); \\
 \varphi(t) &= \varphi_1 + \omega_1 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J} \cdot (t - t_1)^2; \\
 I_{\text{я}}(t) &= I_{\text{доп}}; \\
 I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= 0; \\
 U(t) &= C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J} \cdot (t - t_1) \right] + R_{\text{я}} I_{\text{доп}}.
 \end{aligned}$$

При $t = t_{1+}$

$$\begin{aligned}
 \omega_{1+}^{(2)} &= 0; \\
 \omega_{1+}^{(1)} &= \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J}; \\
 \omega_{1+} &= \omega_1; \\
 \varphi_{1+} &= \varphi_1; \\
 I_{\text{я}1+} &= I_{\text{доп}}; \\
 I_{\text{я}1+}^{(1)} &= 0; \\
 U_{1+} &= C_e \omega_1 + R_{\text{я}} I_{\text{доп}}.
 \end{aligned}$$

При $t = (t_1 + t_2)$

$$\begin{aligned}
 \omega_2^{(2)} &= 0; \\
 \omega_2^{(1)} &= \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J}; \\
 \omega_2 &= \omega_1 + \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J} \cdot t_2; \\
 \varphi_2 &= \varphi_1 + \omega_1 \cdot t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{сo}}}{J} \cdot t_2^2; \\
 I_{\text{я}2} &= I_{\text{доп}};
 \end{aligned}$$

$$I_{я2}^{(1)} = 0;$$

$$U_2 = C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2 \right] + R_{я} I_{доп}.$$

Этап 3. В интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3)$:

$$\omega^{(2)}(t) = \omega_{\min}^{(2)};$$

$$\omega^{(1)}(t) = \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} + \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

$$\omega(t) = \omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot (t - t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2;$$

$$\begin{aligned} \varphi(t) &= \varphi_1 + \omega_1 \cdot t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2^2 + \\ &+ \omega_1 \cdot (t - t_1 - t_2) + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2 \cdot (t - t_1 - t_2) + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^3; \end{aligned}$$

$$I_{я}(t) = I_{доп} + \frac{J}{C_M} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

$$I_{я}^{(1)}(t) = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)};$$

$$\begin{aligned} U(t) &= C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot (t - t_1 - t_2) + \right. \\ &\left. + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 \right] + R_{я} I_{доп} + \frac{R_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2) + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)}. \end{aligned}$$

При $t = (t_1 + t_2)_+$

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

$$\omega_{2+}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J};$$

$$\omega_{2+} = \omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2;$$

$$\varphi_{2+} = \varphi_1 + \omega_1 \cdot t_2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2^2;$$

$$I_{я2+} = I_{доп};$$

$$I_{я2+}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)};$$

$$U_{2+} = C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot t_2 \right] + R_{я} I_{доп} + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)}.$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3)$

$$\omega_3^{(2)} = \omega_{\min}^{(2)};$$

$$\omega_3^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3;$$

$$\omega_3 = \omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2;$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 + \omega_1 \cdot (t_2 + t_3) + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_3^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^3;$$

$$I_{я3} = I_{доп} + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3;$$

$$I_{я3}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)};$$

$$\begin{aligned} U_3 &= C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{доп} - M_{co}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2 \right] + \\ &+ R_{я} I_{доп} + \frac{R_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)}. \end{aligned}$$

Этап 4. В интервале времени $(t_1 + t_2 + t_3) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$:

$$\begin{aligned}\omega^{(2)}(t) &= \omega_{\max}^{(2)}; \\ \omega^{(1)}(t) &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3); \\ \omega(t) &= \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2 + \\ &+ \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3)^2; \\ \varphi(t) &= \varphi_1 + \omega_1 \cdot (t_2 + t_3) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_3^2 \right) + \\ &+ \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^3 + \omega_1 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3)^2 + \\ &+ \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3)^2 + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3)^3; \\ I_{\text{я}}(t) &= I_{\text{доп}} + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3); \\ I_{\text{я}}^{(1)}(t) &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}; \\ U(t) &= C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2 + \right. \\ &+ \left. \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3)^2 \right] + R_{\text{я}} I_{\text{доп}} + \frac{R_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \\ &+ \frac{R_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2 - t_3) + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}.\end{aligned}$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3)_+$

$$\begin{aligned}\omega_{3+}^{(2)} &= \omega_{\max}^{(2)}; \\ \omega_{3+}^{(1)} &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3; \\ \omega_{3+} &= \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2; \\ \varphi_{3+} &= \varphi_1 + \omega_1 \cdot (t_2 + t_3) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_3^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^3; \\ I_{\text{я}3+} &= I_{\text{доп}} + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3; \\ I_{\text{я}3+}^{(1)} &= \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}; \\ U_{3+} &= C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2 \right] + \\ &+ R_{\text{я}} I_{\text{доп}} + \frac{R_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}.\end{aligned}$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4)$

$$\begin{aligned}\omega_4^{(2)} &= \omega_{\max}^{(2)}; \\ \omega_4^{(1)} &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4; \\ \omega_4 &= \omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + t_3 t_4 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4^2; \\ \varphi_4 &= \varphi_1 + \omega_1 \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_3^2 + t_2 t_4 + t_3 t_4 + \frac{1}{2} t_4^2 \right) +\end{aligned}$$

$$+ \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_3^3 + \frac{1}{2} t_3^2 t_4 + \frac{1}{2} t_3 t_4^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4^3;$$

$$I_{я4} = I_{\text{доп}} + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4;$$

$$I_{я4}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)};$$

$$U_4 = C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + t_3 t_4 \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4^2 \right] + R_{я} I_{\text{доп}} + \frac{R_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{R_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4 + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}.$$

Так как $\varphi_4 = \varphi_{\text{кон}}$, то

$$\varphi_{\text{кон}} = \varphi_1 + \omega_1 \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_3^2 + t_2 t_4 + t_3 t_4 + \frac{1}{2} t_4^2 \right) + \\ + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_3^3 + \frac{1}{2} t_3^2 t_4 + \frac{1}{2} t_3 t_4^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4^3. \quad (1)$$

Так как $\omega_4 = 0$, то

$$\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + t_3 t_4 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4^2 = 0. \quad (2)$$

Так как $\omega_4^{(1)} = 0$, то

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4 = 0. \quad (3)$$

Так как $U_3 = -U_{\text{доп}}$, то

$$-U_{\text{доп}} = C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3^2 \right] + \\ + R_{я} I_{\text{доп}} + \frac{R_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)}. \quad (4)$$

Так как $U_4 = U_{\text{доп}}$, то

$$U_{\text{доп}} = C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3 + t_4) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + t_3 t_4 \right) + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4^2 \right] + R_{я} I_{\text{доп}} + \frac{R_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{R_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_4 + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}. \quad (5)$$

Из (2), (3) и (5):

$$U_{\text{доп}} = \frac{R_{я}}{C_M} \cdot M_{\text{со}} + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}; \\ \omega_{\max}^{(2)} = \frac{C_M U_{\text{доп}}}{L_{я} J} - \frac{R_{я} M_{\text{со}}}{L_{я} J}. \quad (6)$$

Таким образом определяется максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на четвертом этапе.

Остальные четыре параметра близкой к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению и максимальному значению тока: длительности второго, третьего и четвертого этапов и минимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на третьем этапе определяются из системы, состоящей из четырех уравнений (1), (2), (3) и (4).

Если $I_{я3} = -I_{\text{доп}}$, то

$$-I_{\text{доп}} = I_{\text{доп}} + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_3; \\ \omega_{\min}^{(2)} = -2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J \cdot t_3}.$$

Так как $I_{я4}^{(1)} = I_{\max}^{(1)}$, то

$$I_{\max}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \left(\frac{C_M U_{\text{доп}}}{L_{я} J} - \frac{R_{я} M_{\text{со}}}{L_{я} J} \right) = \frac{C_M U_{\text{доп}} - R_{я} M_{\text{со}}}{C_M L_{я}};$$

$$t_4 = \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_M} \cdot \frac{C_M L_{\text{я}}}{C_M U_{\text{доп}} - R_{\text{я}} M_{\text{со}}} = \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_M U_{\text{доп}} - R_{\text{я}} M_{\text{со}}} \cdot L_{\text{я}}. \quad (7)$$

Из (2):

$$\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 - 2 \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3 + t_4\right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 = 0;$$

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) = -\omega_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J} \cdot t_3.$$

Из (4):

$$\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \omega_1 - \omega_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J} \cdot t_3 - \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J} \cdot t_3 +$$

$$+ \frac{R_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e} - 2 \cdot \frac{R_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e} - 2 \cdot \frac{L_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e \cdot t_3} = 0;$$

$$\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e}\right) \cdot t_3 = 2 \cdot \frac{L_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e};$$

$$t_3 = 2 \cdot \frac{L_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 - \frac{R_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e}\right)^{-1}. \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \left[-\omega_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{C_M I_{\text{доп}}}{J} \cdot t_3\right] - t_3;$$

$$t_2 = -\frac{J \omega_1}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_4 + \frac{C_M I_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_3 - t_3;$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_4 + \frac{M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_3 - \frac{J \omega_1}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}. \quad (9)$$

При этом:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}}. \quad (10)$$

Так как $I_{\text{я3}} = I_{\text{min}}$, то

$$I_{\text{min}} = I_{\text{доп}} + \frac{J}{C_M} \cdot \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot t_3;$$

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = -\frac{C_M \cdot (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{J \cdot t_3}.$$

Так как $I_{\text{я4}}^{(1)} = I_{\text{max}^*}^{(1)}$, то

$$I_{\text{max}^*}^{(1)} = \frac{J}{C_M} \cdot \left(\frac{C_M I_{\text{доп}}}{L_{\text{я}} J} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}}}{L_{\text{я}} J}\right) = \frac{C_M U_{\text{доп}} - R_{\text{я}} M_{\text{со}}}{C_M L_{\text{я}}};$$

$$t_4 = \frac{-C_M I_{\text{min}} + M_{\text{со}}}{C_M U_{\text{доп}} - R_{\text{я}} M_{\text{со}}} \cdot L_{\text{я}}. \quad (11)$$

Для диаграммы справедливы две зависимости:

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot t_3 = -\frac{C_M (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{J}; \quad \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_4 = -\frac{C_M I_{\text{min}} + M_{\text{со}}}{J}.$$

Из (2):

$$\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 -$$

$$- \frac{C_M (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3 + t_4\right) + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{min}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 = 0;$$

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_2 + t_3) = -\omega_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{min}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{J} \cdot t_3.$$

Из (4):

$$\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \omega_1 - \omega_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{min}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M \cdot (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{J} \cdot t_3 -$$

$$- \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{J} \cdot t_3 + \frac{R_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} \cdot (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{C_e} - \frac{L_{\text{я}} \cdot (I_{\text{доп}} - I_{\text{min}})}{C_e \cdot t_3} = 0;$$

$$\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{мин}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{R_{\text{я}} I_{\text{мин}}}{C_e}\right) \cdot t_3 = \frac{L_{\text{я}} \cdot (I_{\text{доп}} - I_{\text{мин}})}{C_e};$$

$$t_3 = \frac{L_{\text{я}} \cdot (I_{\text{доп}} - I_{\text{мин}})}{C_e} \cdot \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{мин}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{R_{\text{я}} I_{\text{мин}}}{C_e}\right)^{-1}. \quad (12)$$

При этом

$$t_2 = \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \left[-\omega_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{мин}} + M_{\text{со}}}{J} \cdot t_4 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M \cdot (I_{\text{доп}} - I_{\text{мин}})}{J} \cdot t_3\right] - t_3;$$

$$t_2 = -\frac{J \omega_1}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{мин}} + M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_4 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M (I_{\text{доп}} - I_{\text{мин}})}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_3 - t_3;$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M I_{\text{мин}} + M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_4 + \frac{1}{2} \cdot \frac{-C_M \cdot (I_{\text{доп}} + I_{\text{мин}}) + 2M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_3 - \frac{J \omega_1}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}. \quad (13)$$

Если $t_2 = 0$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.1}}$.

При этом для диаграммы справедливы зависимости:

$$\varphi_{\text{кон}} = \varphi_1 + \omega_1 \cdot (t_3 + t_4) + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_3 + t_4)^2 +$$

$$+ \omega_{\text{мин}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_3^3 + \frac{1}{2} t_3^2 t_4 + \frac{1}{2} t_3 t_4^2\right) + \frac{1}{6} \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot t_4^3; \quad (14)$$

$$\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_3 + t_4) + \omega_{\text{мин}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + t_3 t_4\right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot t_4^2 = 0; \quad (15)$$

$$\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} + \omega_{\text{мин}}^{(2)} \cdot t_3 + \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot t_4 = 0; \quad (16)$$

$$-U_{\text{доп}} = C_e \cdot \left[\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot t_3 + \frac{1}{2} \omega_{\text{мин}}^{(2)} \cdot t_3^2\right] + R_{\text{я}} I_{\text{доп}} + \frac{R_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{мин}}^{(2)} \cdot t_3 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{мин}}^{(2)}; \quad (17)$$

$$\omega_{\text{макс}^*}^{(2)} = \frac{C_M U_{\text{доп}}}{L_{\text{я}} J} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}}}{L_{\text{я}} J}. \quad (18)$$

Из (16):

$$\omega_{\text{мин}}^{(2)} = -\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J \cdot t_3} - \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot \frac{t_4}{t_3}.$$

Из (15):

$$\omega_1 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot (t_3 + t_4) - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3 + t_4\right) -$$

$$- \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3 t_4 + t_4^2\right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot t_4^2 = 0;$$

$$\omega_1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot t_3 - \frac{1}{2} \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot (t_3 t_4 + t_4^2) = 0. \quad (19)$$

Из (17):

$$\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \omega_1 + \frac{R_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot t_3 + \omega_{\text{мин}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} \cdot t_3 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M}\right) = 0;$$

$$\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \omega_1 + \frac{R_{\text{я}} I_{\text{доп}}}{C_e}\right) \cdot t_3 + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \cdot t_3^2 -$$

$$- \left[\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} + \omega_{\text{макс}^*}^{(2)} \cdot t_4\right] \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} \cdot t_3 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M}\right) = 0. \quad (20)$$

Из системы, состоящей из двух уравнений (19) и (20), определяются длительности этапов t_3 и t_4 .

Таким образом, определяем область существования предлагаемой диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода. При дальнейшем уменьшении, перемещения исполнительного органа электропривода необходимо переходить к диаграмме, имеющей ограничение по напряжению, а при дальнейшем увеличении перемещения исполнительного органа электропривода следует использовать диаграмму, имеющую ограничения по напряжению и максимальному и минимальному значениям тока.

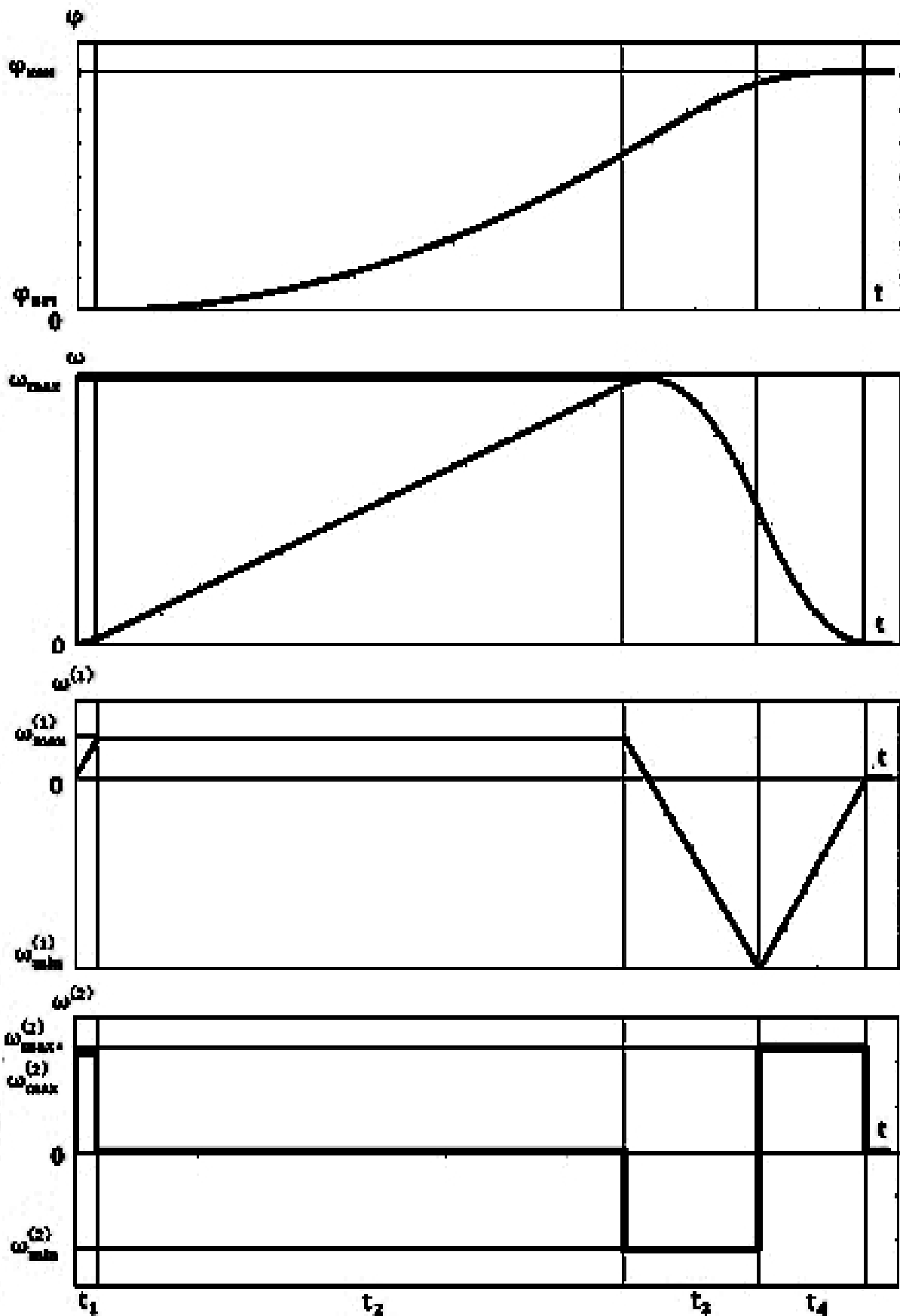


Рисунок 1 – Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока (механические контролируемые координаты)

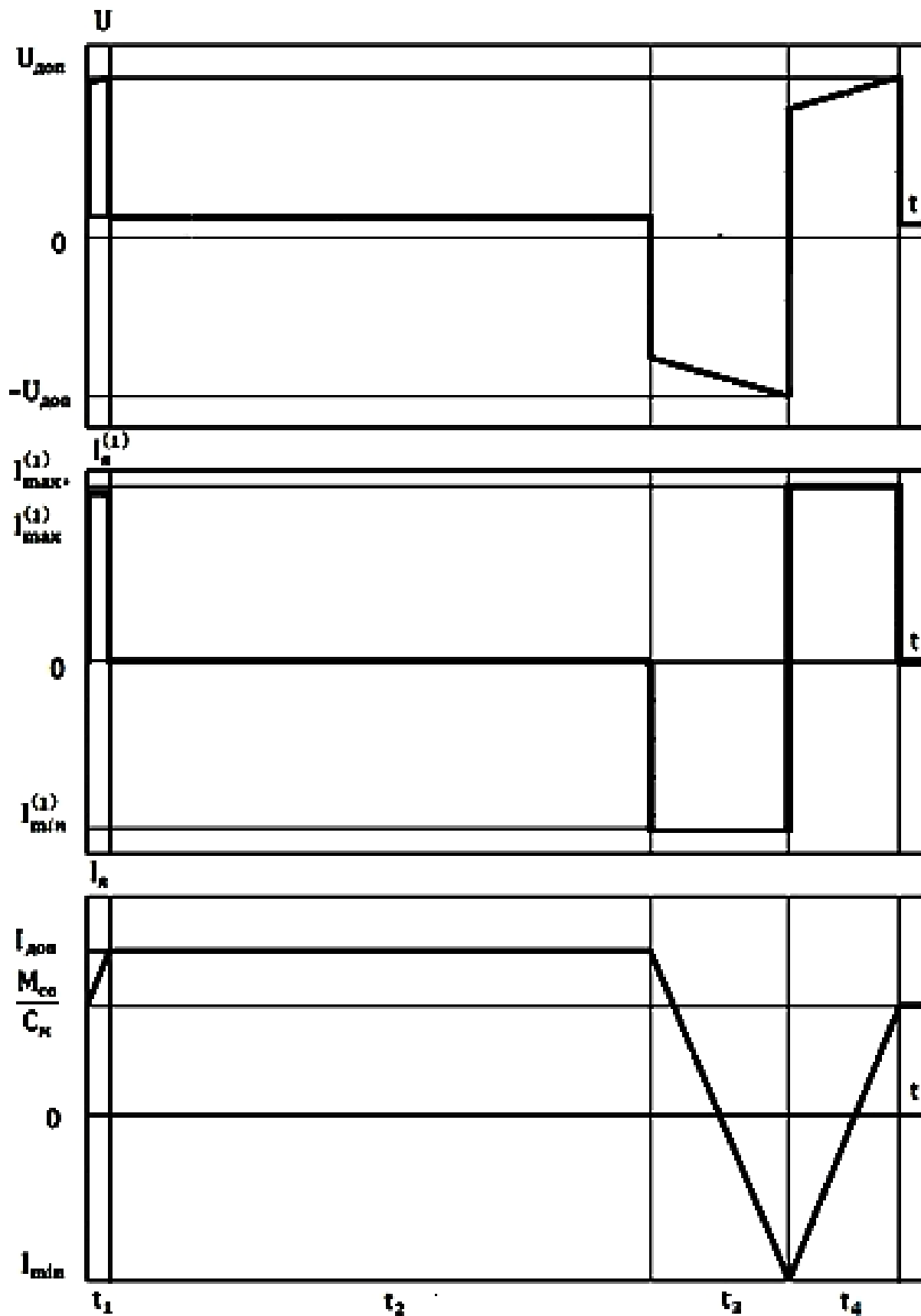


Рисунок 2 – Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока (электрические контролируемые координаты)

Выводы

В качестве варьируемых параметров в близкой к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока используются длительности четырёх этапов и три разных значения второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода.

Разработан алгоритм, позволяющий определить семь варьируемых параметров близкой к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока.

Так как алгоритм определения варьируемых параметров диаграммы не зависит от расклада корней характеристического уравнения, то при внедрении требуется более простое и дешевое оборудование.

Литература

1. Добробаба Ю.П., Литаш Б.С. Квазиоптимальный по быстродействию программно-управляемый позиционный электропривод: монография // Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар : Изд. ГУО ВПО «КубГТУ», 2009. – 178 с.
2. Добробаба Ю.П., Мурлина В.А., Чернуха М.В. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – № 1.

References

1. Dobrobaba Y.P., Litash B.S. Quasi-optimal in terms of speed of the program-controlled positional electric drive: monograph // Kuban State Technological University. – Krasnodar : Publishing house of State Educational Institution of Higher Professional Education «KubGTU», 2009. – 178 p.
2. Dobrobaba Y.P., Murlina, V.A., Chernukha, M.V. The close to optimal diagram of the motion of the actuator under the voltage limit // Nauka. Technique. Tekhnologii (Polytechnicheskiy Vestnik). – 2020. – № 1.