

УДК 62

**БЛИЗКАЯ К ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ ПО НАПРЯЖЕНИЮ**



**CLOSE TO OPTIMUM OPTIMUM DIAGRAM OF MOVEMENT
OF EXECUTIVE ELECTRIC DRIVE BODY WITH RESTRICTION ON VOLTAGE**

Добробаба Юрий Петрович

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

Мурлина Владислава Анатольевна

кандидат технических наук, доцент,
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, состоящая из трёх этапов. Диаграмма справедлива для электроприводов с любыми параметрами силовой части.

Ключевые слова: близкая к оптимальной, с ограничением по напряжению, трёх этапная диаграмма.

Dobrobaba Yuriy Petrovich

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

Murlina Vladislava Anatolievna

Candidate of technical sciences,
Associate Professor, 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 executive body of the electric drive, close to optimal in speed, was developed with a voltage limit, consisting of three stages. The diagram is valid for electric drives with any parameters of the power unit.

Keywords: close to optimal, with a voltage limit, three-step diagram.

В монографии [1] приведена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению, состоящая из трех этапов. В работе показано, что возможны три расклада корней характеристического уравнения системы и соответственно три вида переходных процессов.

Для каждого вида оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению найдены закономерности для определения длительностей этапов перемещения. На командоаппарат, формирующий оптимальную по быстродействию диаграмму перемещения исполнительный орган электропривода при ограничении по напряжению, получен патент РФ на полезную модель № 69354.

Недостатком такого решения является необходимость разработки в зависимости от расклада корней характеристического уравнения системы трёх алгоритмов управления перемещением исполнительного органа электропривода.

В данной работе предлагается близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению, в которой устраняется указанный недостаток. При этом необходимо иметь в виду, что незначительно увеличивается длительность перемещения исполнительного органа электропривода.

На рисунке 1 приведены механические контролируемые координаты близкой к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа

электропривода при ограничении по напряжению. На рисунке 2 представлены электрические контролируемые координаты близкой к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению.

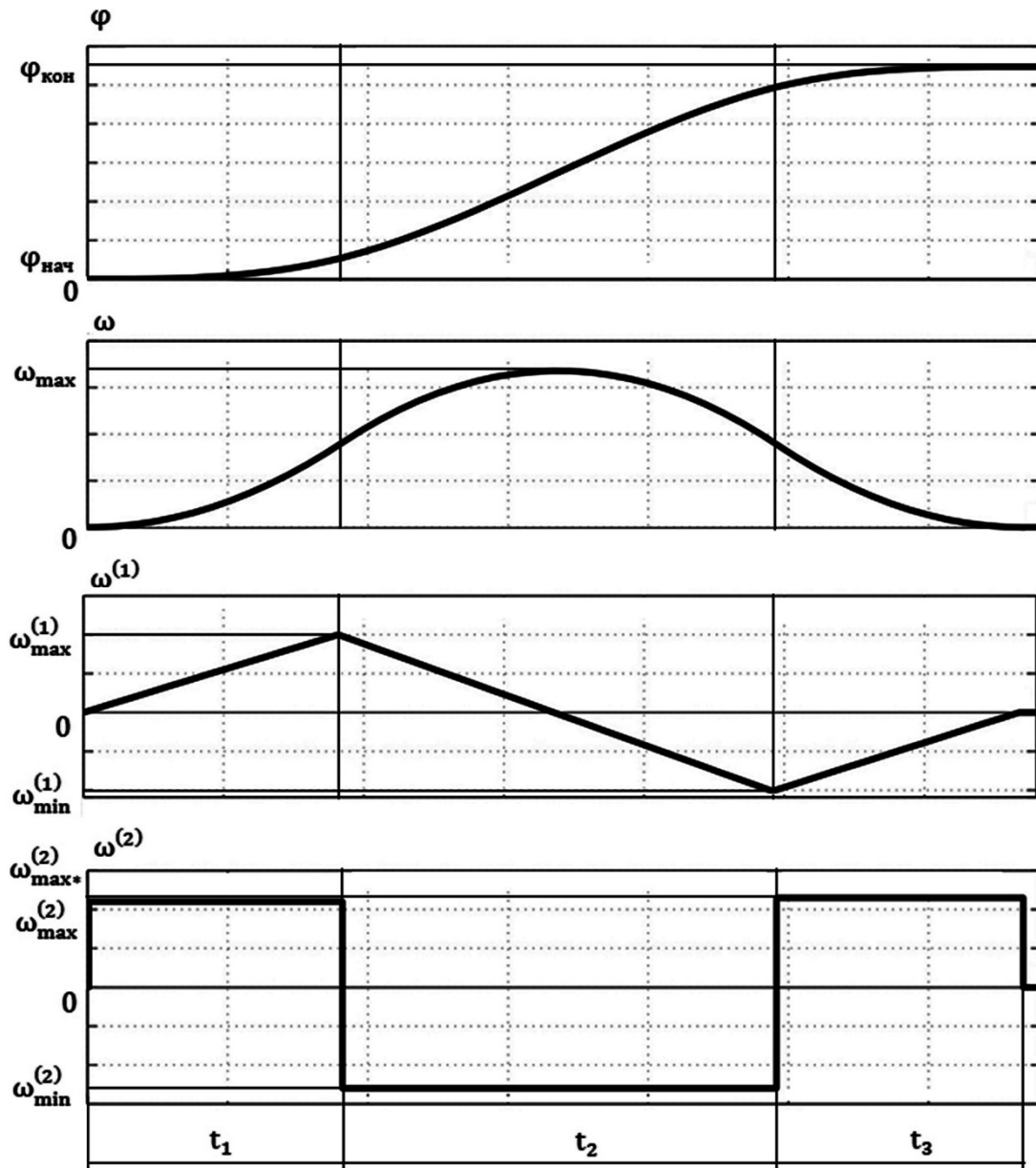


Рисунок 1 – (Механические контролируемые координаты)

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, А;
- t – время, с.

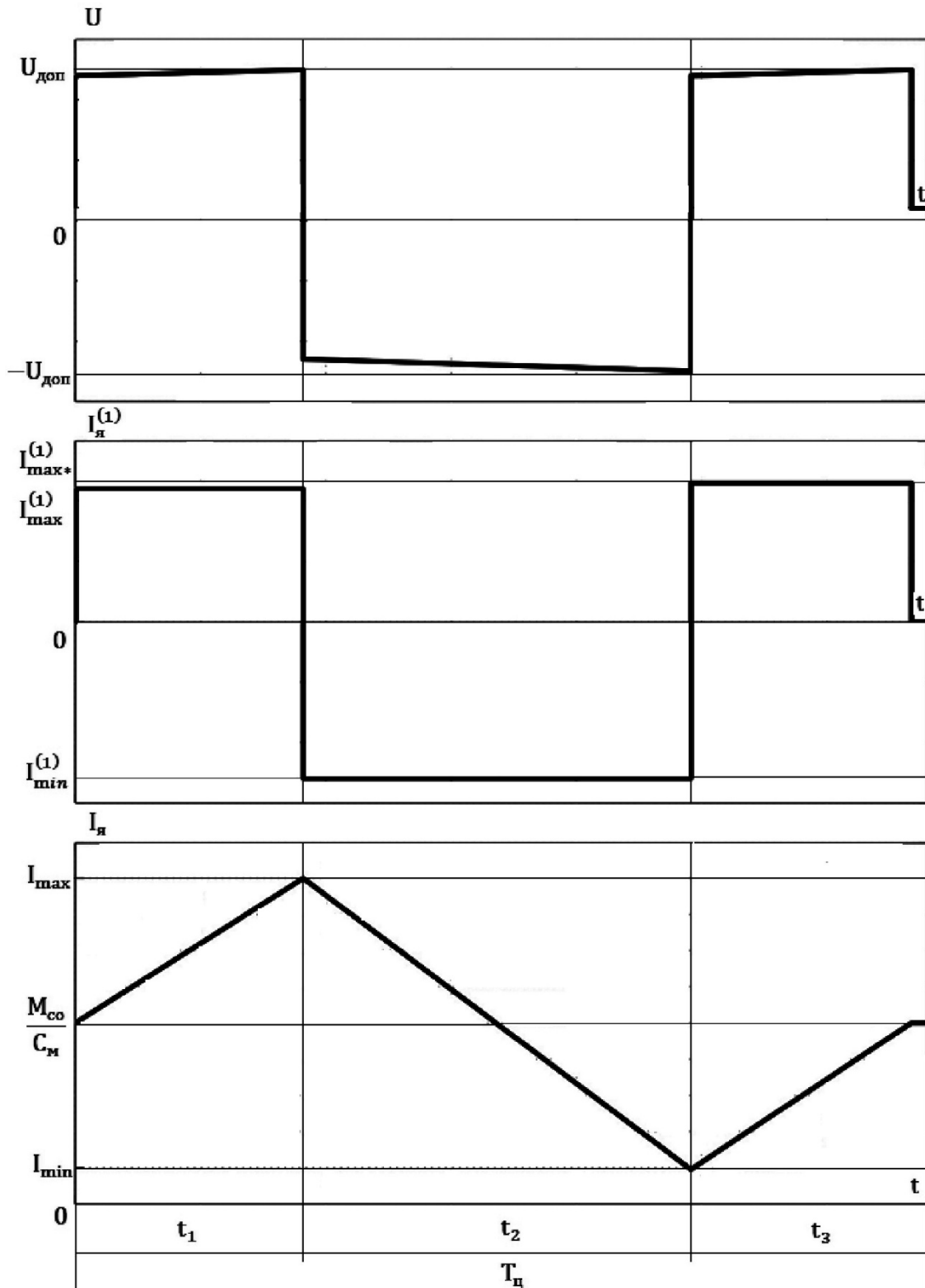


Рисунок 2 – (Электрические контролируемые координаты)

Определим аналитические зависимости контролируемых координат электропривода от времени при его близком к оптимальному по быстродействию движении при ограничении по напряжению.

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

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

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

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

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

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

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

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

где $\omega_{\max}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на первом этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; $\varphi_{\text{нач}}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад; $C_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с; $M_{\text{со}}$ – момент сопротивления электропривода, Н·м; 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; t_1 – длительность первого этапа, с.

При $t = 0_+$:

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

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

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

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

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

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

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

При $t = t_1$:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1);$$

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

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

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1)];$$

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

$$U(t) = C_e \cdot \left[\frac{1}{2} \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1)^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot (t - t_1)] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\min}^{(2)},$$

где $\omega_{\min}^{(2)}$ – минимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на втором этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; t_2 – длительность второго этапа, с.

При $t = t_{1+}$:

$$\omega_{1+}^{(2)} = \omega_{\min}^{(2)};$$

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

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

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

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

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

$$U_{1+} = \frac{1}{2} C_e \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{\text{я}}}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_{\text{М}}} \cdot \omega_{\min}^{(2)}.$$

При $t = (t_1 + t_2)$:

$$\omega_2^{(2)} = \omega_{\min}^{(2)};$$

$$\omega_2^{(1)} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2;$$

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

$$\varphi_2 = \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^3;$$

$$I_{\text{я}2} = \frac{1}{C_{\text{М}}} \cdot [M_{\text{co}} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2];$$

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

$$U_2 = C_e \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2 \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 \right] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)}.$$

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

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

$$\omega^{(1)}(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 + \omega_{\max*}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2);$$

$$\omega(t) = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 \cdot (t - t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\max*}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2;$$

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

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 + J \omega_{\max*}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2) \right];$$

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

$$U(t) = C_e \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2 + \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t - t_1 - t_2) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 \cdot (t - t_1 - t_2) + \frac{1}{2} \omega_{\max*}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2)^2 \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 + J \omega_{\max*}^{(2)} \cdot (t - t_1 - t_2) \right] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max*}^{(2)},$$

где $\omega_{\max*}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на третьем этапе, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$; t_3 – длительность третьего этапа, с.

При $t = (t_1 + t_2)_+$:

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

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

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

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

$$I_{я2+} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 \right];$$

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

$$U_{2+} = C_e \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2 \right] + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 \right] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max*}^{(2)}.$$

При $t = (t_1 + t_2 + t_3)$:

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

$$\omega_3^{(1)} = \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 + \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3;$$

$$\omega_3 = \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3^2;$$

$$\varphi_3 = \varphi_{нач} + \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) +$$

$$+ \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_2^3 + \frac{1}{2} t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_2 t_3^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3^3;$$

$$I_{я3} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 + J \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3 \right];$$

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

$$U_3 = C_e \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3^2 \right] +$$

$$+ \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 + J \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3 \right] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max*}^{(2)}.$$

Так как $\varphi_3 = \varphi_{кон}$, то:

$$\begin{aligned} (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) &= \omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_1^3 + \frac{1}{2} t_1^2 t_2 + \frac{1}{2} t_1 t_2^2 + \frac{1}{2} t_1^2 t_3 + t_1 t_2 t_3 + \frac{1}{2} t_1 t_3^2 \right) + \\ &+ \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{6} t_2^3 + \frac{1}{2} t_2^2 t_3 + \frac{1}{2} t_2 t_3^2 \right) + \frac{1}{6} \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3^3, \end{aligned} \quad (1)$$

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

Так как $\omega_3 = 0$, то:

$$\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \omega_{\min}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3^2 = 0. \quad (2)$$

Так как $\omega_3^{(1)} = 0$, то:

$$\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 + \omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_3 = 0. \quad (3)$$

Так как $U_1 = U_{доп}$, то:

$$U_{доп} = \frac{1}{2} C_e \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1^2 + \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 \right] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\max}^{(2)}. \quad (4)$$

Так как $U_2 = -U_{доп}$, то:

$$\begin{aligned} -U_{доп} &= C_e \cdot \left[\omega_{\max}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2^2 \right] + \\ &+ \frac{R_{я}}{C_M} \cdot \left[M_{co} + J \omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\min}^{(2)} \cdot t_2 \right] + \frac{L_{я} J}{C_M} \cdot \omega_{\min}^{(2)}, \end{aligned} \quad (5)$$

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

Так как $U_3 = U_{\text{доп}}$, то:

$$U_{\text{доп}} = C_e \cdot \left[\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) + \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + t_2 t_3 \right) + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_3^2 \right] + \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 + J \omega_{\text{min}}^{(2)} \cdot t_2 + J \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_3 \right] + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}^*}^{(2)}. \quad (6)$$

Из уравнений (2), (3) и (6):

$$U_{\text{доп}} = \frac{R_{\text{я}}}{C_M} \cdot M_{\text{co}} + \frac{L_{\text{я}} J}{C_M} \cdot \omega_{\text{max}^*}^{(2)}; \\ \omega_{\text{max}^*}^{(2)} = \frac{C_M U_{\text{доп}} - R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{L_{\text{я}} J}. \quad (7)$$

По формуле (7) определяется максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода на третьем этапе $\omega_{\text{max}^*}^{(2)}$. Пять остальных параметров диаграммы $\omega_{\text{max}^*}^{(2)}$, $\omega_{\text{min}}^{(2)}$, t_1 , t_2 и t_3 определяются из системы, состоящей из пяти уравнений (1)–(5).

Если $I_{\text{я1}} = I_{\text{доп}}$, то:

$$I_{\text{доп}} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{\text{co}} + J \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 \right]; \\ \omega_{\text{max}}^{(2)} = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J \cdot t_1},$$

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

Из уравнения (4):

$$\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{C_e C_M} = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J \cdot t_1} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} \cdot t_1 + \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M} \right); \\ t_1^2 + 2 \cdot \left[\frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} - \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{C_e C_M} \right) \cdot \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}} \right] \cdot t_1 + 2 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M} = 0;$$

Следовательно:

$$t_1 = \left[\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{C_e C_M} \right) \cdot \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}} - \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} \right] - \\ - \sqrt{\left[\left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}}}{C_e C_M} \right) \cdot \frac{J}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}} - \frac{R_{\text{я}} J}{C_e C_M} \right]^2 - 2 \cdot \frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M}}.$$

Из уравнения (3):

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = -\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} - \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot \frac{t_3}{t_2}.$$

Из уравнения (2):

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) - \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1 t_2 + t_1 t_3 \right) - \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2 t_3 + t_3^2 \right) + \\ + \frac{1}{2} \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_3^2 = 0; \\ \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) - \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_3^2 + \frac{1}{2} t_2 t_3 \right) = 0; \\ \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 \cdot (t_1 + t_2) = \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_3 \cdot (t_2 + t_3); \\ \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot (t_1 + t_2) = \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_3 \cdot (t_2 + t_3). \quad (8)$$

Из уравнения (5):

$$\begin{aligned}
 & -\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}}M_{\text{co}}}{C_e C_M} = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 t_2 - \frac{1}{2} \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_2 t_3 + \\
 & + \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_3 - \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \frac{t_1}{t_2} - \\
 & - \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot \frac{t_3}{t_2}; \\
 & \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}}M_{\text{co}}}{C_e C_M} \right) \cdot t_2 + \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1^2 + \frac{1}{2} t_1 t_2 \right) \cdot t_2 - \\
 & - \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2 t_3 + \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot t_3 \right) \cdot t_2 - \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot t_1 - \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot t_3 = 0; \\
 & \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1 t_2 + \frac{1}{2} t_2^2 - \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \right) \cdot t_1 - \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot t_2 + \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \right) \cdot t_3 + \\
 & + \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}}M_{\text{co}}}{C_e C_M} \right) \cdot t_2 = 0; \\
 & \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{co}}}{J} \cdot \left(\frac{1}{2} t_1 t_2 + \frac{1}{2} t_2^2 - \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \right) - \omega_{\text{max}^*}^{(2)} \cdot \left(\frac{1}{2} t_2^2 + \frac{R_{\text{я}}J}{C_e C_M} \cdot t_2 + \frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_M} \right) \cdot t_3 + \\
 & + \left(\frac{U_{\text{доп}}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}}M_{\text{co}}}{C_e C_M} \right) \cdot t_2 = 0. \tag{9}
 \end{aligned}$$

При этом граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода равно:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.1}}.$$

Из системы, состоящей из двух уравнений (8) и (9), определяются длительности второго t_2 и третьего t_3 этапов.

При дальнейшем увеличении перемещения исполнительного органа электропривода необходимо переходить к диаграмме, имеющей ограничения по напряжению и максимальному значению тока.

Выводы

Предлагается близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению. Диаграмма состоит из трёх этапов. В качестве варьируемых параметров используется длительность трёх этапов и три разных значения второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода: максимального на первом этапе $\omega_{\text{max}}^{(2)}$, минимального на втором этапе $\omega_{\text{min}}^{(2)}$, максимального на третьем этапе $\omega_{\text{max}^*}^{(2)}$. Такое решение позволяет существенно повысить быстродействие перемещения исполнительного органа электропривода.

Разработан алгоритм для определения шести варьируемых параметров близкой к оптимальной по быстродействию диаграмме перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению.

Так как диаграмма справедлива для электроприводов с любыми параметрами силовой части, то это позволит использовать для её внедрения более 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. Пат. на полезную модель 69354 РФ, МПК Н 02 Р 5/60 (2006.01). Устройство для формирования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения электропривода с моментом сопротивления типа сухого трения при ограничении по напряжению / Ю.П. Добробаба, Д.С. Прохоренко, В.Ю. Барандыч, В.И. Коноплин; заявитель и патентообладатель Кубан. гос. технол. ун-т. – № 2007120427/22; заявл. 31.05.07. – Оpubл. 10.12.07. – Бюл. № 34.

References

1. Dobrobaba Yu.P., Litash B.S. Quasi-optimal speed-controlled program-controlled positional electric drive : monograph / Kuban. gos. tekhnol. un-t – Krasnodar : Izd. GUO VPO «KubGTU», 2009. – 178 p.
2. Pat. Utility Model 69354 of the Russian Federation, IPC N 02 P 5/60 (2006.01). A device for forming an optimal speed diagram of the movement of an electric drive with a moment of resistance such as dry friction with a voltage limit / Yu.P. Dobrobaba, D.S. Prokhorenko, V.Yu. Barandych, V.I. Konoplin; applicant and patent holder Kuban. state technol. un-t. – № 2007120427/22; declared 05/31/07. – Publ. 10.12.07. – Bull. № 34.