

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
ПЕРВОГО ВИДА ДИАГРАММЫ ДЛЯ МАЛЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
С ЗАВИСЯЩИМ ОТ СКОРОСТИ МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ**

Ю.П. ДОБРОБАБА, Г.А. КОШКИН, Н.Я. ПРОХОРЕНКО

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

В статье представлено решение задачи оптимального по быстродействию управления первого вида малыми перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. Определены аналитические зависимости для контролируемых координат электропривода при его оптимальном по быстродействию перемещении. Получены три уравнения, совместное решение которых позволяет определить длительности этапов при малых перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. Установлена область существования оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

Ключевые слова: электропривод, малые перемещения, диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода.

В статье [1] решена задача определения оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электроприводов с учетом влияния индуктивностей якорных цепей электродвигателей при локальных ограничениях. В этой статье момент сопротивления электропривода принят постоянным по величине.

В данной работе решается задача по определению параметров оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

Математическая модель электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} U(t) &= C_e \cdot \omega(t) + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}(t) + L_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^{(1)}(t); \\ C_m \cdot I_{\text{я}}(t) &= M_{\text{со}} + K_c \cdot \omega(t) + J \cdot \omega^{(1)}(t); \\ \varphi^{(1)}(t) &= \omega(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где U - напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, B ;

ω - угловая скорость исполнительного органа электродвигателя, $\frac{\text{рад}}{c}$;

$I_{\text{я}}$ - ток якорной цепи электродвигателя, A ;

$M_{\text{со}}$ - постоянный по величине момент сопротивления электропривода, $H \cdot m$;

φ - угол поворота исполнительного органа электропривода, рад ;

C_e - коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{B \cdot c}{\text{рад}}$;

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

$L_{\text{я}}$ - индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн ;

C_m - коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, $B \cdot c$;

K_c - коэффициент, $\frac{H \cdot m \cdot c}{\text{рад}}$;

J - момент инерции исполнительного органа электропривода, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Критерий оптимизации

$$\int_0^{T_{\text{ц}}} dt = \min, \quad (2)$$

где $T_{\text{ц}}$ - длительность цикла, c .

На электропривод накладываются ограничения:

$$-U_{\text{дон}} \leq U(t) \leq U_{\text{дон}}; \quad (3)$$

$$-I_{\text{дон}} \leq I_{\text{я}}(t) \leq I_{\text{дон}}; \quad (4)$$

$$-\omega_{\text{дон}} \leq \omega(t) \leq \omega_{\text{дон}}; \quad (5)$$

где $U_{дон}$ - максимально допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электродвигателя, B ;

$I_{дон}$ - максимально допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, A ;

$\omega_{дон}$ - максимально допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с}$.

Начальные значения контролируемых координат электропривода:

$$\left. \begin{aligned} U(0) &= \frac{R_{я}}{C_{м}} \cdot M_{со}; \\ I_{я}(0) &= \frac{1}{C_{м}} \cdot M_{со}; \\ \omega(0) &= 0; \\ \varphi(0) &= \varphi_{нач}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где $\varphi_{нач}$ - начальное значение угла поворота (перемещения) исполнительного органа электропривода, $рад$.

Конечные значения контролируемых координат электропривода:

$$\left. \begin{aligned} U(T_{ц}) &= \frac{R_{я}}{C_{м}} \cdot M_{со}; \\ I_{я}(T_{ц}) &= \frac{1}{C_{м}} \cdot M_{со}; \\ \omega(T_{ц}) &= 0; \\ \varphi(T_{ц}) &= \varphi_{кон}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $\varphi_{кон}$ - конечное значение угла поворота(перемещения) исполнительного органа электропривода механизма, $рад$.

Задача оптимального по быстродействию управления малыми перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления формулируется следующим образом: определить диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода, удовлетворяющую системе уравнений (1) и доставляющую

минимум интегралу (2), при ограничении по напряжению (3), начальных значениях контролируемых координат электропривода (6) и конечных значениях контролируемых координат электропривода (7).

Так как система уравнений (1) имеет локальные ограничения, то в соответствии с принципом максимума академика Л.С. Понтрягина, управляющее воздействие представляет собой кусочно-постоянную функцию от времени, принимающую граничные значения.

Система уравнений (1) представима в виде:

$$\frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c} \cdot \varphi^{(3)}(t) + \frac{R_{\text{я}}J + L_{\text{я}}K_c}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c} \cdot \varphi^{(2)}(t) + \varphi^{(1)}(t) = \frac{U_*}{C_e} - \frac{R_{\text{я}}M_{\text{co}^*}}{C_e C_m}, \quad (8)$$

где
$$U_* = U \cdot \frac{C_e C_m}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c};$$

$$M_{\text{co}^*} = M_{\text{co}} \cdot \frac{C_e C_m}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c}.$$

Характеристическое уравнение системы (1) имеет вид:

$$\frac{L_{\text{я}}J}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c} \cdot p^3 + \frac{R_{\text{я}}J + L_{\text{я}}K_c}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c} \cdot p^2 + p = 0. \quad (9)$$

Если выполняется условие

$$(R_{\text{я}}J - L_{\text{я}}K_c)^2 > 4L_{\text{я}}JC_e C_m, \quad (10)$$

то характеристическое уравнение системы имеет вид первый:

$$p \cdot (T_1 p + 1) \cdot (T_2 p + 1) = 0, \quad (11)$$

где
$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\text{я}}J + L_{\text{я}}K_c}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{(R_{\text{я}}J - L_{\text{я}}K_c)^2 - 4L_{\text{я}}JC_e C_m}}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c};$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\text{я}}J + L_{\text{я}}K_c}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{(R_{\text{я}}J - L_{\text{я}}K_c)^2 - 4L_{\text{я}}JC_e C_m}}{C_e C_m + R_{\text{я}}K_c}.$$

Если выполняется условие

$$(R_{\text{я}}J - L_{\text{я}}K_c)^2 = 4L_{\text{я}}JC_e C_m, \quad (12)$$

то характеристическое уравнение системы имеет вид второй:

$$p \cdot (Tp + 1)^2 = 0, \quad (13)$$

где
$$T = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{я}J + L_{я}K_c}{C_e C_m + R_{я}K_c}.$$

Если выполняется условие

$$(R_{я}J - L_{я}K_c)^2 < 4L_{я}J C_e C_m, \tag{14}$$

то характеристическое уравнение системы имеет вид третий:

$$p \cdot (T^2 p^2 + 2Tp + 1) = 0, \tag{15}$$

где
$$T = \sqrt{\frac{L_{я}J}{C_e C_m + R_{я}K_c}};$$

$$\xi = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_{я}}{L_{я}} + \frac{K_c}{J}\right) \cdot \frac{R_{я}J + L_{я}K_c}{C_e C_m + R_{я}K_c}}.$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления состоит из трёх этапов. На первом и третьем этапах напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, равно максимально допустимому значению $U_{дон}$; на втором этапе напряжение равно максимально допустимому значению со знаком «минус» $-U_{дон}$.

Оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления состоит из трех этапов.

Этап 1. В интервале времени $0 \leq t \leq t_1$ для контролируемых координат электропривода справедливы зависимости:

$$U(t) = U_{дон};$$

$$\varphi(t) = A_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + B_1 \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + C_1 \cdot t + D_1;$$

$$\varphi^{(1)}(t) = -\frac{A_1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{B_1}{T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + C_1;$$

$$\varphi^{(2)}(t) = \frac{A_1}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{B_1}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}};$$

$$\varphi^{(3)}(t) = -\frac{A_1}{T_1^3} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{B_1}{T_2^3} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}};$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + K_c \cdot \left[-\frac{A_1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} - \frac{B_1}{T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + C_1 \right] + J \cdot \left[\frac{A_1}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{B_1}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \right\},$$

где $A_1 = \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \left[\frac{U_{\text{дон}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}^*}}{C_e C_{\text{м}}} \right];$

$$B_1 = -\frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \left[\frac{U_{\text{дон}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}^*}}{C_e C_{\text{м}}} \right];$$

$$C_1 = \left[\frac{U_{\text{дон}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}^*}}{C_e C_{\text{м}}} \right];$$

$$D_1 = \varphi_{\text{нач}} - (T_1 + T_2) \cdot \left[\frac{U_{\text{дон}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{co}^*}}{C_e C_{\text{м}}} \right],$$

$$U_{\text{дон}^*} = U_{\text{дон}} \cdot \frac{C_e C_{\text{м}}}{C_e C_{\text{м}} + R_{\text{я}} K_c}.$$

При $t = t_1$.

$$\varphi_1 = A_1 \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + B_1 \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} + C_1 \cdot t_1 + D_1;$$

$$\varphi_1^{(1)} = -\frac{A_1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} - \frac{B_1}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} + C_1;$$

$$\varphi_1^{(2)} = \frac{A_1}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \frac{B_1}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}};$$

$$\varphi_1^{(3)} = -\frac{A_1}{T_1^3} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} - \frac{B_1}{T_2^3} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}};$$

$$I_{\text{я}1} = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{co}} + K_c \cdot \left[-\frac{A_1}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} - \frac{B_1}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} + C_1 \right] + J \cdot \left[\frac{A_1}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \frac{B_1}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \right\}.$$

Этап 2. В интервале времени $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$ для контролируемых координат электропривода справедливы зависимости:

$$U(t) = -U_{\text{дон}};$$

$$\varphi(t) = A_2 \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} + B_2 \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}} + C_2 \cdot (t - t_1) + D_2;$$

$$\varphi^{(1)}(t) = -\frac{A_2}{T_1} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}} + C_2;$$

$$\varphi^{(2)}(t) = \frac{A_2}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} + \frac{B_2}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}};$$

$$\varphi^{(3)}(t) = -\frac{A_2}{T_1^3} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2^3} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}};$$

$$I_{\text{я}}(t) = \frac{1}{C_{\text{м}}} \cdot \left\{ M_{\text{сo}} + K_{\text{с}} \cdot \left[-\frac{A_2}{T_1} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}} + C_2 \right] + J \cdot \left[\frac{A_2}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_1}} + \frac{B_2}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1}{T_2}} \right] \right\},$$

где $A_2 = A_1 \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} - 2 \cdot \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\text{дон}^*}}{C_{\text{е}}};$

$$B_2 = B_1 \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} - 2 \cdot \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\text{дон}^*}}{C_{\text{е}}};$$

$$C_2 = -\left[\frac{U_{\text{дон}^*}}{C_{\text{е}}} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{сo}^*}}{C_{\text{е}} C_{\text{м}}} \right];$$

$$D_2 = \varphi_{\text{нач}} + (T_1 + T_2) \cdot \left[\frac{U_{\text{дон}^*}}{C_{\text{е}}} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{сo}^*}}{C_{\text{е}} C_{\text{м}}} \right] + \left[\frac{U_{\text{дон}^*}}{C_{\text{е}}} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{сo}^*}}{C_{\text{е}} C_{\text{м}}} \right] \cdot t_1.$$

При $t = t_1 + t_2$.

$$\varphi_2 = A_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + B_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} + C_2 \cdot t_2 + D_2;$$

$$\varphi_2^{(1)} = -\frac{A_2}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} + C_2;$$

$$\varphi_2^{(2)} = \frac{A_2}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + \frac{B_2}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}};$$

$$\varphi_2^{(3)} = -\frac{A_2}{T_1^3} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2^3} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}};$$

$$I_{я2} = \frac{1}{C_m} \cdot \left\{ M_{co} + K_c \cdot \left[-\frac{A_2}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} - \frac{B_2}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} + C_2 \right] + J \cdot \left[\frac{A_2}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + \frac{B_2}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} \right] \right\}.$$

Этап 3. В интервале времени $(t_1 + t_2) \leq t \leq (t_1 + t_2 + t_3)$ для контролируемых координат электропривода справедливы зависимости:

$$U(t) = U_{don};$$

$$\varphi(t) = A_3 \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} + B_3 \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_2}} + C_3 \cdot (t - t_1 - t_2) + D_3;$$

$$\varphi^{(1)}(t) = -\frac{A_3}{T_1} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} - \frac{B_3}{T_2} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_2}} + C_3;$$

$$\varphi^{(2)}(t) = \frac{A_3}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} + \frac{B_3}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_2}};$$

$$\varphi^{(3)}(t) = -\frac{A_3}{T_1^3} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} - \frac{B_3}{T_2^3} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_2}};$$

$$I_{я}(t) = \frac{1}{C_m} \cdot \left\{ M_{co} + K_c \cdot \left[-\frac{A_3}{T_1} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} - \frac{B_3}{T_2} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_2}} + C_3 \right] + J \cdot \left[\frac{A_3}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_1}} + \frac{B_3}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t-t_1-t_2}{T_2}} \right] \right\},$$

где $A_3 = A_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + 2 \cdot \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{don*}}{C_e};$

$$B_3 = B_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} - 2 \cdot \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{don*}}{C_e};$$

$$C_3 = \left[\frac{U_{don*}}{C_e} + \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right];$$

$$D_3 = \varphi_{нач} - (T_1 + T_2) \cdot \left[\frac{U_{don*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right] + \frac{U_{don*}}{C_e} \cdot (t_1 - t_2) - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \cdot (t_1 + t_2).$$

При $t = t_1 + t_2 + t_3$.

$$\varphi_3 = A_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + B_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} + C_3 \cdot t_3 + D_3;$$

$$\varphi_3^{(1)} = -\frac{A_3}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} - \frac{B_3}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} + C_3;$$

$$\varphi_3^{(2)} = \frac{A_3}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + \frac{B_3}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}};$$

$$\varphi_3^{(3)} = -\frac{A_3}{T_1^3} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} - \frac{B_3}{T_2^3} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}};$$

$$I_{я3} = \frac{1}{C_m} \cdot \left\{ M_{co} + K_c \cdot \left[-\frac{A_3}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} - \frac{B_3}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} + C_3 \right] + J \cdot \left[\frac{A_3}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + \frac{B_3}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} \right] \right\}.$$

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

$$\begin{aligned} \varphi_{кон} &= A_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + B_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} + \left[\frac{U_{дон*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right] \cdot t_3 + \varphi_{нач} - (T_1 + T_2) \cdot \left[\frac{U_{дон*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right] + \\ &\quad + \frac{U_{дон*}}{C_e} \cdot (t_1 - t_2) - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \cdot (t_1 + t_2); \\ \varphi_{кон} &= \varphi_{нач} + \frac{U_{дон*}}{C_e} \cdot (t_1 - t_2 + t_3) - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \cdot (t_1 + t_2 + t_3) + \\ &\quad + A_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + B_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} - (T_1 + T_2) \cdot \left[\frac{U_{дон*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right]. \end{aligned}$$

Так как $\varphi_3^{(1)} = 0$, то

$$0 = -\frac{A_3}{T_1} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + \frac{B_3}{T_2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} + \left[\frac{U_{дон*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right].$$

Так как $\varphi_3^{(2)} = 0$, то

$$0 = \frac{A_3}{T_1^2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + \frac{B_3}{T_2^2} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}}.$$

Анализ полученных зависимостей показывает, что справедливы следующие соотношения:

$$A_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} = \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \left[\frac{U_{дон*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right];$$

$$B_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} = -\frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \left[\frac{U_{дон*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co*}}{C_e C_m} \right];$$

$$A_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} + B_3 \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} = (T_1 + T_2) \cdot \left[\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right].$$

Таким образом, справедливо уравнение

$$(\Phi_{кон} - \Phi_{нач}) = \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \cdot (t_1 - t_2 + t_3) - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \cdot (t_1 + t_2 + t_3). \quad (16)$$

Так как

$$\begin{aligned} & \left(A_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + 2 \cdot \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right) \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} = \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right); \\ & \left[\left(A_1 \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} - 2 \cdot \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right) \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + 2 \cdot \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right] \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} = \\ & = \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right); \\ & \left\{ \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right) \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} - 2 \cdot \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right\} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} + 2 \cdot \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} = \\ & = \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right), \end{aligned}$$

то справедливо уравнение

$$\begin{aligned} & \left\{ 2 \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \left[2 \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right) \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} \right] \cdot e^{-\frac{t_2}{T_1}} \right\} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} = \\ & = \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Так как

$$\begin{aligned} & \left(B_2 \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} - 2 \cdot \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right) \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} = -\frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right); \\ & \left[\left(B_1 \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} + 2 \cdot \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right) \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} - 2 \cdot \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right] \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} = \\ & = -\frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_{м}} \right); \end{aligned}$$

$$\left\{ -\frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m} \right) \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} + 2 \cdot \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \right\} \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} - 2 \cdot \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} =$$

$$= -\frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m} \right),$$

то справедливо уравнение

$$\left\{ 2 \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \left[2 \cdot \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \left(\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m} \right) \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot e^{-\frac{t_2}{T_2}} \right\} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} =$$

$$= \frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m}. \tag{18}$$

Из уравнений (16)÷(18) определяются длительности этапов перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления t_1 , t_2 и t_3 .

Так как $I_{я1} = I_{max}$, то

$$I_{max} = \frac{1}{C_m} \cdot \left\{ M_{co} + K_c \cdot \left[1 - \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m} \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{J}{T_1 - T_2} \cdot \left[e^{-\frac{t_1}{T_1}} - e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m} \right] \right\}.$$

Если $I_{max} = I_{\partial on}$, то $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = \varphi_{зп.1}$.

$$C_m I_{\partial on} = M_{co} + K_c \cdot \left[1 - \frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m} \right] +$$

$$+ \frac{J}{T_1 - T_2} \cdot \left[e^{-\frac{t_1}{T_1}} - e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\partial on^*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{co^*}}{C_e C_m} \right]. \tag{19}$$

Из уравнений (17), (18) и (19) определяются значения длительностей этапов t_1 , t_2 и t_3 . Из выражения (16) определяется первое граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода $\varphi_{зп.1}$.

На рис.1 представлена оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления

$$(\varphi_{нач} = 0 \text{ рад}; \varphi_{кон} = 0,0004 \text{ рад}; U_{дон} = 250 \text{ В}; I_{дон} = 8 \text{ А}; \omega_{дон} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$C_e = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с} / \text{рад}; C_m = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}; R_{я} = 5 \text{ Ом}; L_{я} = 0,1 \text{ Гн}; J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$M_{со} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}; K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}).$$

Для данной системы первое граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода $\varphi_{зр.1} = 0,000536 \text{ рад}$.

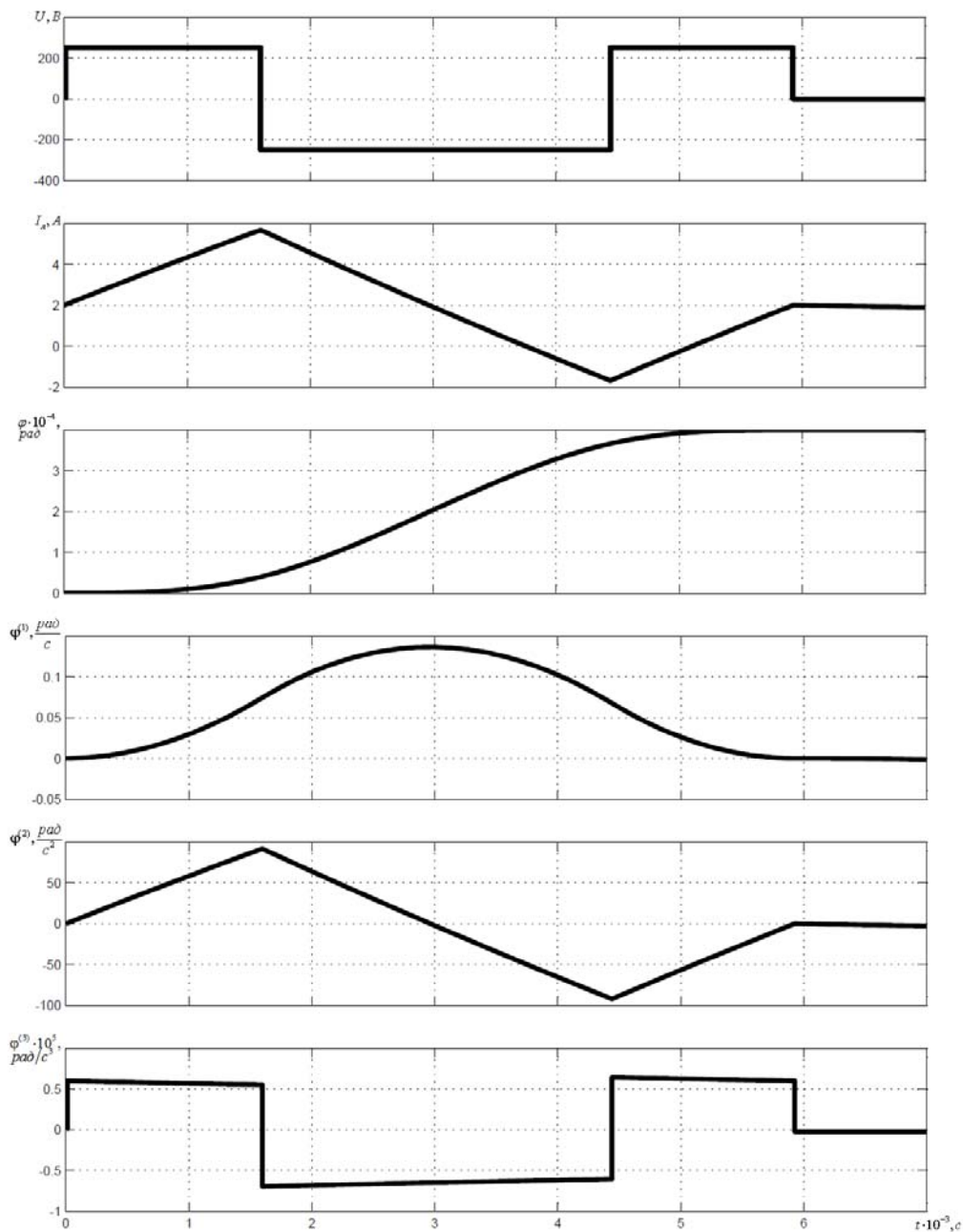


Рисунок 1 – Оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления

Выводы:

- определены аналитические зависимости для контролируемых координат электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления при его оптимальных по быстродействию малых перемещениях исполнительного органа;

- получены три уравнения (16), (17) и (18), совместное решение которых позволяет определить длительности этапов перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления t_1 , t_2 и t_3 ;

- установлена область существования оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добробаба Ю.П., Прохоренко Д.С. Разработка оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения электроприводов с учетом влияния индуктивностей якорных цепей электродвигателей при локальных ограничениях [Текст] / Ю.П. Добробаба, Д.С. Прохоренко // Известия высших учебных заведений «Пищевая технология» - Краснодар: Изд. «КубГТУ», 2007. – с. 60-64.

REFERENCES

1. Dobrobaba Yu.P., Prokhorenko D.S. Razrabotka optimalnykh po bystrodeystviyu diagramm peremeshcheniya elektroprivodov s uchetom vliyaniya induktivnostey yakornykh tsepey elektrodvigatelay pri lokalnykh ogranicheniyakh [Tekst] / Yu.P. Dobrobaba, D.S. Prokhorenko // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy «Pishchevaya tekhnologiya» - Krasnodar: Izd. «KubGTU», 2007. – s. 60-64.

*DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE OPTIMAL FIRST TYPE OF
DIAGRAMS FOR SMALL MOVEMENTS OF THE EXECUTIVE BODY OF THE DC
MOTOR WITH A SPEED-DEPENDENT RESISTIVE TORQUE*

YU.P. DOBROBABA, G.A. KOSHKIN, N.YA. PROKHORENKO

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

The article presents the solution of optimal control problems of the first type of small movements of the Executive body of the DC motor depending on the speed of the moment of resistance. Identified analytical dependences for monitored coordinates of the electric drive in its optimal speed. Obtained three equations, the joint solution of which allows to determine the Duration of phases with small displacements of the Executive body of the DC motor depending on the speed of the moment of resistance. To set the region of existence of the optimal first type of diagrams for small movements of the Executive body of the DC motor depending on the speed of the moment of resistance.

Key words: electric drive, small displacement, Diagram of movement of electric drives Executive authority.