

УДК 62.83.52:62.503.56

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ТРЕТЬЕГО ВИДА ДИАГРАММЫ ПРИ НЕБОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЗАВИСЯЩИМ ОТ СКОРОСТИ МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ

THE DEFINITION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE THIRD TYPE SCHEME WITH A SLIGHT DISPLACEMENT OF THE EXECUTIVE BODY OF THE DC MOTOR WITH A SPEED-DEPENDENT RESISTIVE TORQUE

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры электроснабжения
промышленных предприятий,
Кубанский государственный
технологический университет
itstimetoprivod@yahoo.com

Кошкин Гордей Анатольевич

кандидат технических наук,
начальник цеха,
НКУ, ООО «Прогресс»

Прохоренко Никита Ярославович

студент,
Кубанский государственный
технологический университет
classyadvets@gmail.com

Аннотация. В статье решается задача оптимального по быстродействию управления небольшими перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления, согласно оптимальной по быстродействию третьей вида диаграммы. Для четырёх этапов определены аналитические зависимости контролируемых координат электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления, который совершает небольшие перемещения своего исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой третьего вида. Получены шесть уравнений, при совместном решении которых определяются длительности четырёх этапов перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления и конечные значения угла поворота исполнительного органа и его первой производной. Для оптимальной по быстродействию третьей вида диаграммы при небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления установлена область существования. При построении зависимостей контролируемых координат электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления от времени при небольших перемещениях его исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой третьего вида применялись следующие программные продукты: MATLAB, Mathcad.

Ключевые слова: электропривод; постоянный ток; небольшие перемещения; диаграмма перемещения; исполнительный орган.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate professor, professor of department
of power supply industrial enterprises,
Kuban state technological university
itstimetoprivod@yahoo.com

Koshkin Gordey Anatolyevich

Candidate of technical sciences,
Foreman,
NKU, LLCProgress

Prokhorenko Nikita Yaroslavovich

Student,
Kuban state technological university
classyadvets@gmail.com

Annotation. In the article the problem of time-optimal control of slight movements of the Executive body of the DC motor with a speed-dependent resistance torque according to optimal third graph. For the four stages identified analytical dependences of coordinates of controlled DC drive with speed-dependent resistance torque, which makes a slight displacement of its Executive body in accordance with the optimal diagram of the third kind. Obtained six equations, with the joint solution of which determines the duration of the four stages of movement of the Executive body of the DC motor with a speed-dependent resistive torque and end values of the rotation angle of the Executive body and its first derivative. For optimal performance the third type of chart when slight movements of the Executive body DC electric drive with speed-dependent torque resistance established area of existence. When you build the dependencies of coordinates of controlled DC drive with speed-dependent resistive torque on the time with slight movements of its Executive body in accordance with the optimal diagram of the third kind used the following software: MATLAB, Mathcad.

Keywords: electric drives; direct current; slight displacement; chart movement; the executive body.

В предыдущей работе разработана оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма при небольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления [1].

Данная работа является продолжением исследований небольших перемещений электропривода (ЭП) постоянного тока (ПТ) с зависящим от скорости моментом сопротивления. Авторами решается задача по определению параметров оптимальной по быстродействию третьего вида диаграммы при небольших перемещениях исполнительного органа (ИО) ЭППТ с зависящим от скорости моментом сопротивления. В данном случае характеристическое уравнение системы ЭППТ с зависящим от скорости моментом сопротивления имеет три корня один нулевой и два комплексных с отрицательной действительной частью [2].

На рисунке 1 и 2 представлены оптимальные по быстродействию третьего вида диаграммы при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления. На рисунке 1 и 2 приняты следующие обозначения:

- U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;
- $I_{я}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;
- φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;
- $\varphi^{(1)}$ – первая производная угла поворота исполнительного органа электродвигателя, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;
- $\varphi^{(2)}$ – вторая производная угла поворота исполнительного органа электродвигателя, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;
- $\varphi^{(3)}$ – третья производная угла поворота исполнительного органа электродвигателя, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$.

Для оптимальной по быстродействию диаграммы третьего вида при небольших перемещениях ИОЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления, состоящей из четырёх этапов, справедливы следующие соотношения:

$$C_M \cdot I_{доп} = M_{со} + K_c \cdot \left[1 - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) - e^{-\xi \cdot \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) \right] \times \\ \times \left[\frac{U_{доп*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{со*}}{C_e C_M} \right] + \frac{J}{T} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\frac{U_{доп*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{со*}}{C_e C_M} \right] \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right); \quad (1)$$

$$\varphi_1 = -\frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot T \cdot \left[\frac{U_{доп*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{со*}}{C_e C_M} \right] \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) + 2\xi T \cdot \left[\frac{U_{доп*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{со*}}{C_e C_M} \right] \times \\ \times e^{-\xi \cdot \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) \cdot t_1 + \varphi_{нач} - 2\xi T \cdot \left[\frac{U_{доп*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{со*}}{C_e C_M} \right]; \quad (2)$$

$$\varphi_1^{(1)} = \left[1 - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_1}{T}} \cdot \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) - e^{-\xi \cdot \frac{t_1}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_1}{T}\right) \right] \cdot \left[\frac{U_{доп*}}{C_e} - \frac{R_{я} M_{со*}}{C_e C_M} \right]; \quad (3)$$

$$\varphi_{кон} = \varphi_1 + \frac{J}{K_c} \cdot \varphi_1^{(1)} + \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{K_c} \cdot \left[2\xi T - \frac{J}{K_c} + t_2 \right] + \left[\frac{J}{K_c} - T \cdot \left(2\xi - \frac{K_c}{J} \cdot T \right) \right] \times \\ \times \left[\frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{K_c} - \varphi_1^{(1)} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_2} + \frac{U_{доп*}}{C_e} \cdot (-t_3 + t_4) - \frac{R_{я} M_{со*}}{C_e C_M} \cdot (t_3 + t_4); \quad (4)$$

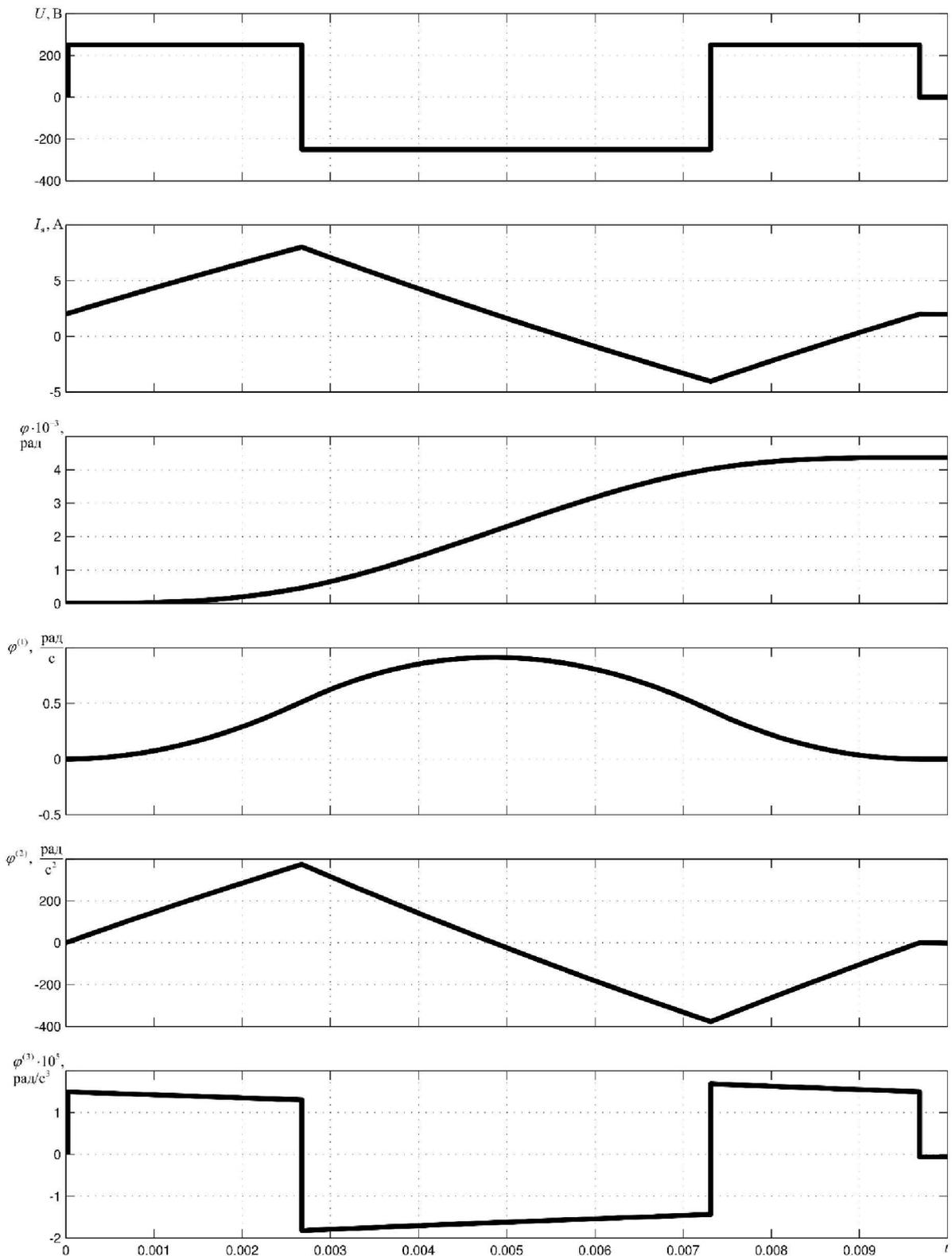


Рисунок 1 – Оптимальная по быстродействию третьего вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления при $\varphi_{зр.1} = 0,004348 \text{ рад}$, $M_{с0} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

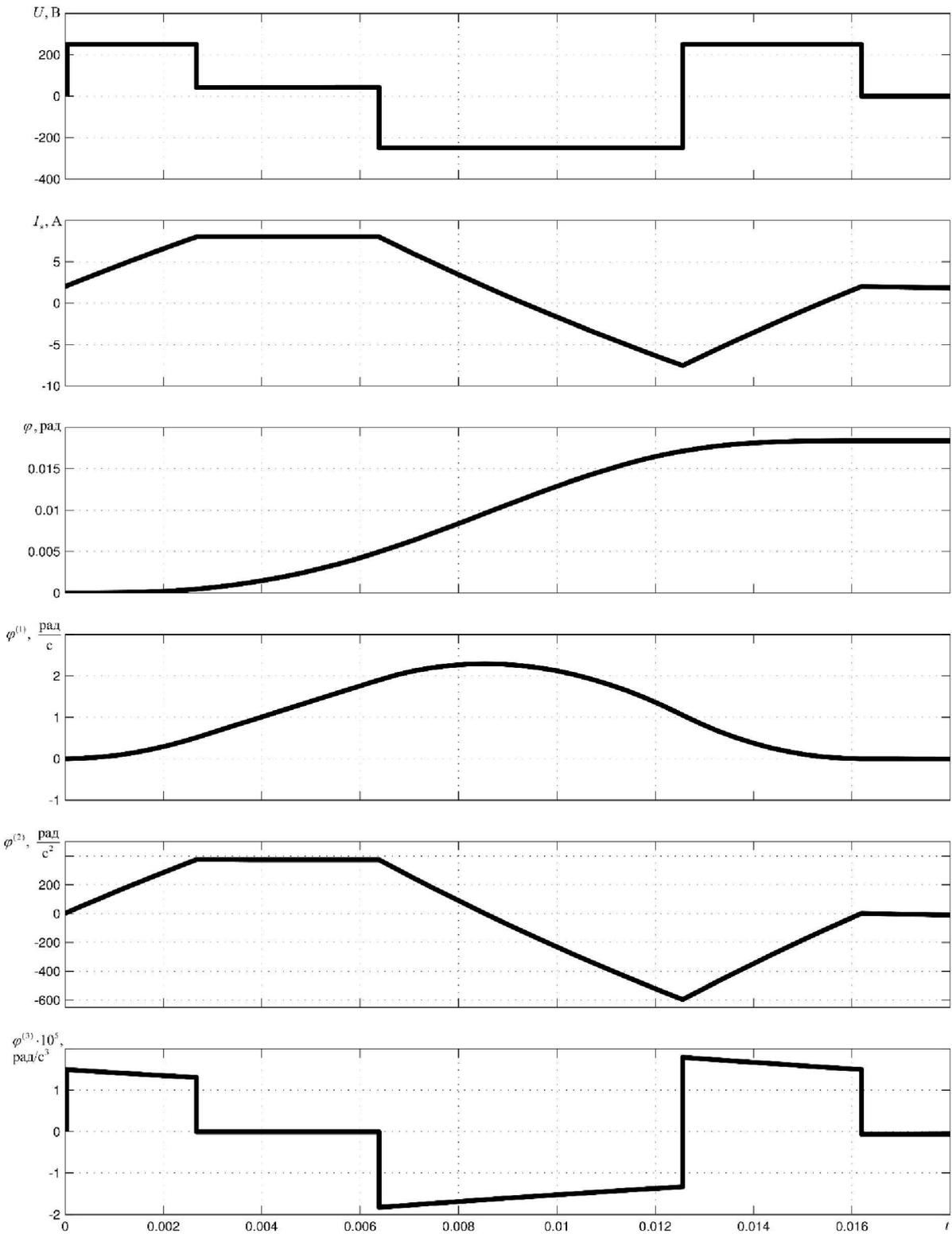


Рисунок 2 – Оптимальная по быстродействию третьего вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления

при $\varphi_{\text{зр.2}} = 0,018385 \text{ рад}$, $M_{\text{со}} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{(1-2\xi^2) \cdot \left(2\xi - \frac{K_c}{J} \cdot T \right) + \frac{K_c}{J} \cdot T}{2\xi \cdot \sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\varphi_1^{(1)} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_2} + \frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} + \right. \\
 & \left. + \frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \right\} \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_3}{T}} \cdot \cos \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T} \right) + \left\{ \left(2\xi - \frac{K_c}{J} \cdot T \right) \times \right. \\
 & \left. \times \left[\varphi_1^{(1)} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_2} + 2\xi \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} + 2\xi \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \right\} \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_3}{T}} \times \\
 & \times \sin \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T} \right) - 2 \cdot \frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} = 2\xi \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_4}{T}} \cdot \sin \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_4}{T} \right) - \\
 & - \frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \cdot \cos \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_4}{T} \right); \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \frac{(1-2\xi^2) \cdot \left(2\xi - \frac{K_c}{J} \cdot T \right) + \frac{K_c}{J} \cdot T}{2\xi \cdot \sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\varphi_1^{(1)} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_2} + \frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} + \right. \\
 & \left. + \frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \right\} \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_3}{T}} \cdot \sin \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T} \right) - \left\{ \left(2\xi - \frac{K_c}{J} \cdot T \right) \times \right. \\
 & \left. \times \left[\varphi_1^{(1)} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_2} + 2\xi \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} + 2\xi \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \right\} \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_3}{T}} \times \\
 & \times \cos \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_3}{T} \right) + 4\xi \cdot \frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} = 2\xi \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_4}{T}} \cdot \cos \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_4}{T} \right) + \\
 & + \frac{1-2\xi^2}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \cdot e^{-\xi \cdot \frac{t_4}{T}} \cdot \sin \left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_4}{T} \right); \quad (6)
 \end{aligned}$$

где $T = \sqrt{\frac{L_{\text{я}} J}{C_e C_M + R_{\text{я}} K_c}}$; $\xi = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{R_{\text{я}}}{L_{\text{я}}} + \frac{K_c}{J} \right) \cdot \frac{R_{\text{я}} J + L_{\text{я}} K_c}{C_e C_M + R_{\text{я}} K_c}}$; $U_{\text{доп}^*} = U_{\text{доп}} \cdot \frac{C_e C_M}{C_e C_M + R_{\text{я}} K_c}$;

$M_{\text{со}^*} = M_{\text{со}} \cdot \frac{C_e C_M}{C_e C_M + R_{\text{я}} K_c}$; $U_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение напряжения,

приложенного к якорной цепи электродвигателя, В; $I_{\text{доп}}$ – максимально допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А; $M_{\text{со}}$ – постоянный по величине момент сопротивления ЭП Н·м; φ_1 – угол поворота ИО ЭП ПТ в конце первого этапа, рад; $\varphi_1^{(1)}$ – первая производная угла поворота ИО ЭП ПТ в конце первого этапа,

$\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; C_e – 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; C_M – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с; K_c – коэффициент пропорциональности между скоростью и моментом сопротивления электроприво-

да, $\frac{H \cdot c \cdot m}{\text{рад}}$; J – момент инерции исполнительного органа электропривода, кг · м;

t_1 – длительность перемещения ИО ЭП на первый этап, с; t_2 – длительность перемещения ИО ЭП на второй этап, с; t_3 – длительность перемещения ИО ЭП на третий этап, с; t_4 – длительность перемещения ИО ЭП на четвертый этап, с.

Из уравнений 1–6 определяются параметры диаграммы $t_1, \varphi_1, \varphi_1^{(1)}, t_2, t_3$ и t_4 .

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

Из уравнений 1–3 и 5, 6; определяются параметры диаграммы $t_1, \varphi_1, \varphi_1^{(1)}, t_2, t_3$ и t_4 .

Из зависимости 4 определяется первое граничное значение угла поворота $\varphi_{\text{зр.1}}$.

Если $I_{\text{min}} = -I_{\text{доп}}$ то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{зр.2}}$.

При этом справедливо уравнение:

$$-C_M I_{\text{доп}} = M_{\text{со}} + K_c \cdot \left[1 - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{\xi \cdot \frac{t_4}{T}} + \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_4}{T}\right) - e^{\xi \cdot \frac{t_4}{T}} \cdot \cos\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_4}{T}\right) \right] \times \\ \times \left[\frac{U_{\text{доп}*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}*}}{C_e C_M} \right] - \frac{J}{T} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}*}}{C_e C_M} \right] \cdot e^{\xi \cdot \frac{t_4}{T}} + \sin\left(\sqrt{1-\xi^2} \cdot \frac{t_4}{T}\right); \quad (7)$$

Из уравнений 1–3 и 5–7; определяются параметры диаграммы $t_1, \varphi, \varphi_1^{(1)}, t_2, t_3, t_4$.

Из зависимости 4 определяется второе граничное значение угла поворота $\varphi_{\text{зр.2}}$.

В данной работе рассматривается ЭППТ с зависящим от скорости моментом сопротивления, который имеет следующие параметры и ограничения контролируемых координат: $C_e = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с/рад}$; $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$; $R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}$; $L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}$; $J = 0,02 \text{ кг} \cdot \text{м}$; $U_{\text{доп}} = 250 \text{ В}$;

$I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}$; $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию третьего вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭППТ с зависящим от скорости моментом сопротивления при $\varphi_{\text{зр.1}} = 0,004348 \text{ рад}$, $M_{\text{со}} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

При этом длительности интервалов времени имеют следующие значения:

$$t_1 = 0,002673 \text{ с}; t_2 = 0 \text{ с}; t_3 = 0,004632; t_4 = 0,002368 \text{ с}.$$

На рисунке 2 представлена оптимальная по быстродействию третьего вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления при $\varphi_{\text{зр.2}} = 0,018385 \text{ рад}$, $M_{\text{со}} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

При этом длительности интервалов времени имеют следующие значения:

$$t_1 = 0,002673 \text{ с}; t_2 = 0,003710 \text{ с}; t_3 = 0,006176; t_4 = 0,003631 \text{ с}.$$

Для данной системы ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления угол поворота ИО и его первая производная имеют следующие значения:

$$\varphi_1 = 0,000462 \text{ рад}; \varphi_1^{(1)} = 0,512284 \text{ рад}.$$

Установлена область существования оптимальной по быстродействию третьего вида диаграммы при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления: $\varphi_{\text{зр.1}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \varphi_{\text{зр.2}}$.

Вывод

Разработан алгоритм, позволяющий определять параметры оптимальных по быстродействию диаграмм третьего вида при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления.

Литература:

1. Добробаба Ю.П. Определение параметров оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы пренебольших перемещениях исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Научные труды КубГТУ. – 2017. – № 4. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1597>
2. Добробаба Ю.П. Оптимальное по быстродействию управление малыми перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления / Ю.П. Добробаба, Г.А. Кошкин, Н.Я. Прохоренко // Технические и технологические системы : Материалы восьмой международной научной конференции «ТТС-16» (24–26 ноября 2016 года) ФГБОУ ВО «КубГТУ», КВВАУЛ им. А.К. Серова; под общей редакцией Б.Х. Гайтова. – Краснодар : Издательский Дом -Юг, 2016. – 109–114 с.

References:

1. Dobrobab Yu.P. Determination of parameters of the chart, optimum on speed of the first look, the prinebolshikh movements of executive body of the electric drive of a direct current with resistance moment depending on speed / Yu.P. Dobrobab, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Scientific works of KubGTU. – 2017. – No. 4. – URL : <http://ntk.kubstu.ru/file/1597>
2. Dobrobab Yu.P. Management of small movements of executive body of the electric drive of a direct current, optimum on speed, with resistance moment depending on speed / Yu.P. Dobrobab, G.A. Koshkin, N.Ya. Prokhorenko // Technical and technological systems : Materials of the eighth international scientific TTS-16 conference (on November 24–26, 2016) FGBOOU WAUGH of «KubGTU», KVVAUL of A.K. Serov; under the general editorial office B.H. Gaytova. – Krasnodar : Izdatelsky Dom – Yug, 2016. – 109–114 p.