

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
ПЕРВОГО ВИДА ДИАГРАММЫ ПРИ НЕБОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ
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*

Оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма для небольших перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления состоит из четырёх этапов. 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 первого 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 первого 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 первого вида использовано цифровое моделирование.

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

В настоящее время разработаны оптимальные по быстродействию первого вида диаграммы перемещения исполнительного органа (ИО) электропривода (ЭП) постоянного тока (ПТ) с постоянным моментом сопротивления при локальных ограничениях [1]. В статьях [2-4] предложены алгоритмы для определения параметров оптимальных по быстродействию трёх видов диаграмм при малых перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления.

В данной работе авторами решается задача по определению параметров оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы для небольших перемещений ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления.

При этом характеристическое уравнение системы ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления имеет три корня один нулевой и два отрицательных неравных по величине корня [5].

На рис. 1 и 2 представлены оптимальные по быстродействию первого вида диаграммы для небольших перемещений ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления. На рис. 1 и 2 приняты следующие обозначения:

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

$I_{\text{я}}$ – 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, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$.

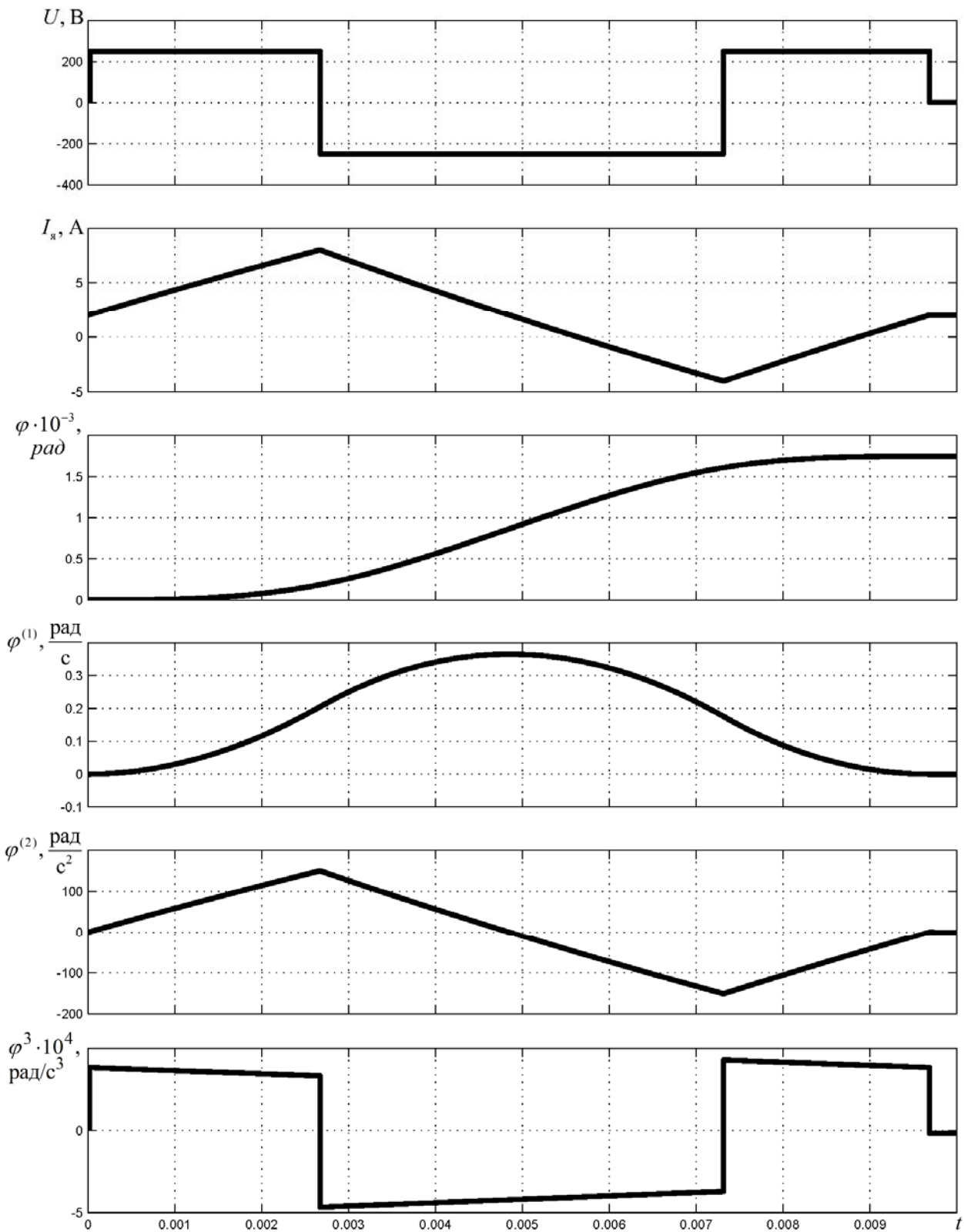


Рисунок 1 - Оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления при $\varphi_{гр.1} = 0,001745$ рад, $M_{со} = 2,5$ Н·м; $K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

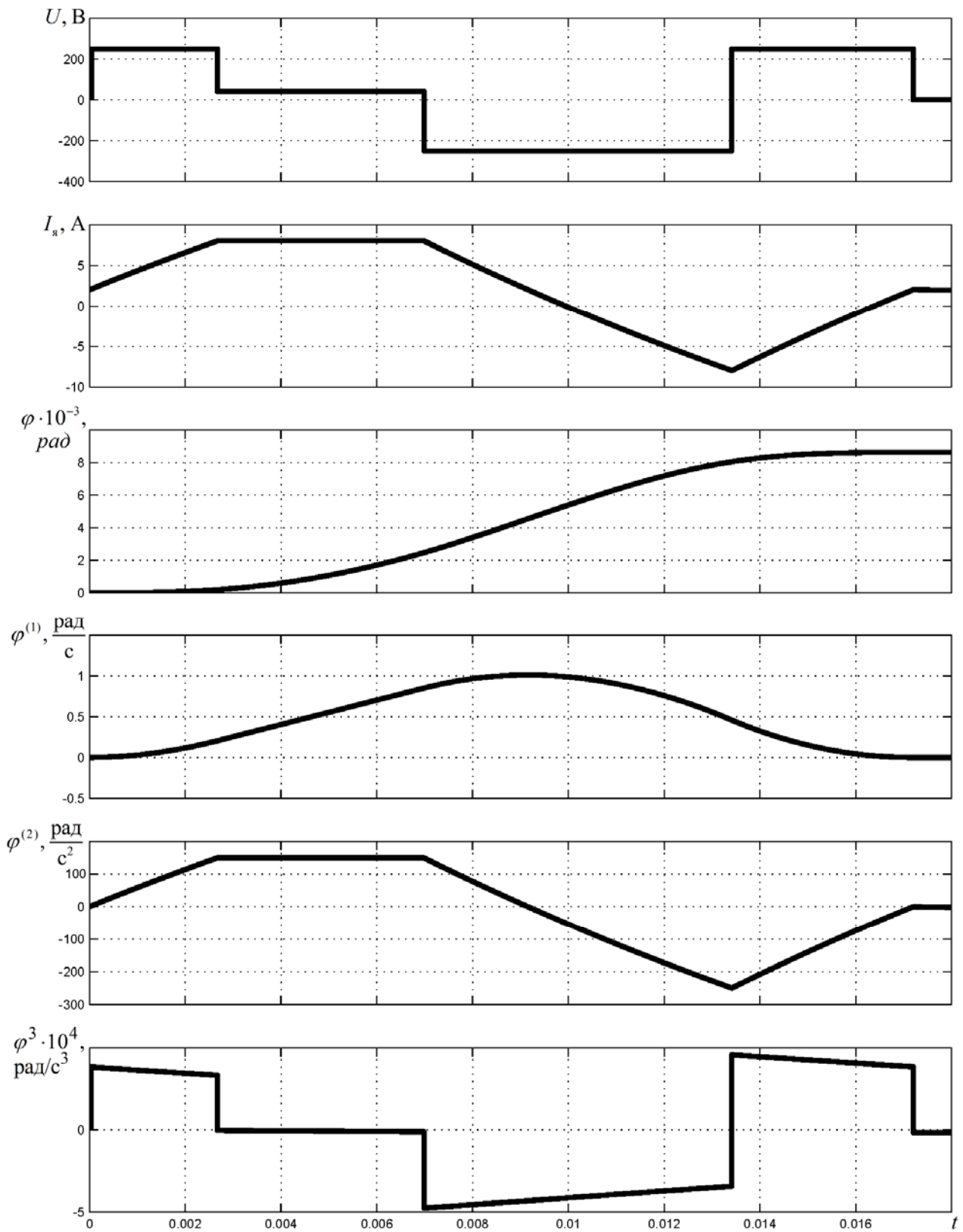


Рисунок 2 - Оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления при $\varphi_{гр,2} = 0,008617$ рад, $M_{co} = 2,5$ Н·м; $K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

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

$$C_M \cdot I_{\text{доп}} = M_{\text{со}} + K_c \cdot \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] + \frac{J}{T_1 - T_2} \cdot \left[e^{\frac{t_1}{T_1}} - e^{\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right]; \quad (1)$$

$$\varphi_1 = \left[\frac{T_1^2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} - \frac{T_2^2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] + \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \cdot t_1 + \varphi_{\text{нач}} - (T_1 + T_2) \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right]; \quad (2)$$

$$\varphi_1^{(1)} = \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t_1}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right]; \quad (3)$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_1 + \frac{J}{K_c} \cdot \varphi_1^{(1)} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \cdot \left[(T_1 + T_2) - \frac{J}{K_c} + t_2 \right] + \left[\frac{J}{K_c} - (T_1 + T_2) + \frac{K_c}{J} \cdot T_1 T_2 \right] \cdot \left[\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} - \varphi_1^{(1)} \right] \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_2}{J}} + \frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} \cdot (-t_3 + t_4) - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \cdot (t_3 + t_4); \quad (4)$$

$$\left\langle 2 \cdot \frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \left\{ \left[1 - \frac{K_c}{J} \cdot T_2 \right] \cdot \left[\varphi_1^{(1)} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_2}{J}} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} + \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \right\} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_1}} \right\rangle \cdot e^{-\frac{t_4}{T_1}} = \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right]; \quad (5)$$

$$\left\langle 2 \cdot \frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \left\{ \left[1 - \frac{K_c}{J} \cdot T_1 \right] \cdot \left[\varphi_1^{(1)} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c \cdot t_2}{J}} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{K_c} + \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} + \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] \right\} \cdot e^{-\frac{t_3}{T_2}} \right\rangle \cdot e^{-\frac{t_4}{T_2}} = \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right], \quad (6)$$

где
$$T_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\text{я}}J + L_{\text{я}}K_{\text{с}}}{C_{\text{е}}C_{\text{м}} + R_{\text{я}}K_{\text{с}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{(R_{\text{я}}J - L_{\text{я}}K_{\text{с}})^2 - 4L_{\text{я}}JC_{\text{е}}C_{\text{м}}}}{C_{\text{е}}C_{\text{м}} + R_{\text{я}}K_{\text{с}}};$$

$$T_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{R_{\text{я}}J + L_{\text{я}}K_{\text{с}}}{C_{\text{е}}C_{\text{м}} + R_{\text{я}}K_{\text{с}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{(R_{\text{я}}J - L_{\text{я}}K_{\text{с}})^2 - 4L_{\text{я}}JC_{\text{е}}C_{\text{м}}}}{C_{\text{е}}C_{\text{м}} + R_{\text{я}}K_{\text{с}}};$$

$$U_{\text{доп}^*} = U_{\text{доп}} \cdot \frac{C_{\text{е}}C_{\text{м}}}{C_{\text{е}}C_{\text{м}} + R_{\text{я}}K_{\text{с}}};$$

$$M_{\text{со}^*} = M_{\text{со}} \cdot \frac{C_{\text{е}}C_{\text{м}}}{C_{\text{е}}C_{\text{м}} + R_{\text{я}}K_{\text{с}}};$$

$U_{\text{доп}}$ – 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, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

$C_{\text{е}}$ – 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;

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

$K_{\text{с}}$ – коэффициент, пропорциональности между скоростью и моментом сопротивления электропривода $\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$;

J – момент инерции исполнительного органа электропривода, кг·м²;

t_1 – длительность перемещения ИО ЭП за первый этап, с;

t_2 – длительность перемещения ИО ЭП за второй этап, с;

t_3 – длительность перемещения ИО ЭП за третий этап, с;

t_4 – длительность перемещения ИО ЭП за четвертый этап, с.

Из уравнений (1)÷(6) определяются параметры диаграммы t_1 , φ_1 , $\varphi_1^{(1)}$, t_2 , t_3 и t_4 .

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

Из уравнений (1)÷(3) и (5)÷(6); определяются параметры диаграммы t_1 , φ_1 , $\varphi_1^{(1)}$, t_3 , t_4 . Из зависимости (4) определяется первое граничное значение угла поворота $\varphi_{\text{гр.1}}$.

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

При этом справедливо уравнение

$$C_M I_{\text{доп}} = M_{\text{со}} + K_c \cdot \left[1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{\frac{t_4}{T_1}} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{\frac{t_4}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right] + \frac{J}{T_1 - T_2} \cdot \left[e^{\frac{t_4}{T_1}} - e^{\frac{t_4}{T_2}} \right] \cdot \left[\frac{U_{\text{доп}^*}}{C_e} - \frac{R_{\text{я}} M_{\text{со}^*}}{C_e C_M} \right]. \quad (7)$$

Из уравнений (1)÷(3) и (5)÷(7); определяются параметры диаграммы t_1 , φ_1 , $\varphi_1^{(1)}$, t_2 , t_3 , t_4 . Из зависимости (4) определяется второе граничное значение угла поворота $\varphi_{\text{гр.2}}$.

В данной работе рассматривается ЭП ПТ с зависящим от скорости моментом сопротивления, который имеет следующие параметры и ограничения контролируемых координат:

$C_e = 1,25$ В·с/рад; $C_M = 1,25$ В·с; $R_{\text{я}} = 5$ Ом; $L_{\text{я}} = 0,1$ Гн; $J = 0,05$ кг·м²;

$U_{\text{доп}} = 250$ В; $I_{\text{доп}} = 8$ А; $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

На рис. 1 представлена оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости

моментом сопротивления при $\varphi_{гр.1} = 0,001745$ рад, $M_{co} = 2,5$ Н·м;

$$K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

При этом длительности интервалов времени имеют следующие значения:

$$t_1 = 0,002672 \text{ с}; t_2 = 0 \text{ с}; t_3 = 0,004644 \text{ с}; t_4 = 0,002369 \text{ с}.$$

На рис. 2 представлена оптимальная по быстродействию первого вида диаграмма при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ с зависящим от скорости

моментом сопротивления при $\varphi_{гр.2} = 0,008617$ рад, $M_{co} = 2,5$ Н·м;

$$K_c = 0,015625 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}.$$

При этом длительности интервалов времени имеют следующие значения:

$$t_1 = 0,002672 \text{ с}; t_2 = 0,004314 \text{ с}; t_3 = 0,006427 \text{ с}; t_4 = 0,003787 \text{ с}.$$

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

$$\varphi_1 = 0,000184 \text{ рад}; \varphi_1^{(1)} = 0,204817 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

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

Таким образом, разработан алгоритм, позволяющий определять параметры оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения первого вида при небольших перемещениях ИО ЭП ПТ 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.

2. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Прохоренко Н.Я. Определение параметров оптимальной по быстродействию первого вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. - Научные труды КубГТУ, 2016, №12. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1221>.

3. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Прохоренко Н.Я. Определение параметров оптимальной по быстродействию второго вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. - Научные труды КубГТУ, 2016, №13. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1265>.

4. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Прохоренко Н.Я. Определение параметров оптимальной по быстродействию третьего вида диаграммы для малых перемещений исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. - Научные труды КубГТУ, 2016, №15. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1288>.

5. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Прохоренко Н.Я. Оптимальное по быстродействию управление малыми перемещениями исполнительного органа электропривода постоянного тока с зависящим от скорости моментом сопротивления. 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. Dobrobaba Yu.P., Prokhorenko D.S. Razrabotka optimalnykh po bystrodeystviyu diagramm peremeshcheniya elektroprivodov s uchetom vliyaniya induktivnostey yakornykh tsepey elektrodvigateley pri lokalnykh ogranicheniyakh [Tekst] / Yu.P. Dobrobaba, D.S. Prokhorenko // Izvestiya vysshikh uchebnykh

zavedeniy «Pishchevaya tekhnologiya» - Krasnodar: Izd. «KubGTU», 2007. – s. 60-64.

2. Dobrobaba YU.P., Koshkin G.A., Prokhorenko N.YA. Opredelenie parametrov optimalnoj po bystrodejstviju pervogo vida diagrammy dlja malyh peremeshhenij ispolnitelnogo organa jelektroprivoda postojannogo toka s zavisjashhim ot skorosti momentom - Nauchnye trudy KubGTU, 2016, №12. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1221>.

3. Dobrobaba YU.P., Koshkin G.A., Prokhorenko N.YA. Opredelenie parametrov optimalnoj po bystrodejstviju vtorogo vida diagrammy dlja malyh peremeshhenij ispolnitelnogo organa jelektroprivoda postojannogo toka s zavisjashhim ot skorosti momentom - Nauchnye trudy KubGTU, 2016, №13. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1265>. <http://ntk.kubstu.ru/file/1541>.

4. Dobrobaba YU.P., Koshkin G.A., Prokhorenko N.YA. Opredelenie parametrov optimalnoj po bystrodejstviju tretogo vida diagrammy dlja malyh peremeshhenij ispolnitelnogo organa jelektroprivoda postojannogo toka s zavisjashhim ot skorosti momentom - Nauchnye trudy KubGTU, 2016, №13. URL: <http://ntk.kubstu.ru/file/1288>.

5. Dobrobaba YU.P., Koshkin G.A., Prokhorenko N.YA. Optimalnoe po bystrodeystviyu upravlenie malymi peremeshcheniyami ispolnitelnogo organa elektroprivoda postoyannogo toka s zavisyashchim ot skorosti momentom soprotivleniya. Technical and technological systems : Materials of the eighth international scientific TTS-16 conference (on November 24–26, 2016) / FGBOU VO «KUBGTU», KVVAUL of A.K. Serov; under the general editorial office B.H. Gaytova. – Krasnodar : Publishing House – South, 2016. – 109-114 p. URL: http://www.id-yug.com/images/id-yug/Book_id-yug/464-f.pdf.

DEFINITION OF PERFORMANCE OF THE TIME-OPTIMAL THIRD TYPE OF DIAGRAMS FOR SHIFTING MOVEMENTS OF THE ACTUATING DEVICE OF THE DC MOTOR WITH SPEED-DEPENDENT RESISTANT 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*

Time-optimal first type of diagram of the shifting movement of the actuating device of the DC motor with speed-dependent resistant torque is comprised of four stages. For four stages analytical dependences of controlled coordinates of the DC motor with speed-dependent resistant torque, which make up shifting movements of the actuating device according to time-optimal first type of diagram, are determined. Six equations are deduced, the solution of which determines duration of the four stages of the actuating device and final value of the rotational displacement and its first-order derivative. For time-optimal first type of diagram for shifting movements of the actuating device of the DC motor with speed-dependent resistant torque there set the area of existence. By the results of digital simulation there are built dependences of controlled coordinates of the DC motor with speed-dependent resistant torque for shifting movements of the actuating device according to time-optimal first type of diagram.

Key words: electric drive; direct current; shifting movements; diagram of movement; actuating device.