

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

01.00.00 Физико-математические науки

Physics and Math

**ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ
ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
ПОСТОЯННОГО ТОКА С УПРУГИМ
ВАЛОПРОВОДОМ С ОГРАНИЧЕНИЯМИ
МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТОКА И
ПЯТОЙ ПРОИЗВОДНОЙ СКОРОСТИ**

**THE TIME-OPTIMAL DIAGRAM OF
MOVEMENT OF THE EXECUTIVE BODY OF
THE PRECISION DIRECT CURRENT MOTOR
WITH ELASTIC SHAFTING WITH
CONSTRAINTS OF MAXIMUM CURRENT AND
THE FIFTH DERIVATIVE OF THE SPEED**

Добробаба Юрий Петрович
к.т.н., профессор
*Кубанский государственный технологический
университет, 350002, г. Краснодар, Россия*

Dobrobaba Yuriy Petrovich
Cand.Tech.Sci., professor
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

Кошкин Гордей Анатольевич
к.т.н.
*ООО «Прогресс», 350059, Россия, г. Краснодар, ул.
Новороссийская, д.238 стр.1*

Koshkin Gordey Anatolievich
Cand.Tech.Sci.
ООО «Progress», Krasnodar, Russia

Громницкий Евгений Евгеньевич
Магистрант
*Кубанский государственный технологический
университет, 350002, г. Краснодар, Россия*

Gromnitskiy Evgeniy Evgenievich
Postgraduate
*Kuban State Technological University, Krasnodar,
Russia*

Разработана оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости. Для определения параметров оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости составлен алгоритм. Установлена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости. По результатам численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода от заданного перемещения (угла поворота) при различных значениях пятой производной скорости

The time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constraints of maximum current and the fifth derivative of the speed has been designed. The algorithm has been developed to determine the parameters of the time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constraints of maximum current and the fifth derivative of the speed. The region of existence of the time-optimal diagram of movement of the executive body of the precision DC drive with elastic shafting with constraints of maximum current and the fifth derivative of the speed has been set. According to the results of the numeral experiment, the dependences of the duration of the cycle of movement of the executive body of the drive from prescribed displacement (rotation angle) for different values of the fifth derivative of the speed have been plotted

Ключевые слова: УПРУГИЙ ВАЛОПРОВОД, ОПТИМАЛЬНОЕ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА, ОГРАНИЧЕНИЕ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕНИЮ ТОКА

Keywords: ELASTIC SHAFTING, TIME-OPTIMAL DIAGRAM OF MOVEMENT OF THE EXECUTIVE BODY OF THE PRECISION DIRECT CURRENT MOTOR, CONSTRAINTS OF MAXIMUM CURRENT

Doi: 10.21515/1990-4665-134-044

В настоящее время разработаны тридцать два вида оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом [1].

Найдены параметры оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом и определены условия, при выполнении которых существует каждая из тридцати двух оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

Из тридцати двух оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом сформированы шестнадцать групп [1].

Основным достоинством рассматриваемых тридцати двух оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода является простота их реализации, так как для вычисления параметров диаграмм используются простые аналитические зависимости.

Это достоинство получено за счёт разработки тридцати двух оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода в симметричном исполнении. При реализации такого решения в диаграммах пятой, шестой, восьмой, девятой, одиннадцатой, двенадцатой, пятнадцатой, шестнадцатой, двадцатой, двадцать первой, двадцать третьей, двадцать четвертой, двадцать седьмой, двадцать восьмой, тридцатой и тридцать первой не полностью используются возможности электропривода в достижении максимально возможной интенсивности при торможении [2-4].

Для устранения данного недостатка целесообразно использовать оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода в несимметричном исполнении. При этом в прецизионном электроприводе постоянного тока с упругим ва-

лопроводом вместо ограничения по первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода необходимо использовать ограничения по току якорной цепи электропривода.

Предлагается для управления прецизионным электроприводом постоянного тока с упругим валопроводом использовать оптимальную по быстродействию диаграмму перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода, имеющую ограничение пятой производной угловой скорости и разработать группу оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода состоящую из трёх диаграмм:

- с ограничениями максимального значения тока и пятой производной угловой скорости;
- с ограничениями максимального и минимального значений тока и пятой производной угловой скорости;
- с ограничениями максимального и минимального значения тока, скорости и её пятой производной.

В данной работе разрабатывается оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости, состоящая из двадцати четырех этапов. Длительность первого, третьего, четвертого, шестого, восьмого, десятого, одиннадцатого и тринадцатого этапов равна t_1 ; длительность второго, пятого, девятого и двенадцатого этапов равна $2t_1$; длительность седьмого этапа равна t_2 ; длительность пятнадцатого, восем-

надцатого, девятнадцатого, двадцатого и двадцать третьего этапов равна $2t_3$; длительность четырнадцатого, шестнадцатого, семнадцатого, двадцать первого, двадцать второго и двадцать четвертого этапов равна t_3 . На первом, третьем, пятом, девятом, одиннадцатом, тринадцатом, пятнадцатом, семнадцатом, девятнадцатом, двадцать первом и двадцать третьем этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода $\omega_2^{(5)}$ равна максимальному значению $\omega_{max}^{(5)}$; на втором, четвертом, шестом, восьмом, десятом, двенадцатом, четырнадцатом, шестнадцатом, восемнадцатом, двадцатом, двадцать втором, и двадцать четвертом этапах пятая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода $\omega_2^{(5)}$ равна максимальному значению со знаком «минус» $-\omega_{max}^{(5)}$; на седьмом этапе пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(5)}$ равна нулю. В моменты времени t_1 , $7t_1$, $(11t_1 + t_2)$, $(13t_1 + t_2)$ четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода $\omega_2^{(4)}$ равна максимальному значению $\omega_{max}^{(4)}$; в моменты времени $3t_1$, $5t_1$, $(9t_1 + t_2)$, $(15t_1 + t_2)$ четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода $\omega_2^{(4)}$ равна максимальному значению со знаком «минус» $-\omega_{max}^{(4)}$; в моменты времени $(16t_1 + t_2 + t_3)$, $(16t_1 + t_2 + 7t_3)$, $(16t_1 + t_2 + 11t_3)$, $(16t_1 + t_2 + 13t_3)$ четвертая производная угловой скорости исполнительного органа прецизионного электропривода $\omega_2^{(4)}$ равна минимальному значению $\omega_{min}^{(4)}$; в моменты времени $(16t_1 + t_2 + 3t_3)$, $(16t_1 + t_2 + 5t_3)$, $(16t_1 + t_2 + 9t_3)$, $(16t_1 + t_2 + 15t_3)$ четвертая производная угловой скорости исполнительного органа преци-

зионного электропривода $\omega_2^{(4)}$ равна минимальному значению со знаком «минус» $-\omega_{min}^{(4)}$; на седьмом этапе четвертая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(4)}$ равна нулю. В моменты времени $2t_1$ и $(14t_1 + t_2)$ третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(3)}$ достигает максимального значения $\omega_{max}^{(3)}$; в моменты времени $6t_1$ и $(10t_1 + t_2)$ третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(3)}$ достигает максимального значения со знаком «минус» $-\omega_{max}^{(3)}$; в моменты времени $(16t_1 + t_2 + 2t_3)$ и $(16t_1 + t_2 + 14t_3)$ третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(3)}$ достигает минимального значения $\omega_{min}^{(3)}$; в моменты времени $(16t_1 + t_2 + 6t_3)$ и $(16t_1 + t_2 + 10t_3)$ третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(3)}$ достигает минимального значения со знаком «минус» $-\omega_{min}^{(3)}$; на седьмом этапе третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(3)}$ равна нулю. В момент времени $4t_1$ вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(2)}$ достигает максимального значения $\omega_{max}^{(2)}$; в момент времени $(12t_1 + t_2)$ вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(2)}$ достигает максимального значения со знаком «минус» $-\omega_{max}^{(2)}$; в момент времени $(16t_1 + t_2 + 4t_3)$ вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(2)}$ достигает минимального значения $\omega_{min}^{(2)}$; в мо-

мент времени $(16t_1 + t_2 + 12t_3)$ вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(2)}$ достигает минимального значения со знаком «минус» $-\omega_{min}^{(2)}$; на седьмом этапе вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(2)}$ равна нулю. На седьмом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(1)}$ равна первому максимально допустимому значению $\omega_{доп.1}^{(1)}$ (ток якорной цепи электропривода $I_{я}$ равен максимально допустимому значению $I_{доп}$); в момент времени $(16t_1 + t_2 + 8t_3)$ первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(1)}$ достигает минимального значения $\omega_{min}^{(1)}$. В момент времени $(16t_1 + t_2)$ угловая скорость исполнительного органа электропривода ω_2 достигает максимального значения ω_{max} . За время цикла $T_{ц} = (16t_1 + t_2 + 16t_3)$ угол поворота исполнительного органа прецизионного электропривода увеличивается от начального значения угла поворота $\varphi_{нач}$ до конечного значения $\varphi_{кон}$.

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости справедливы следующие соотношения:

$$\omega_{max}^{(4)} = \omega_{max}^{(5)} \cdot t_1; \quad (1)$$

$$\omega_{max}^{(3)} = \omega_{max}^{(4)} \cdot t_1 = \omega_{max}^{(5)} \cdot t_1^2; \quad (2)$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2\omega_{max}^{(3)} \cdot t_1 = 2\omega_{max}^{(5)} \cdot t_1^3; \quad (3)$$

$$\omega_{доп.1}^{(1)} = 4\omega_{max}^{(2)} \cdot t_1 = 8\omega_{max}^{(5)} \cdot t_1^4; \quad (4)$$

$$\omega_{max} = \omega_{доп.1}^{(1)} \cdot (8t_1 + t_2) = 8\omega_{max}^{(5)} \cdot t_1^4 \cdot (8t_1 + t_2); \quad (5)$$

$$\omega_{min}^{(4)} = -\omega_{max}^{(5)} \cdot t_3; \quad (6)$$

$$\omega_{min}^{(3)} = \omega_{min}^{(4)} \cdot t_3 = \omega_{min}^{(5)} \cdot t_3^2; \quad (7)$$

$$\omega_{min}^{(2)} = 2\omega_{min}^{(3)} \cdot t_3 = -2\omega_{max}^{(5)} \cdot t_3^3; \quad (8)$$

$$\omega_{min}^{(1)} = 4\omega_{min}^{(2)} \cdot t_3 = -8\omega_{max}^{(5)} \cdot t_3^4; \quad (9)$$

$$\omega_{max} = -8\omega_{min}^{(1)} \cdot t_3 = 64\omega_{max}^{(5)} \cdot t_3^5; \quad (10)$$

$$\varphi_{кон} = \varphi_{нач} + \omega_{max} \cdot (8t_1 + \frac{1}{2}t_2 + 8t_3); \quad (11)$$

$$T_{ц} = 16t_1 + t_2 + 16t_3; \quad (12)$$

$$C_M I_{доп} = M_{со} + J\omega_{доп.1}^{(1)}; \quad (13)$$

$$-C_M I_{доп} = M_{со} - J\omega_{доп.2}^{(1)}, \quad (14)$$

где C_M – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, В·с;

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

$\omega_{доп.2}^{(1)}$ – второе максимально допустимое значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$.

Из зависимостей (13) и (14) следует, что

$$\omega_{доп.1}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{J}; \quad (15)$$

$$\omega_{доп.2}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} + M_{со}}{J}. \quad (16)$$

Из зависимости (4) следует, что

$$t_1 = 4\sqrt[4]{\frac{1}{8} \frac{\omega_{доп.1}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}}. \quad (17)$$

Из зависимостей (5), (10) и (11) следует, что

$$t_3^{10} + 2t_1^4 t_3^6 + t_1^5 t_3^5 - \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{256\omega_{\text{max}}^{(5)}} \cdot t_1^4 = 0; \quad (18)$$

$$t_2 = 8 \cdot \frac{t_3^5}{t_1^4} - 8t_1. \quad (19)$$

Если длительность седьмого этапа t_2 равна нулю, то угол поворота исполнительного органа электропривода ($\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}$) равен первому граничному значению $\varphi_{\text{гр.1}}$.

Если минимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_2^{(1)}$ равно второму максимально допустимому значению первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, взятому со знаком «минус», $-\omega_{\text{доп.2}}^{(1)}$ (при этом ток якорной цепи электропривода равен максимально допустимому значению, взятому со знаком «минус» $-I_{\text{доп}}$), то угол поворота исполнительного органа электропривода ($\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}$) равен второму граничному значению $\varphi_{\text{гр.2}}$.

Область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и четвёртой производной скорости:

$$\varphi_{\text{гр.1}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) \leq \varphi_{\text{гр.2}}, \quad (20)$$

где
$$\varphi_{\text{гр.1}} = \omega_{\text{доп.1}}^{(1)} \cdot \sqrt{2048 \cdot \frac{\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(5)}}};$$

$$\varphi_{гр.2} = 32\omega_{доп.2}^{(1)} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} \times$$

$$\times \left[\sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.1}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} + \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{доп.1}^{(1)}} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} + 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(5)}}} \right].$$

С целью определения зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода $T_{ц}$ от заданного перемещения (угла поворота) $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_{max}^{(5)}$.

проведен численный эксперимент.

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:

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

где C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью электродвигателя и его ЭДС;

$L_{я}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя.

На координаты электропривода накладываются ограничения: по максимально допустимому значению напряжения $U_{доп} = 250 \text{ В}$; по максимально допустимому значению тока $I_{доп} = 8 \text{ А}$; по максимально допустимому значению угловой скорости $\omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}$.

Момент сопротивления электропривода постоянного тока с упругим валопроводом равняется $M_{со} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Определим максимально допустимые значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода:

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 - 5}{0,05} = 100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$$

$$\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 + 5}{0,05} = 300 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Первая серия численного эксперимента. Пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равняется

$$\omega_{\text{max}}^{(5)} = 512000000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}.$$

$$\varphi_{\text{гр.1}} = 100 \cdot \sqrt{2048 \cdot \frac{100}{512000000}} = 2 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{гр.2}} = 32 \cdot 300 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} \times$$

$$\times \left[\sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \left[\frac{100}{512000000} \right]} + \frac{300}{100} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} + 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{512000000}} \right] =$$

$$= \frac{3}{2} \cdot \sqrt[4]{3} \cdot (5 \cdot \sqrt[4]{3} + 1) \approx 14,964 \text{ рад}.$$

В таблице 1 приведены результаты первой серии численного эксперимента.

Таблица 1

$\Delta\varphi, \text{рад}$	$t_2, \text{с}$	$t_3, \text{с}$	$T_{\text{ц}}, \text{с}$	$\omega_{\text{max}},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\text{min}}^{(4)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$	$\omega_{\text{min}}^{(3)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$	$\omega_{\text{min}}^{(2)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	$\omega_{\text{min}}^{(1)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
2	0	0,0125	0,4	10	-6400000	-80000	-2000	-100
4	0,0647	0,0138	0,4857	16,4710	-7071705	-97673,9	-2698,1	-149,07
6	0,1177	0,0146	0,5513	21,7659	-7477139	-109194,6	-3189,3	-186,30
8	0,1638	0,0152	0,6066	26,3771	-7770079	-117918,2	-3579	-217,26
10	0,2052	0,0156	0,6552	30,5231	-8000292	-125009,1	-3906,7	-244,18
12	0,2433	0,0160	0,6992	34,3250	-8190344	-131019,0	-4191,8	-268,22
14	0,2786	0,0163	0,7396	37,8584	-8352423	-136255,8	-4445,6	-290,09
14,964491	0,2948	0,0165	0,7580	39,4822	-8422874	-138564,1	-4559	-300

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом

имели постоянные значения: $t_1 = 0,0125 \text{ с}$; $\omega_{max}^{(4)} = 6400000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$;

$$\omega_{max}^{(3)} = 80000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}.$$

Вторая серия численного эксперимента. Пятая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равняется

$$\omega_{max}^{(5)} = 32000000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}.$$

$$\varphi_{\text{Гр.1}} = 100 \cdot \sqrt{2048 \cdot \frac{100}{32000000}} = 8 \text{ рад};$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{Гр.2}} = 32 \cdot 300 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} \cdot \left[\sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \left[\frac{100}{32000000} \right]} + \frac{300}{100} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} + \right. \\ \left. + 2 \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{8} \cdot \frac{300}{32000000}} \right] = 6 \cdot \sqrt[4]{3} \cdot (5 \cdot \sqrt[4]{3} + 1) \approx 59,858 \text{ рад}. \end{aligned}$$

В таблице 2 приведены результаты второй серии численного эксперимента.

Таблица 2

$\Delta\varphi$, рад	t_2 , с	t_3 , с	$T_{ц}$, с	ω_{max} , $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{min}^{(4)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$	$\omega_{min}^{(3)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$	$\omega_{min}^{(2)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$	$\omega_{min}^{(1)}$, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
8	0	0,025	0,8	20	-800000	-20000	-1000	-100
10	0,0356	0,0258	0,8489	23,5595	-826641	-21354,2	-1103,3	-114,00
15	0,1148	0,0274	0,9528	31,4846	-875999	-23980,5	-1312,9	-143,77
20	0,1845	0,0285	1,0403	38,4487	-911718	-25975,9	-1480,2	-168,69
25	0,2475	0,0294	1,1174	44,7476	-939805	-27601,1	-1621,2	-190,45
30	0,3055	0,0301	1,1870	50,5483	-962998	-28980,2	-1744,2	-209,96
35	0,3596	0,0307	1,2510	55,9571	-982777	-30182,8	-1853,9	-227,75
40	0,4105	0,0313	1,3105	61,0463	-1000036	-31252,3	-1953,3	-244,18
45	0,4587	0,0317	1,3664	65,8683	-1015358	-32217,3	-2044,5	-259,49
50	0,5046	0,0322	1,4192	70,4624	-1029143	-33097,9	-2128,9	-273,87
55	0,5486	0,0326	1,4694	74,8590	-1041676	-33909,1	-2207,6	-287,46
59,858	0,5896	0,0329	1,5161	78,9644	-1052859	-34641,0	-2279,5	-300

При этом остальные параметры диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом имели постоянные значения: $t_1 = 0,025\text{ с}$; $\omega_{max}^{(4)} = 800000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$;

$$\omega_{max}^{(3)} = 20000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 1000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}.$$

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости, которая имеет следующие параметры:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 6 \text{ рад}; \quad T_{ц} = 0,551\text{ с}; \quad t_1 = 0,0125\text{ с}; \quad t_2 = 0,1177\text{ с}; \quad t_3 = 0,0146\text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(5)} = 512000000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}; \quad \omega_{max}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}; \quad \omega_{max}^{(3)} = 80000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{рад}{с^3};$$

$$\omega_{доп.1}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2}; \omega_{max} = 21,7659 \frac{рад}{с}; \omega_{min}^{(4)} = -7477139 \frac{рад}{с^5};$$

$$\omega_{min}^{(3)} = -109194,6 \frac{рад}{с^4}; \omega_{min}^{(2)} = -3189,3 \frac{рад}{с^3}; \omega_{min}^{(1)} = -186,3 \frac{рад}{с^2}.$$

На рисунке 2 на основании результатов проведённого численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода $T_{ц}$ от заданного перемещения (угла поворота) $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_{max}^{(5)}$.

Выводы

Предложена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости, состоящая из двадцати четырех этапов.

Разработано математическое обеспечение для определения параметров оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости.

Установлена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости.

Построены зависимости координат прецизионного электропривода от времени при его перемещении в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями максимального значения тока и пятой производной скорости.

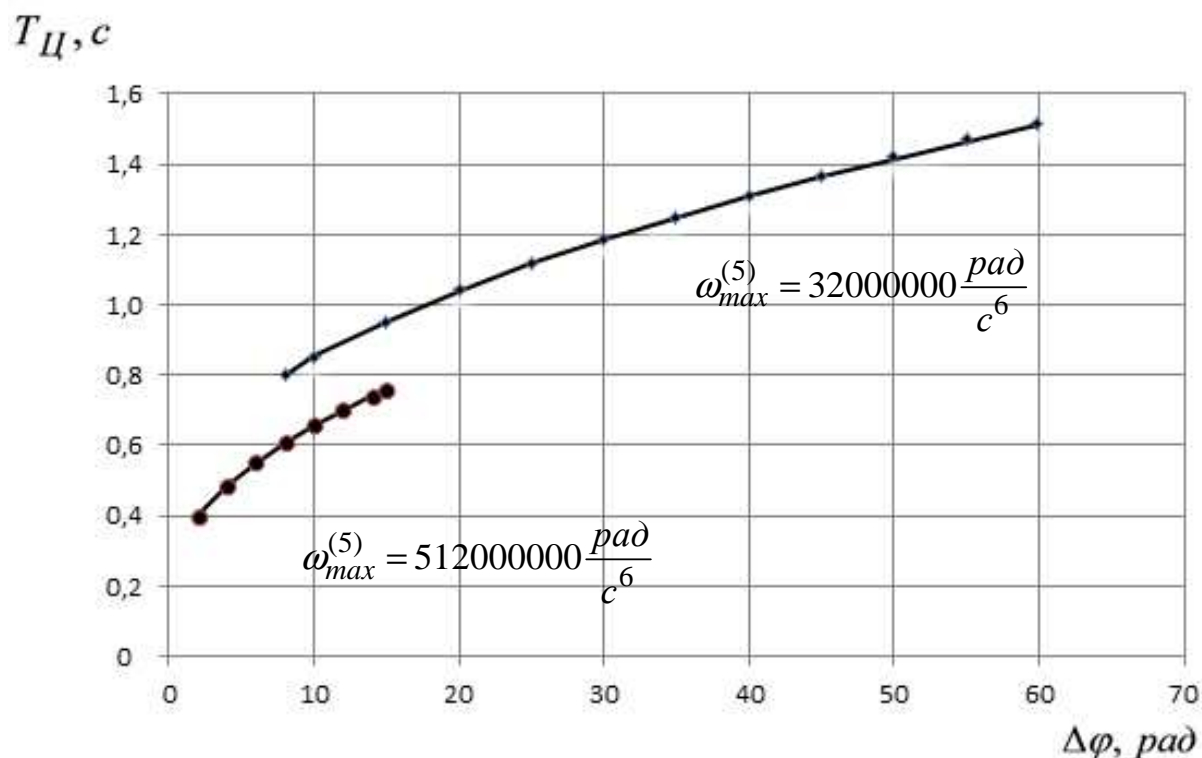


Рисунок 2– Графики зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода $T_{ц}$ от заданного перемещения (угла поворота) $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ при различных максимальных значениях пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega_{max}^{(5)}$.

Литература

1. Дობробаба Ю.П. Оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом. / Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Громницкий Е.Е. // Булатовские чтения Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 41-43.

2. Дობробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничением пятой производной скорости. / Дობробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Громницкий Е.Е. // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 44-47.

3. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по первой и пятой производным скорости. / Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Громницкий Е.Е. // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 48-51.

4. Добробаба Ю.П. Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и ее первой и пятой производным скорости. / Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Громницкий Е.Е. // Булатовские чтения : Материалы Международной научно-практической конференции (31 марта 2017 г.) : в 5 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг. Т. 5: Электрооборудование в нефтегазовой отрасли. Гуманитарные науки. – 2017. – 294 с. С. 52-55.

References

1. Dobrobaba Yu.P. Optimalnyie po byistrodeystviyu diagrammyi peremescheniya ispolnitelnogo organa pretsizionnogo elektroprivoda postoyannogo toka s uprugim valoprovodom. / Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Gromnitskiy E.E. // Bulatovskie chteniya Materialyi Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (31 marta 2017 g.) : v 5 t. : sbornik statey / pod obsch. red. d-ra tehn. nauk, prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Izdatelskiy Dom – Yug. T. 5: Elektrooborudovanie v neftegazovoy otrasli. Gumanitarnyye nauki. – 2017. – 294 s. S. 41-43.

2. Dobrobaba Yu.P. Optimalnaya po byistrodeystviyu diagramma peremescheniya ispolnitelnogo organa pretsizionnogo elektroprivoda postoyannogo toka s uprugim valoprovodom s ogranicheniem pyatoy proizvodnoy skorosti. / Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Gromnitskiy E.E. // Bulatovskie chteniya : Materialyi Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (31 marta 2017 g.) : v 5 t. : sbornik statey / pod obsch. red. d-ra tehn. nauk, prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Izdatelskiy Dom – Yug. T. 5: Elektrooborudovanie v neftegazovoy otrasli. Gumanitarnyye nauki. – 2017. – 294 s. S. 44-47.

3. Dobrobaba Yu.P. Optimalnaya po byistrodeystviyu diagramma peremescheniya ispolnitelnogo organa pretsizionnogo elektroprivoda postoyannogo toka s uprugim valoprovodom s ogranicheniyami po pervoy i pyatoy proizvodnyim skorosti. / Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Gromnitskiy E.E. // Bulatovskie chteniya : Materialyi Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (31 marta 2017 g.) : v 5 t. : sbornik statey / pod obsch. red. d-ra tehn. nauk, prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Izdatelskiy Dom – Yug. T. 5: Elektrooborudovanie v neftegazovoy otrasli. Gumanitarnyye nauki. – 2017. – 294 s. S. 48-51.

4. Dobrobaba Yu.P. Optimalnaya po byistrodeystviyu diagramma peremescheniya ispolnitelnogo organa pretsizionnogo elektroprivoda postoyannogo toka s uprugim valoprovodom s ogranicheniyami po skorosti i ee pervoy i pyatoy proizvodnyim skorosti. / Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Gromnitskiy E.E. // Bulatovskie chteniya : Materialyi Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (31 marta 2017 g.) : v 5 t. : sbornik statey / pod obsch. red. d-ra tehn. nauk, prof. O.V. Savenok. – Krasnodar : Izdatelskiy Dom – Yug. T. 5: Elektrooborudovanie v neftegazovoy otrasli. Gumanitarnyye nauki. – 2017. – 294 s. S. 52-55.