

УДК 62.83.52:62.503.56

**СИММЕТРИЧНАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
ПРЕЦИЗИОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ
С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО ТРЕТЬЕЙ, ЧЕТВЁРТОЙ
И ПЯТОЙ ПРОИЗВОДНЫМ СКОРОСТИ**

**SYMMETRIC OPTIMAL PERFORMANCE DIAGRAM OF MOVMENT
THE EXECUTIVE BODY OF THE PRECISION ELECTRIC DRIVE
WITH ELASTIC SHAFTING WITH RESTRICTIONS ON THIRD, FOURTH
AND FIFTH DERIVED SPEED**

Добробаба Юрий Петрович

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

Кошкин Гордей Анатольевич

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

Федин В.С.

Кубанский государственный
технологический университет
fedin@spets-stroy.com

Аннотация. Представлена симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости. Разработан алгоритм для определения параметров симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости. Получены результаты по определению параметров симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости.

Ключевые слова: электропривод, упругий валопровод, симметричная диаграмма, исполнительный орган, прецизионный электропривод, оптимальное по быстродействию перемещение, ограничения по третьей, четвёртой и пятой производным скорости.

Dobrobaba Yury Petrovich

Candidate of technical sciences,
Associate professor,
Professor of department
of power supply industrial enterprises,
Kuban state technological university

Koshkin Gordey Anatolievich

Candidate of technical sciences,
Foreman,
NKU LLS Progress

Fedin V.S.

Kuban state technological university
fedin@spets-stroy.com

Annotation. A symmetric optimal speed diagram of the movement of the Executive body of a precision electric drive with an elastic shaft-water with restrictions on the third, fourth and fifth derivatives of speed is presented. An algorithm is developed to determine the parameters of the symmetric optimal for the speed diagram of the movement of the Executive body of a precision electric drive with an elastic shaft line with restrictions on the third, fourth and fifth derivatives of speed. The results of determination of the parameters of the symmetric optimal speed diagram of movement of the Executive body of a precision electric drive with an elastic shaft line with restrictions on the third, fourth and fifth derivatives of speed are presented.

Keywords: electric drive, elastic shaft, symmetrical diagram, precision electric drive, Executive body, optimal speed of movement, restrictions on the third, fourth and fifth derivatives of speed.

В монографии [1] разработана группа из трех симметричных оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом, у которых отсутствуют ограничения по второй, третьей и четвертой производным скорости.

В монографии [2] разработана группа симметричных оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом, у которых отсутствуют ограничения по третьей и четвертой производным скорости.

В данной статье разработана диаграмма для использования в электроприводах промышленных механизмов, у которых по технологическим требованиям необходимо ограничивать третью, четвертую и пятую производные скорости.

Представленная работа посвящена разработке математического обеспечения, которое позволяет определить параметры симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвертой и пятой производным скорости.

На рисунках 1 и 2 приведена симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвертой и пятой производным скорости, состоящая из двадцати семи этапов. На рисунках приняты следующие обозначения:

φ_2 – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;

ω_2 – угловая скорость исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с}$;

t – время, с;

$\varphi_{нач}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

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

ω_{max} – максимальное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с}$;

$\omega_{max}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с^2}$;

$\omega_{max}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с^3}$;

$\omega_{дон}^{(3)}$ – максимально допустимое значение третьей производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с^4}$;

$\omega_{дон}^{(4)}$ – максимально допустимое значение четвертой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с^5}$;

$\omega_{дон}^{(5)}$ – максимально допустимое значение пятой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с^6}$;

t_1 – длительность первого, третьего, пятого, седьмого, восьмого, десятого, двенадцатого, шестнадцатого, восемнадцатого, двадцатого, двадцать первого, двадцать третьего, двадцать пятого, двадцать седьмого этапов, с;

$2t_1$ – длительность четырнадцатого этапа, с;

t_2 – длительность второго, шестого, девятого, тринадцатого, пятнадцатого, девятнадцатого, двадцать второго, двадцать шестого этапов, с;

t_3 – длительность четвертого, одиннадцатого, семнадцатого, двадцать четвертого этапов, с.

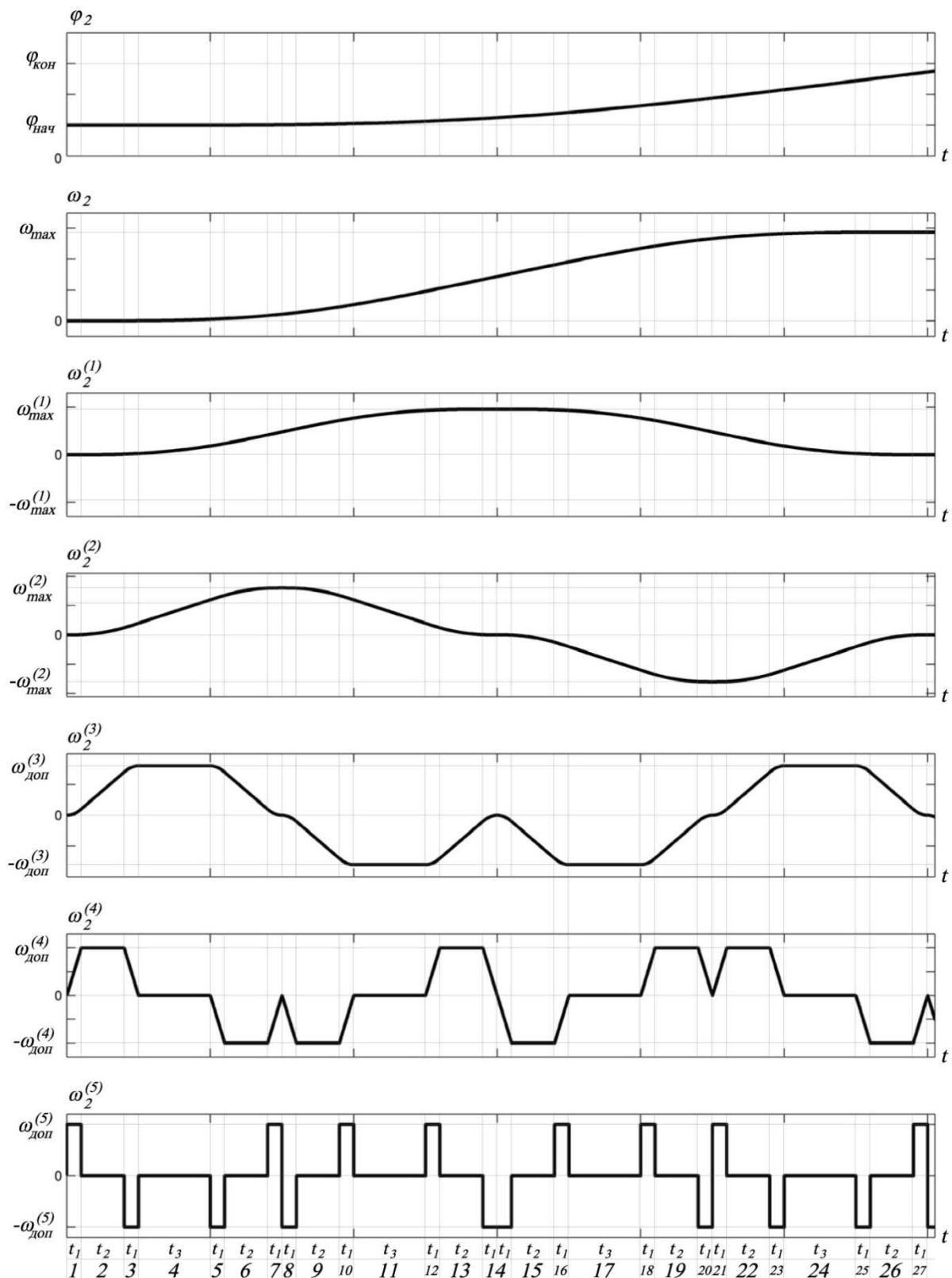


Рисунок 1 – Симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с ограничениями по третьей, четвертой и пятой производным скорости (разгон)

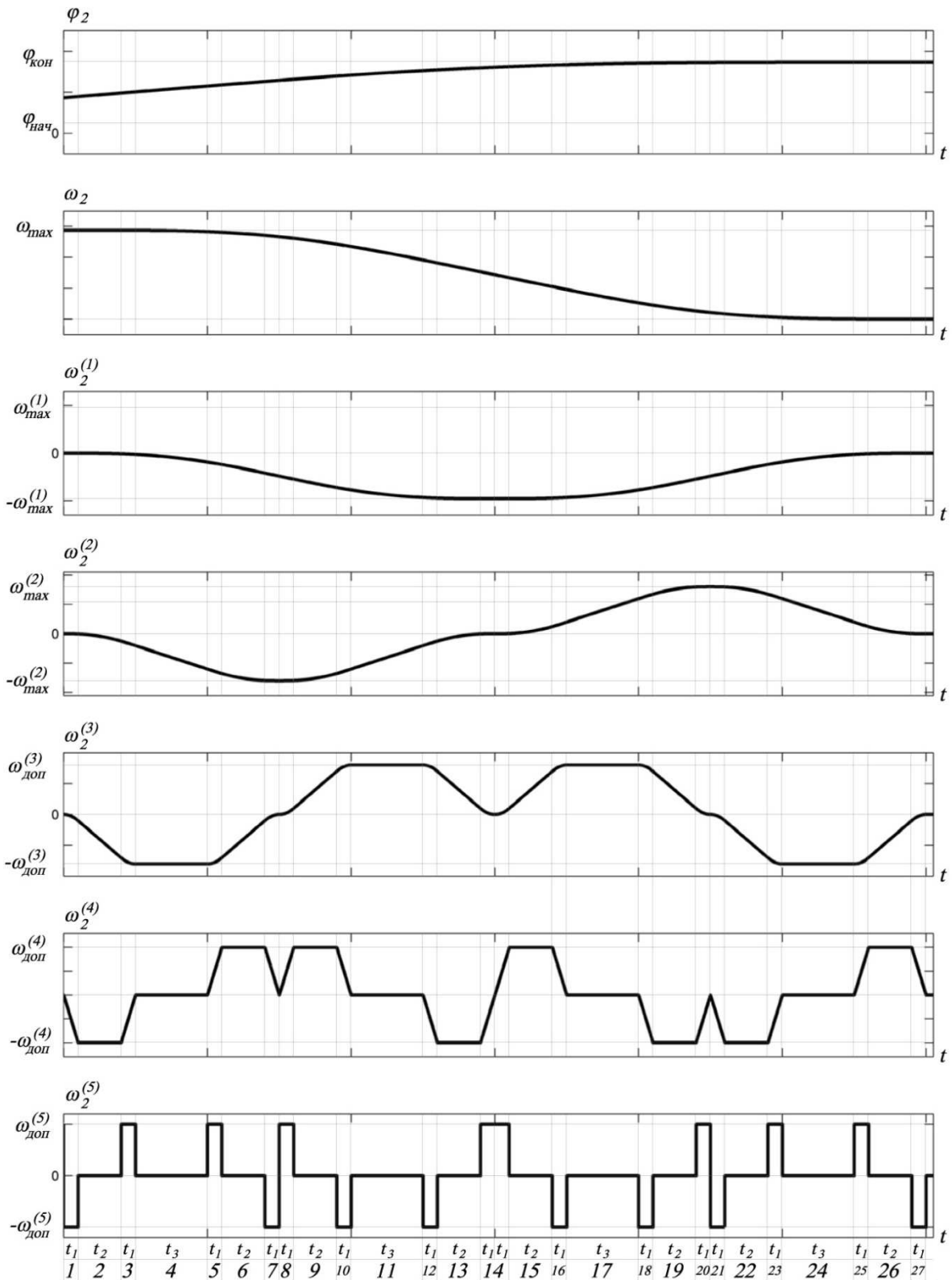


Рисунок 2 – Симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с ограничениями по третьей, четвертой и пятой производным скорости (торможение)

Для симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ог-

раничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости справедливы следующие соотношения:

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

$$\omega_{\text{дон}}^{(3)} = \omega_{\text{дон}}^{(4)} \cdot (t_1 + t_2); \quad (2)$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = \omega_{\text{дон}}^{(3)} \cdot (2t_1 + t_2 + t_3); \quad (3)$$

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = \omega_{\text{max}}^{(2)} \cdot (4t_1 + 2t_2 + t_3) = \omega_{\text{дон}}^{(3)} \cdot (2t_1 + t_2 + t_3) \cdot (4t_1 + 2t_2 + t_3); \quad (4)$$

$$\omega_{\text{max}} = \omega_{\text{max}}^{(1)} \cdot (8t_1 + 4t_2 + 2t_3) = 2\omega_{\text{дон}}^{(3)} \cdot (2t_1 + t_2 + t_3) \cdot (4t_1 + 2t_2 + t_3)^2; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{кон}} &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}} \cdot (16t_1 + 8t_2 + 4t_3) = \\ &= \varphi_{\text{нач}} + 8\omega_{\text{дон}}^{(3)} \cdot (2t_1 + t_2 + t_3) \cdot (4t_1 + 2t_2 + t_3)^3; \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_{\text{ц}} = 32t_1 + 16t_2 + 8t_3, \quad (7)$$

где $T_{\text{ц}}$ – длительность цикла, с.

Из соотношений (1)–(6) следует, что длительности этапов симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости равны:

$$t_1 = \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}}; \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} - \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}}. \quad (9)$$

Для определения t_3 необходимо решить уравнение:

$$\begin{aligned} t_3^4 + 7 \cdot (2t_1 + t_2) \cdot t_3^3 + 18 \cdot (2t_1 + t_2)^2 \cdot t_3^2 + 20 \cdot (2t_1 + t_2) \cdot t_3 + \\ + 8 \cdot (2t_1 + t_2)^4 - \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{8\omega_{\text{дон}}^{(3)}} = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

При движении электропривода минимально $\varphi_{\text{гр.2}}$ и максимально $\varphi_{\text{гр.3}}$ возможные значения угла поворота в соответствии с симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости равны:

$$\varphi_{\text{гр.2}} = 64\omega_{\text{дон}}^{(3)} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}} \right]^4; \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{гр.3}} = 8\omega_{\text{дон}}^{(2)} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}{\omega_{\text{дон}}^{(3)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}} \right]^3, \quad (11)$$

где $\omega_{\text{дон}}^{(2)}$ – максимально допустимое значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$.

В данной статье рассматривается электропривод, у которого максимально допустимые значения соответственно равны: $\omega_{дон}^{(2)} = 160 \frac{рад}{с^3}$; $\omega_{дон}^{(3)} = 800 \frac{рад}{с^4}$; $\omega_{дон}^{(4)} = 10000 \frac{рад}{с^5}$; $\omega_{дон}^{(5)} = 500000 \frac{рад}{с^6}$.

При этом:

$$\varphi_{гр.2} = 64 \cdot 800 \cdot \left[\frac{800}{10000} + \frac{10000}{500000} \right]^4 = 5,12 \text{ рад};$$

$$\varphi_{гр.3} = 8 \cdot 160 \cdot \left[\frac{160}{800} + \frac{800}{10000} + \frac{10000}{500000} \right]^3 = 34,56 \text{ рад}.$$

В таблице 1 представлены результаты по определению параметров симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости.

Таблица 1 – Результаты по определению параметров

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}), \text{ рад}$	$t_3, \text{ с}$	$T_{ц}, \text{ с}$	$\omega_{max}^{(2)}, \frac{рад}{с^3}$	$\omega_{max}^{(1)}, \frac{рад}{с^2}$	$\omega_{max}, \frac{рад}{с}$
5,12	0	1,6	80	16	6,4
6,519744	0,01	1,68	88	18,48	7,7616
8,177664	0,02	1,76	96	21,12	9,2928
10,122944	0,03	1,84	104	23,92	11,0032
12,386304	0,04	1,92	112	26,88	12,9024
15	0,05	2	120	30	15
17,997824	0,06	2,08	128	33,28	17,3056
21,415104	0,07	2,16	136	36,72	19,8288
25,288704	0,08	2,24	144	40,32	22,5792
29,657024	0,09	2,32	152	44,08	25,5664
34,56	0,1	2,4	160	48	28,8

При этом остальные параметры не менялись и имели следующие значения:

$$\omega_{дон}^{(3)} = 800 \frac{рад}{с^4}; \omega_{дон}^{(4)} = 10000 \frac{рад}{с^5}; \omega_{дон}^{(5)} = 500000 \frac{рад}{с^6}; t_1 = 0,02 \text{ с}; t_2 = 0,06 \text{ с}.$$

На рисунках 1 и 2 приведена симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвертой и пятой производным скорости, которая имеет следующие параметры: $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 15 \text{ рад}$; $t_1 = 0,02 \text{ с}$;

$$t_2 = 0,06 \text{ с}; t_3 = 0,05 \text{ с}; T_{ц} = 2 \text{ с}; \omega_{дон}^{(5)} = 500000 \frac{рад}{с^6}; \omega_{дон}^{(4)} = 10000 \frac{рад}{с^5}; \omega_{дон}^{(3)} = 800 \frac{рад}{с^4};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 120 \frac{рад}{с^3}; \omega_{max}^{(1)} = 30 \frac{рад}{с^2}; \omega_{max} = 15 \frac{рад}{с}.$$

Выводы

В представленной статье разработана симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвёртой и пятой производным скорости, состоящая из двадцати семи этапов.

Установлена область существования симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвертой и пятой производным скорости.

Получен алгоритм, позволяющий определить параметры оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по третьей, четвертой и пятой производным скорости.

Литература:

1. Добробаба Ю.П., Кошкин Г.А., Громницкий Е.Е. Оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2018. – 160 с.

2. Добробаба Ю.П., Кузьмина И.Б. Прецизионный позиционный электропривод переменного тока с упругим валопроводом: монография / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар : Изд. ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2015. – 132 с.

References:

1. Dobrobaba Yu.P., Koshkin G.A., Gromnitsky E.E. Optimalnye on speed of the chart of movement of executive body of the precision electric drive of a direct current with the elastic shaft line / Kuban State Technological un-t. – Krasnodar : Prod. FGBOOU WAUGH of «KubGTU», 2018. – 160 p.

2. Dobrobaba Yu.P., Kuzmina I.B. The precision position electric drive of alternating current with the elastic shaft line : monograph / Kuban State Technological un-t. – Krasnodar : Prod. FGBOOU WAUGH of «KubGTU», 2015. – 132 p.