

УДК 62.83.52:62.503.56

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

**SYMMETRIC OPTIMAL ON PROGRESS MOVEMENT
DIAGRAM EXECUTIVE BODY OF PRECISION ELECTRIC DRIVE
WITH ELASTIC TARGET WITH RESTRICTIONS ON THE FIRST, SECOND,
THIRD, FOURTH AND FIFTH SPEED DERIVATIVES**

Добробаба Юрий Петрович

кандидат технических наук,
доцент, профессор кафедры
электроснабжения 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 первой, второй, 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 первой, второй, третьей, четвёртой и пятой производным скорости. Приведены результаты по определению параметров симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвёртой и пятой производным скорости.

Ключевые слова: симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма, упругий валопровод, прецизионный электропривод, перемещение исполнительного органа, ограничения по первой, второй, 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. The symmetric chart of movement of executive body of the precision electric drive, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions on the first, second, third, fourth and fifth derivatives of speed is submitted. The algorithm is developed for determination of parameters of the symmetric chart of movement of executive body of the precision electric drive, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions on the first, second, third, fourth and fifth derivatives of speed. Results on determination of parameters of the symmetric chart of movement of executive body of the precision electric drive, optimum on speed, with the elastic shaft line with restrictions on the first, second, third, fourth and fifth derivatives of speed are given.

Keywords: symmetric chart, optimum on speed, elastic shaft line, precision electric drive, movement of executive body, restriction on the first, second, third, fourth and fifth derivatives of speed.

Для управления электроприводами с упругими валопроводами ранее разработаны:

- 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.
- 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.

Данная работа посвящена разработке симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы, предназначенной для электроприводов промышленных механизмов, у которых по технологическим требованиям необходимо ограничивать первую, вторую, третью, четвертую и пятую производные скорости.

Разработано математическое обеспечение, которое позволяет определить параметры симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости.

На рисунках 1 и 2 представлена симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости, состоящая из тридцати одного этапа.

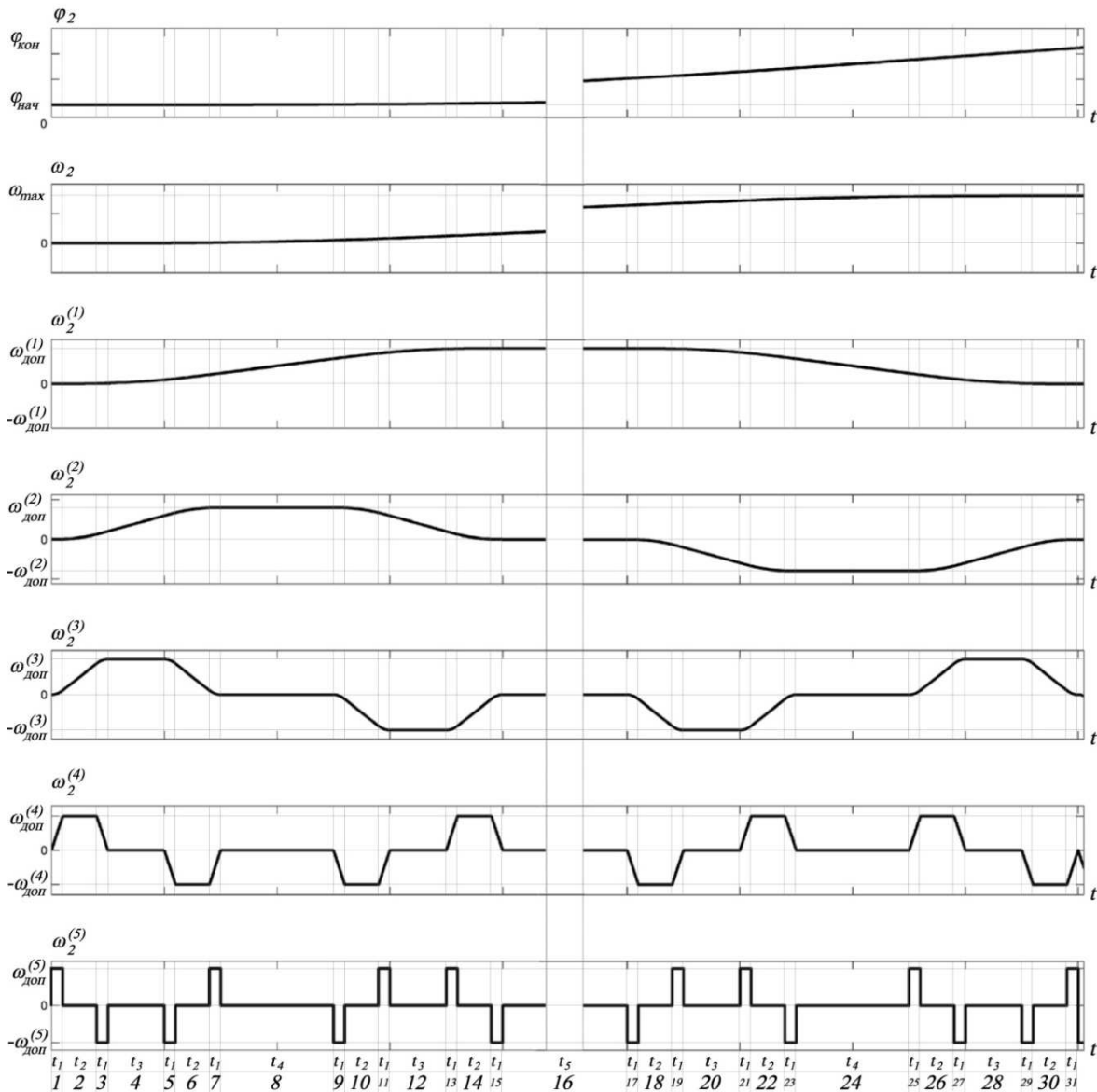


Рисунок 1 – Симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости (разгон)

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, $\frac{рад}{с}$;
- $\omega_{дон}^{(1)}$ – максимально допустимое значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{рад}{с^2}$;
- $\omega_{дон}^{(2)}$ – максимально допустимое 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, девятого, одиннадцатого, тринадцатого, пятнадцатого, семнадцатого, девятнадцатого, двадцать первого, двадцать третьего, двадцать пятого, двадцать седьмого, двадцать девятого, тридцать первого этапов, с;
- t_2 – длительность второго, шестого, десятого, четырнадцатого, восемнадцатого, двадцать второго, двадцать шестого, тридцатого этапов, с;
- t_3 – длительность четвертого, двенадцатого, двадцатого, двадцать восьмого этапов, с;
- t_4 – длительность восьмого и двадцать четвертого этапов, с;
- t_5 – длительность шестнадцатого этапа, с.

Для симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости справедливы следующие соотношения:

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

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

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

$$\omega_{дон}^{(1)} = \omega_{дон}^{(2)} \cdot (4t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4); \quad (4)$$

$$\omega_{max} = \omega_{дон}^{(1)} \cdot (8t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4 + t_5); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{кон}} &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{max}} \cdot (16t_1 + 8t_2 + 4t_3 + 2t_4 + t_5) = \\ &= \varphi_{\text{нач}} + \omega_{\text{доп}}^{(1)} \cdot (8t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4 + t_5) \cdot (16t_1 + 8t_2 + 4t_3 + 2t_4 + t_5); \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_{\text{ц}} = 32t_1 + 16t_2 + 8t_3 + 4t_4 + 2t_5, \quad (7)$$

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

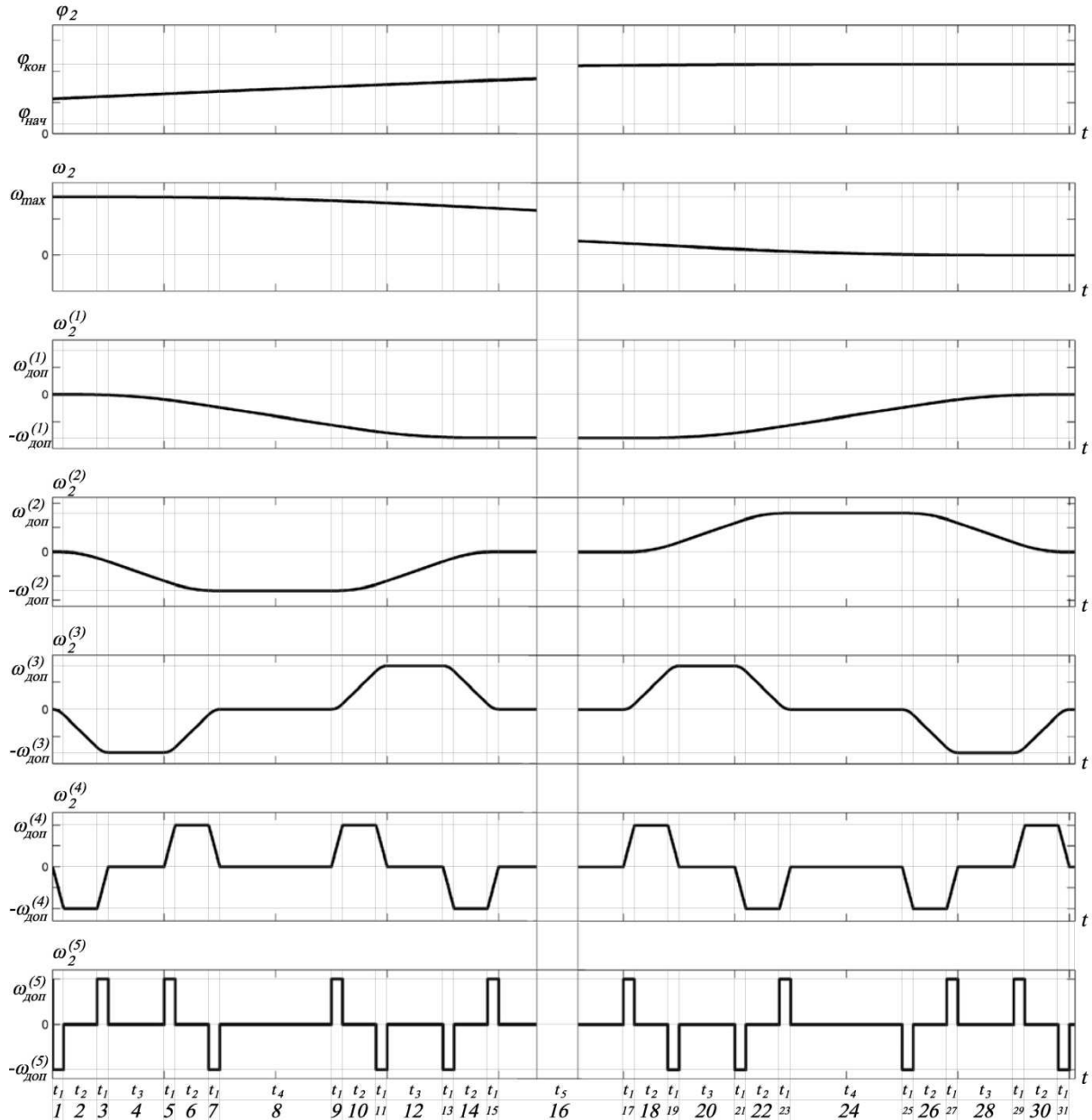


Рисунок 2 – Симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости (торможение)

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

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

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

$$t_3 = \frac{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}{\omega_{\text{дон}}^{(3)}} - \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} - \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}}; \quad (10)$$

$$t_4 = \frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} - \frac{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}{\omega_{\text{дон}}^{(3)}} - \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} - \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}}; \quad (11)$$

$$t_5 = \sqrt{\frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{дон}}^{(1)}} + \frac{1}{4} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}{\omega_{\text{дон}}^{(3)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}} \right]^2} - \frac{3}{2} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}{\omega_{\text{дон}}^{(3)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}} \right]}. \quad (12)$$

При движении электропривода минимально $\varphi_{\text{гр.4}}$ и максимально $\varphi_{\text{гр.5}}$ возможные значения угла поворота в соответствии с симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости равны:

$$\varphi_{\text{гр.4}} = 2\omega_{\text{дон}}^{(1)} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}{\omega_{\text{дон}}^{(3)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}} \right]^2; \quad (13)$$

$$\varphi_{\text{гр.5}} = \omega_{\text{дон}} \cdot \left[\frac{\omega_{\text{дон}}}{\omega_{\text{дон}}^{(1)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(1)}}{\omega_{\text{дон}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(2)}}{\omega_{\text{дон}}^{(3)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(3)}}{\omega_{\text{дон}}^{(4)}} + \frac{\omega_{\text{дон}}^{(4)}}{\omega_{\text{дон}}^{(5)}} \right]; \quad (14)$$

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

В данной статье представлен электропривод, у которого максимально допустимые значения соответственно равны: $\omega_{\text{дон}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $\omega_{\text{дон}}^{(1)} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; $\omega_{\text{дон}}^{(2)} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$; $\omega_{\text{дон}}^{(3)} = 800 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$; $\omega_{\text{дон}}^{(4)} = 10000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$; $\omega_{\text{дон}}^{(5)} = 500000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}$.

При этом:

$$\varphi_{\text{гр.4}} = 2 \cdot 80 \cdot \left[\frac{80}{160} + \frac{160}{800} + \frac{800}{10000} + \frac{10000}{500000} \right]^2 = 102,4 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{гр.5}} = 160 \cdot \left[\frac{160}{80} + \frac{80}{160} + \frac{160}{800} + \frac{800}{10000} + \frac{10000}{500000} \right] = 448 \text{ рад}.$$

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

Таблица 1 – Результаты по определению параметров

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}), \text{ рад}$	$t_5, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\omega_{\text{max}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
102,4	0	3,2	64
122,4	0,1	3,4	72
144	0,2	3,6	80
167,2	0,3	3,8	88
192	0,4	4	96
218,4	0,5	4,2	104
246,4	0,6	4,4	112
276	0,7	4,6	120
307,2	0,8	4,8	128
340	0,9	5	136
374,4	1	5,2	144
410,4	1,1	5,4	152
448	1,2	5,6	160

При этом остальные параметры не менялись и имели следующие значения:
 $\omega_{\text{дон}}^{(1)} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; $\omega_{\text{дон}}^{(2)} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$; $\omega_{\text{дон}}^{(3)} = 800 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$; $\omega_{\text{дон}}^{(4)} = 10000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$; $\omega_{\text{дон}}^{(5)} = 500000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}$;
 $t_1 = 0,02 \text{ с}$; $t_2 = 0,06 \text{ с}$; $t_3 = 0,1 \text{ с}$; $t_4 = 0,2 \text{ с}$.

На рисунках 1 и 2 изображена симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости, которая имеет следующие параметры: $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 144 \text{ рад}$;
 $t_1 = 0,02 \text{ с}$; $t_2 = 0,06 \text{ с}$; $t_3 = 0,1 \text{ с}$; $t_4 = 0,2 \text{ с}$; $t_5 = 0,2 \text{ с}$; $T_{\text{ц}} = 3,6 \text{ с}$; $\omega_{\text{дон}}^{(5)} = 500000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}$;
 $\omega_{\text{дон}}^{(4)} = 10000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$; $\omega_{\text{дон}}^{(3)} = 800 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$; $\omega_{\text{дон}}^{(2)} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$; $\omega_{\text{дон}}^{(1)} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; $\omega_{\text{max}} = 80 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

Выводы

В данной статье приведена симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости, состоящая из тридцати одного этапа.

Найдены минимально и максимально возможные значения угла поворота при движении электропривода в соответствии с симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа прецизионного электропривода с упругим валопроводом с ограничениями по первой, второй, третьей, четвертой и пятой производным скорости.

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

Литература:

1. Добрабаба 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.