

УДК 62

**СИММЕТРИЧНАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА  
ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ  
С ОГРАНИЧЕНИЯМИ СКОРОСТИ ПО ЕЕ ПЕРВОЙ,  
ВТОРОЙ И ЧЕТВЁРТОЙ ПРОИЗВОДНЫМ**



**SYMMETRIC OPTIMAL SPEED DIAGRAM OF THE MOVEMENT  
OF THE EXECUTIVE BODY OF A DC ELECTRIC DRIVE  
WITH AN ELASTIC SHAFT LINE WITH SPEED RESTRICTIONS AND ITS FIRST,  
SECOND AND FOURTH DERIVATIVES**

**Добробаба Юрий Петрович**

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

**Асланова Диана Александровна**

студент,  
Кубанский государственный  
технологический университет

**Мурлина Владислава Анатольевна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры  
информационных систем  
и программирования,  
Кубанский государственный  
технологический университет

**Аннотация.** Разработана симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвёртой производным.

Предложен алгоритм для определения параметров симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвёртой производным.

**Ключевые слова:** Оптимальная по быстродействию диаграмма, исполнительный орган, электропривод постоянного тока с упругим валопроводом.

**Dobrobaba Yury Petrovich**

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

**Aslanova Diana Alexandrovna**

Student,  
Kuban state technological university

**Murlina Vladislava Anatolievna**

Candidate of technical sciences,  
Associate Professor,  
Associate Professor of the department  
of information systems and programming,  
Kuban state technological University

**Annotation.** The symmetric speed-optimal motion diagram of the DC actuator with elastic shaft train with speed limitations and its first, second and fourth derivatives has been developed.

An algorithm for determining the parameters of the symmetric speed-optimal motion diagram of the actuator of DC electric drive with elastic shaft train with speed limitations and its first, second and fourth derivatives is proposed.

**Keywords:** optimum speed diagram, executive body, DC drive with elastic shaft line.

**В** данной работе для исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом разрабатывается симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвёртой производным.

На рисунке 1 представлена симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвёртой производным.

Для данной диаграммы справедливы следующие уравнения:

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

$$\begin{aligned}\omega_{\text{доп}}^{(2)} &= \omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_1 = \omega_{\text{max}}^{(4)} \cdot t_1^2; \\ \omega_{\text{доп}}^{(1)} &= \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_2); \\ \omega_{\text{доп}} &= \omega_{\text{доп}}^{(1)} \cdot (4t_1 + t_2 + t_3); \\ (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) &= \omega_{\text{доп}} \cdot (8t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4); \\ T_{\text{ц}} &= 16t_1 + 4t_2 + 2t_3 + t_4; \\ C_{\text{м}} \cdot I_{\text{доп}} &= M_{\text{со}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(1)},\end{aligned}$$

где  $\omega_{\text{max}}^{(4)}$  – максимальное значение четвертой производной скорости,  $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^5}$ ;  
 $\omega_{\text{max}}^{(3)}$  – максимальное значение третьей производной скорости,  $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^4}$ ;  
 $\omega_{\text{доп}}^{(2)}$  – допустимое значение второй производной скорости,  $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$ ;  
 $\omega_{\text{доп}}^{(1)}$  – допустимое значение первой производной скорости,  $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$ ;  
 $\omega_{\text{доп}}$  – допустимое значение скорости,  $\frac{\text{рад.}}{\text{с}}$ ;  
 $\varphi_{\text{кон}}$  – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;  
 $\varphi_{\text{нач}}$  – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;  
 $t_1$  – длительность первого, второго, четвертого, пятого, седьмого, восьмого, десятого, одиннадцатого, тринадцатого, четырнадцатого, шестнадцатого, семнадцатого, девятнадцатого, двадцатого, двадцать второго, двадцать третьего этапов, с;  
 $t_2$  – длительность третьего, девятого, пятнадцатого, двадцать первого этапов, с;  
 $t_3$  – длительность шестого, восемнадцатого этапов, с;  
 $t_4$  – длительность двенадцатого этапа, с;  
 $T_{\text{ц}}$  – длительность цикла, с.  
 $C_{\text{м}}$  – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, В · с;  
 $I_{\text{доп}}$  – допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А;  
 $M_{\text{со}}$  – момент сопротивления электропривода, Н · м;  
 $J_1$  – момент инерции исполнительного органа электродвигателя, кг · м<sup>2</sup>;  
 $J_2$  – момент инерции исполнительного органа механизма, кг · м<sup>2</sup>.

Из уравнений следует, что для параметров диаграммы справедливы зависимости:

$$\begin{aligned}t_1 &= \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}}; \\ t_2 &= \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}}; \\ t_3 &= \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}}; \\ t_4 &= \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} - \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}}; \\ T_{\text{ц}} &= \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(1)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}}.\end{aligned}$$

Если  $t_4 = 0$ , то  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.3}}$ ;

$$\varphi_{гр.3} = \omega_{доп} \cdot \left[ \frac{\omega_{доп}}{\omega_{доп}^{(1)}} + \frac{\omega_{доп}^{(1)}}{\omega_{доп}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{доп}^{(2)}}{\omega_{доп}^{(4)}}} \right].$$

В данной работе рассматривается электропривод постоянного тока с упругим валопроводом, имеющий следующие параметры:

$$C_e = 1,25 \frac{В \cdot с}{рад}; C_M = 1,25 В \cdot с; R_{я} = 5 Ом; L_{я} = 0,1 Гн; J_1 = 0,025 кг \cdot м^2;$$

$$J_2 = 0,025 кг \cdot м^2; C_y = 4 \frac{Н \cdot м}{рад}; U_{доп} = 250 В; I_{доп} = 8 А; \omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с};$$

$$\omega_{доп}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2}; \omega_{доп}^{(2)} = 400 \frac{рад}{с^3}; \omega_{доп}^{(4)} = 160000 \frac{рад}{с^5}; M_{CO} = 5 Н \cdot м; \varphi_{нач} = 0 рад.$$

Граничные значения для симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвертой производным:

$$\text{при } \omega_{max}^{(4)} = 160000 \frac{рад}{с^5} \quad \varphi_{гр.3} = 312 \text{ рад};$$

$$\text{при } \omega_{max}^{(4)} = 640000 \frac{рад}{с^5} \quad \varphi_{гр.3} = 304 \text{ рад}.$$

В работе выполнен первый численный эксперимент с целью определения длительности цикла от величины перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом, результаты которого при  $\omega_{max}^{(4)} = 160000 \frac{рад}{с^5}$  приведены в таблице 1.

Таблица 1

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}),$ рад	$t_1, с$	$t_2, с$	$t_3, с$	$t_4, с$	$T_{ц}, с$	$\omega_{max}^{(3)},$ $\frac{рад}{с^4}$
360	0,05	0,15	1,25	0,3	4,2	8000
312	0,05	0,15	1,25	0	3,9	8000

В работе выполнен второй численный эксперимент с целью определения длительности цикла от величины перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом, результаты которого при  $\omega_{max}^{(4)} = 640000 \frac{рад}{с^5}$  приведены в таблице 2.

Таблица 2

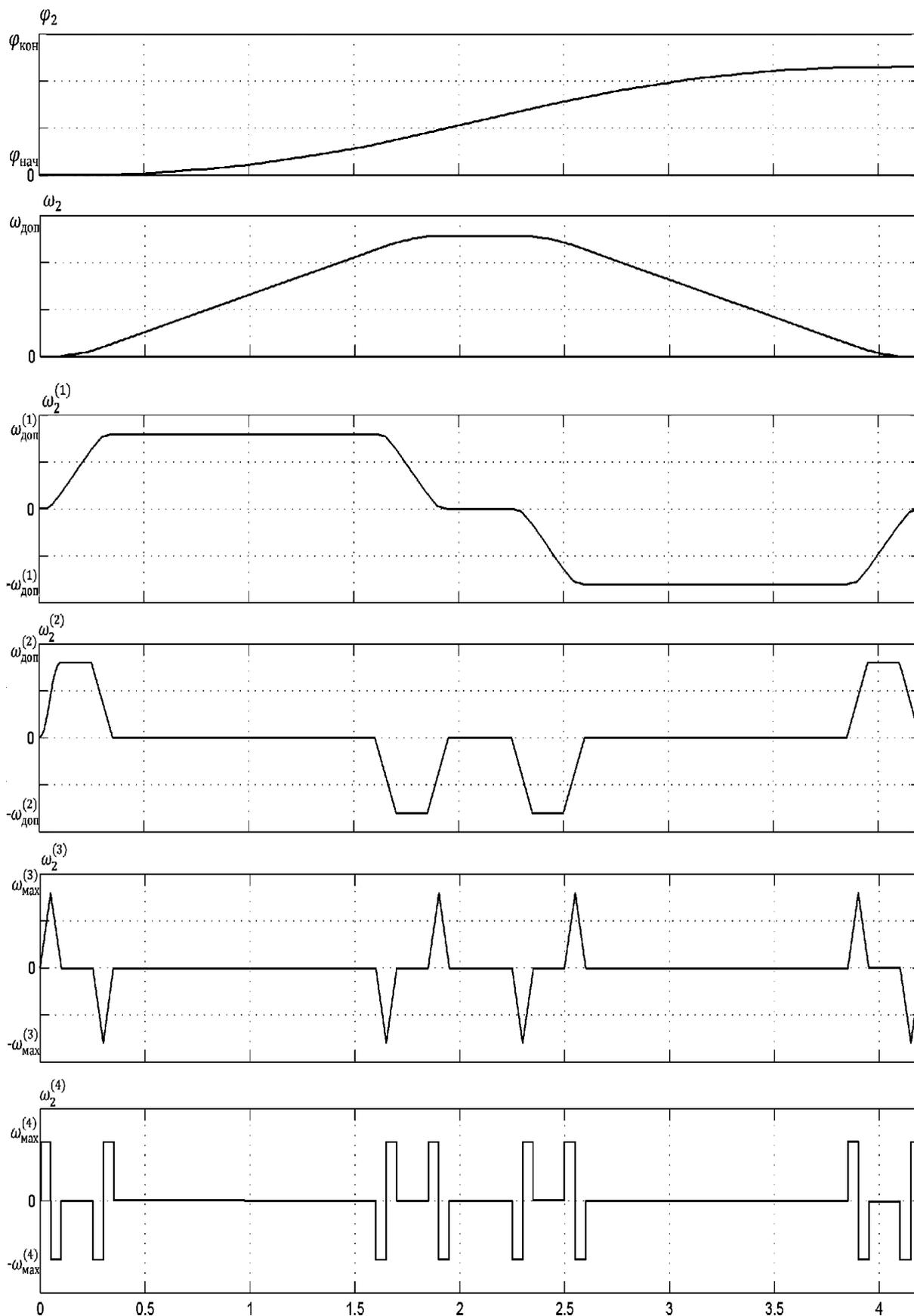
$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}),$ рад	$t_1, с$	$t_2, с$	$t_3, с$	$t_4, с$	$T_{ц}, с$	$\omega_{max}^{(3)},$ $\frac{рад}{с^4}$
360	0,025	0,2	1,3	0,35	4,15	160000
304	0,025	0,2	1,3	0	3,8	160000

На рисунке 2 приведены зависимости длительности цикла от величины перемещения (угла поворота) исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом при различных значениях максимальной величины четвертой производной угловой скорости.

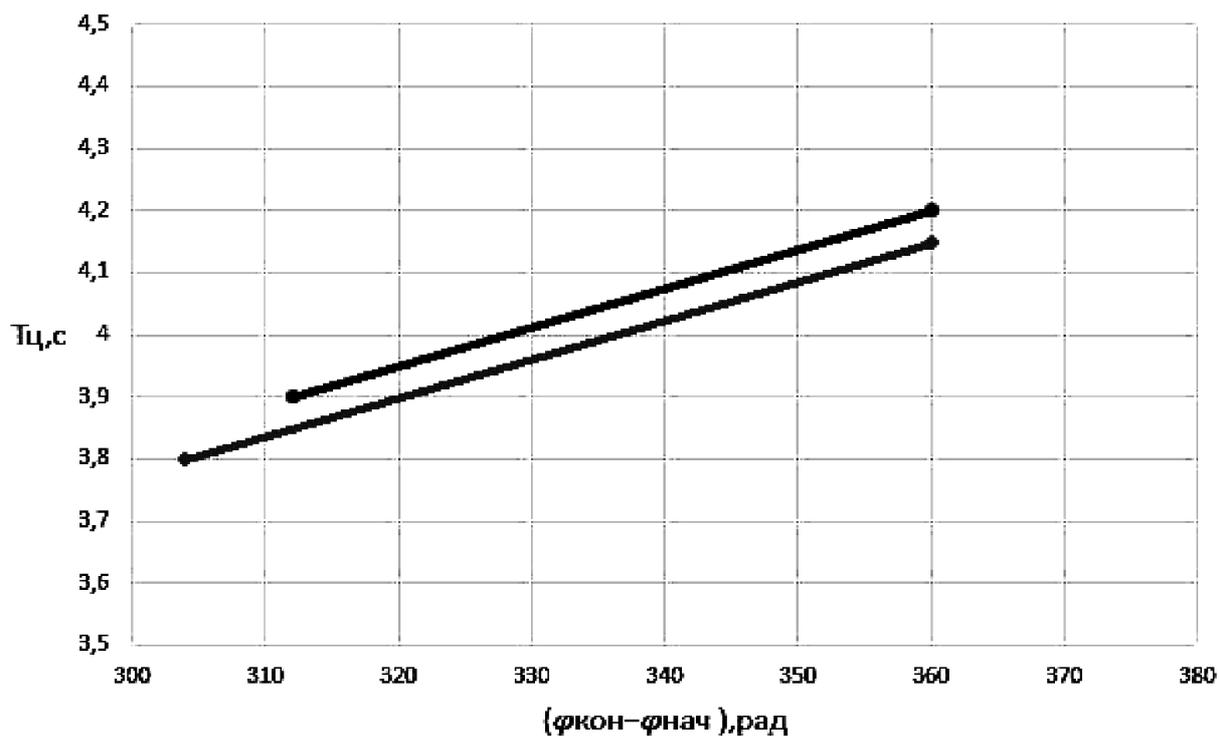
## Выводы

Для электропривода постоянного тока с упругим валопроводом разработана симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвертой производным.

Получен алгоритм, позволяющий определить параметры симметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвертой производным.



**Рисунок 1** – Симметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по скорости и по ее первой, второй и четвертой производным



**Рисунок 2** – Зависимости длительности цикла от величины перемещения (угла поворота) исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом при различных значениях максимальной величины четвертой производной угловой скорости