

УДК 62

**АССИМЕТРИЧНАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ
С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕНИЮ ТОКА
И ПО ВТОРОЙ И ЧЕТВЕРТОЙ ПРОИЗВОДНЫМ СКОРОСТИ**



**ASYMMETRIC OPTIMUM PERFORMANCE DIAGRAM OF MOVEMENT
OF ELECTRIC DRIVES EXECUTIVE AUTHORITY DC WITH ELASTIC SHAFTING
WITH RESTRICTIONS ON THE MAXIMUM CURRENT VALUE
AND THE SECOND AND FOURTH DERIVATIVE OF THE SPEED**

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 асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному значению тока и по второй и четвёртой производным скорости.

Предложен алгоритм для определения параметров асимметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному значению тока и по второй и четвёртой производным скорости.

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. An asymmetric speed-optimal motion diagram of the DC actuator with elastic shaft train with restrictions on the maximum value of current and on the second and fourth derivatives of velocity has been developed.

An algorithm for determining the parameters of asymmetric speed-optimal diagram of DC actuator movement with elastic shaft drive with restrictions on the maximum value of current and the second and fourth derivatives of speed is proposed.

Keywords: Optimal speed diagram, actuator, DC electric drive with elastic shaft train.

В данной работе для исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом разрабатывается асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения с ограничениями по максимальному значению тока и по второй и четвёртой производным скорости.

На рисунке 1 представлена асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному значению тока и по второй и четвёртой производным скорости.

Для данной диаграммы справедливы следующие уравнения:

$$\begin{aligned}\omega_{\max}^{(3)} &= \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1; \\ \omega_{\text{доп}}^{(2)} &= \omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1^2; \\ \omega_{\max}^{(1)} &= \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_2); \\ \omega_{\min}^{(1)} &= -\omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_4); \\ \omega_{\max} &= \omega_{\max}^{(1)} \cdot (4t_1 + t_2 + t_3); \\ \omega_{\max} &= -\omega_{\min}^{(1)} \cdot (4t_1 + t_4) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_4) \cdot (4t_1 + t_4) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (8t_1^2 + 6t_1t_4 + t_4^2); \\ (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) &= \omega_{\max} \cdot (8t_1 + t_2 + \frac{1}{2}t_3 + t_4); \\ C_M \cdot I_{\text{доп}} &= M_{\text{со}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(1)}; \\ T_{\text{ц}} &= 16t_1 + 2t_2 + t_3 + 2t_4,\end{aligned}$$

где $\omega_{\max}^{(4)}$ – максимальное значение четвертой производной скорости, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^5}$;

$\omega_{\max}^{(3)}$ – максимальное значение третьей производной скорости, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^4}$;

$\omega_{\text{доп}}^{(2)}$ – допустимое значение второй производной скорости, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$;

$\omega_{\max}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной скорости, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$;

$\omega_{\min}^{(1)}$ – минимальное 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, двенадцатого, четырнадцатого, пятнадцатого, шестнадцатого, семнадцатого, девятнадцатого, двадцатого этапов, с;

$2t_1$ – длительность одиннадцатого этапа, с;

t_2 – длительность третьего, девятого этапов, с;

t_3 – длительность шестого этапа с;

t_4 – длительность тринадцатого, восемнадцатого этапов, с;

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

C_M – 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 · м²;

J_2 – момент инерции исполнительного органа механизма, кг · м².

Из уравнений следует, что для параметров диаграммы справедливы зависимости:

$$\omega_{\max}^{(1)} = \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J_1 + J_2};$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}};$$

$$t_2 = \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}};$$

$$\begin{aligned}
 & T_4^4 + 2 \cdot \left[6t_1 + \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right] \cdot t_4^3 + \left[52t_1^2 + \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot (24t_1 + t_2) \right] \cdot t_4^2 + \\
 & + 2 \cdot \left[48t_1^2 + \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot (44t_1 + 3t_2) \right] \cdot t_1 t_4 + \\
 & + 2 \cdot \left[32t_1^4 + 4 \cdot \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot (12t_1 + t_2) \cdot t_1^2 - \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \cdot \frac{\omega_{\max}^{(1)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right] = 0; \\
 & t_3 = \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(1)}} \cdot (8t_1^2 + 6t_1 t_4 + t_4^2) - (4t_1 + t_2).
 \end{aligned}$$

Если $t_3 = 0$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}}$.

$$\omega_{\max} = \omega_{\max}^{(1)} \cdot (4t_1 + t_2) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_2) \cdot (4t_1 + t_2);$$

$$\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_4) \cdot (4t_1 + t_4).$$

При этом: $t_2 = t_4$, тогда:

$$\varphi_{\text{гр.2}} = 2 \cdot \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J_1 + J_2} \cdot \left[\frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}} \right]^2.$$

Если $\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.3}}$.

$$\omega_{\text{доп}} = \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J_1 + J_2} \cdot \left[\frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}} + t_3 \right];$$

$$t_3 = \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}}.$$

$$\omega_{\text{доп}} = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (8t_1^2 + 6t_1 t_4 + t_4^2);$$

$$t_4^2 + 6t_1 t_4 + 8t_1^2 - \frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} = 0;$$

$$t_4 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + t_1^2} - 3t_1;$$

$$t_4 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}} - 3 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}};$$

$$\varphi_{\text{гр.3}} = \omega_{\text{доп}} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}} \right].$$

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

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

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

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

Граничные значения для асимметричной оптимальной диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному току и второй и четвертой производным скорости:

при $\omega_{\max}^{(4)} = 160000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ $\varphi_{\text{гр.2}} = 24,5$ и $\varphi_{\text{гр.3}} = 265,5086203$ рад ;
 при $\omega_{\max}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ $\varphi_{\text{гр.2}} = 18$ и $\varphi_{\text{гр.3}} = 257,2719112$ 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 $\omega_{\max}^{(4)} = 160000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}), \text{рад}$	$t_3, \text{с}$	$t_4, \text{с}$	$T_{\text{ц}}, \text{с}$	$\omega_{\max}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\min}^{(1)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
24,5	0	0,15	1,4	35	-100
39,12	0,13	0,2	1,63	48	-120
59,22	0,28	0,25	1,88	63	-140
86	0,45	0,3	2,15	80	-160
120,78	0,64	0,35	2,44	99	-180
165	0,85	0,4	2,75	120	-200
220,22	1,08	0,45	3,08	143	-220
265,5086203	1,25	0,484428877	3,318857754	160	-233,7715508

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 $\omega_{\max}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}), \text{рад}$	$t_3, \text{с}$	$t_4, \text{с}$	$T_{\text{ц}}, \text{с}$	$\omega_{\max}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	$\omega_{\min}^{(1)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
18	0	0,2	1,2	30	-100
29,82	0,12	0,25	1,42	42	-120
46,48	0,26	0,3	1,66	56	-140
69,12	0,42	0,35	1,92	72	-160
99	0,6	0,4	2,2	90	-180
137,5	0,8	0,45	2,5	110	-200
186,12	1,02	0,5	2,82	132	-220
246,48	1,26	0,55	3,16	156	-240
257,2719112	1,3	0,557949445	3,21589889	160	-243,179778

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 асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа с ограничениями по максимальному току и второй и четвертой производным скорости.

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

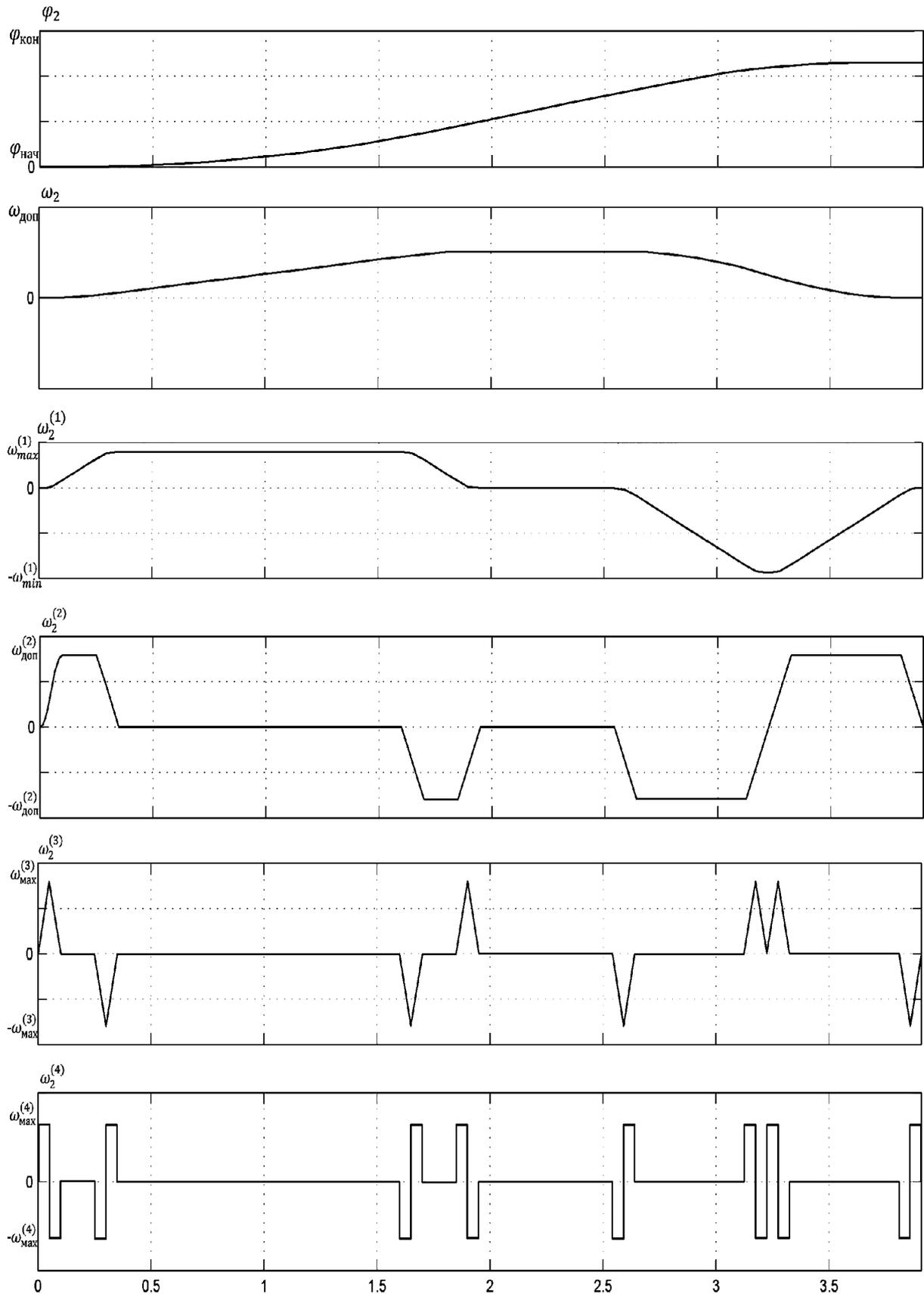


Рисунок 1 – Асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному значению тока и по второй и четвёртой производным скорости

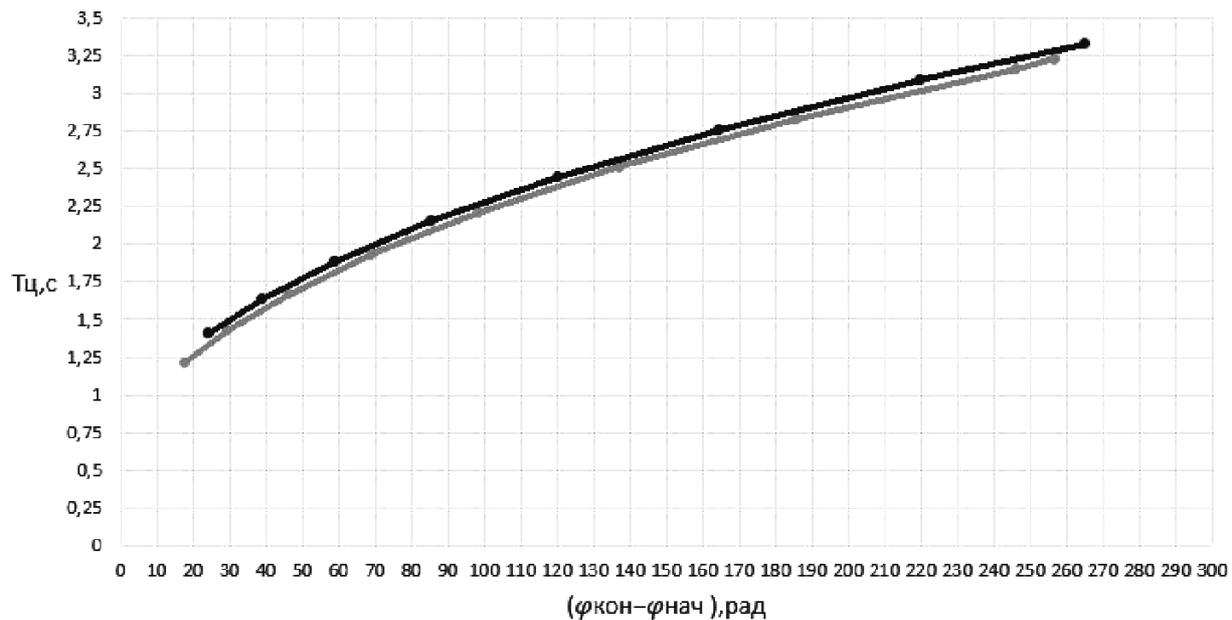


Рисунок 2 – Зависимости длительности цикла от величины перемещения (угла поворота) исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом при различных значениях максимальной величины четвертой производной угловой скорости