

УДК 62

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



**ASYMMETRIC OPTIMAL-SPEED DIAGRAM OF THE MOVEMENT
OF THE EXECUTIVE BODY OF A DC ELECTRIC DRIVE WITH AN ELASTIC
SHAFT LINE WITH RESTRICTIONS ON THE MAXIMUM CURRENT,
SPEED, AND ITS 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 асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному току, скорости и ее второй и четвертой производным.

Предложен алгоритм для определения параметров асимметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному току, скорости и ее второй и четвертой 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. An asymmetric speed-optimal motion diagram of the DC actuator with elastic shaft train with limitations on the maximum current, velocity and its second and fourth derivatives has been developed.

An algorithm for determining the parameters of asymmetric speed-optimal motion diagram of the actuator of DC electric drive with elastic shaft train with restrictions on the maximum current, speed and its second and fourth derivatives 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 току, скорости и ее второй и четвертой производным.

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

Для данной диаграммы справедливы следующие уравнения:

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

$$\begin{aligned}\omega_{\max}^{(1)} &= \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_2); \\ \omega_{\min}^{(1)} &= -\omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_5); \\ \omega_{\text{доп}} &= \omega_{\max}^{(1)} \cdot (4t_1 + t_2 + t_3); \\ \omega_{\text{доп}} &= -\omega_{\min}^{(1)} \cdot (4t_1 + t_5) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (2t_1 + t_5) \cdot (4t_1 + t_5) = \omega_{\text{доп}}^{(2)} \cdot (8t_1^2 + 6t_1t_5 + t_5^2); \\ (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) &= \omega_{\text{доп}} \cdot (8t_1 + t_2 + \frac{1}{2}t_3 + t_4 + t_5); \\ C_M \cdot I_{\text{доп}} &= M_{\text{со}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\max}^{(1)}; \\ T_{\text{ц}} &= 16t_1 + 2t_2 + t_3 + t_4 + 2t_5,\end{aligned}$$

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 при разгоне, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^3}$,
 $\omega_{\max}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной скорости, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$,
 $\omega_{\min}^{(1)}$ – минимальное значение первой производной скорости, $\frac{\text{рад.}}{\text{с}^2}$,
 ω_{\max} – максимальное 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, восемнадцатого, девятнадцатого, двадцать первого, двадцать второго этапов, с;
 t_2 – длительность третьего, девятого этапов, с;
 t_3 – длительность шестого этапа с;
 t_4 – длительность двенадцатого этапа, с;
 t_5 – длительность пятнадцатого, двадцатого 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:

$$\begin{aligned}t_1 &= \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}}; \\ \omega_{\max}^{(1)} &= \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J_1 + J_2}; \\ t_2 &= \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}}; \\ t_3 &= \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\max}^{(4)}}};\end{aligned}$$

$$t_5 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}} - 3 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}};$$

$$t_4 = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}};$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M \cdot I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}^{(2)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп}}^{(2)}}{\omega_{\text{max}}^{(4)}}}.$$

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

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

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 по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному значению тока, скорости и ее второй и четвертой производным:

$$\text{при } \omega_{\text{max}}^{(4)} = 160000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5} \quad \varphi_{\text{гр.3}} = 265,5086203 \text{ рад};$$

$$\text{при } \omega_{\text{max}}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5} \quad \varphi_{\text{гр.3}} = 257,2719112 \text{ рад}.$$

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 $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 160000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ приведены в таблице 1.

Таблица 1

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$t_1,$ с	$t_2,$ с	$t_3,$ с	$t_4,$ с	$t_5,$ с	$T_{\text{ц}},$ с	$\omega_{\text{max}}^{(1)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	$\omega_{\text{max}}^{(3)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$	$\omega_{\text{min}}^{(1)},$ $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
360	0,05	0,15	1,25	0,590571123	0,484428877	3,909428877	100	8000	-233,7715508
265,5086203	0,05	0,15	1,25	0	0,484428877	3,318857754	100	8000	-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 $\omega_{\text{max}}^{(4)} = 640000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$ приведены в таблице 2.

Таблица 2

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}),$ рад	$t_1,$ с	$t_2,$ с	$t_3,$ с	$t_4,$ с	$t_5,$ с	$T_{\text{ц}},$ с	$\frac{\omega_{\text{max}}^{(1)}}{\text{рад}} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$	$\frac{\omega_{\text{max}}^{(3)}}{\text{рад}} \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$	$\frac{\omega_{\text{min}}^{(1)}}{\text{рад}} \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$
360	0,025	0,2	1,3	0,642050555	0,557949445	3,857949445	100	16000	-243,179778
257,2719112	0,025	0,2	1,3	0	0,557959445	3,21589889	100	16000	-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 четвёртой производной угловой скорости.

Выводы

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

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

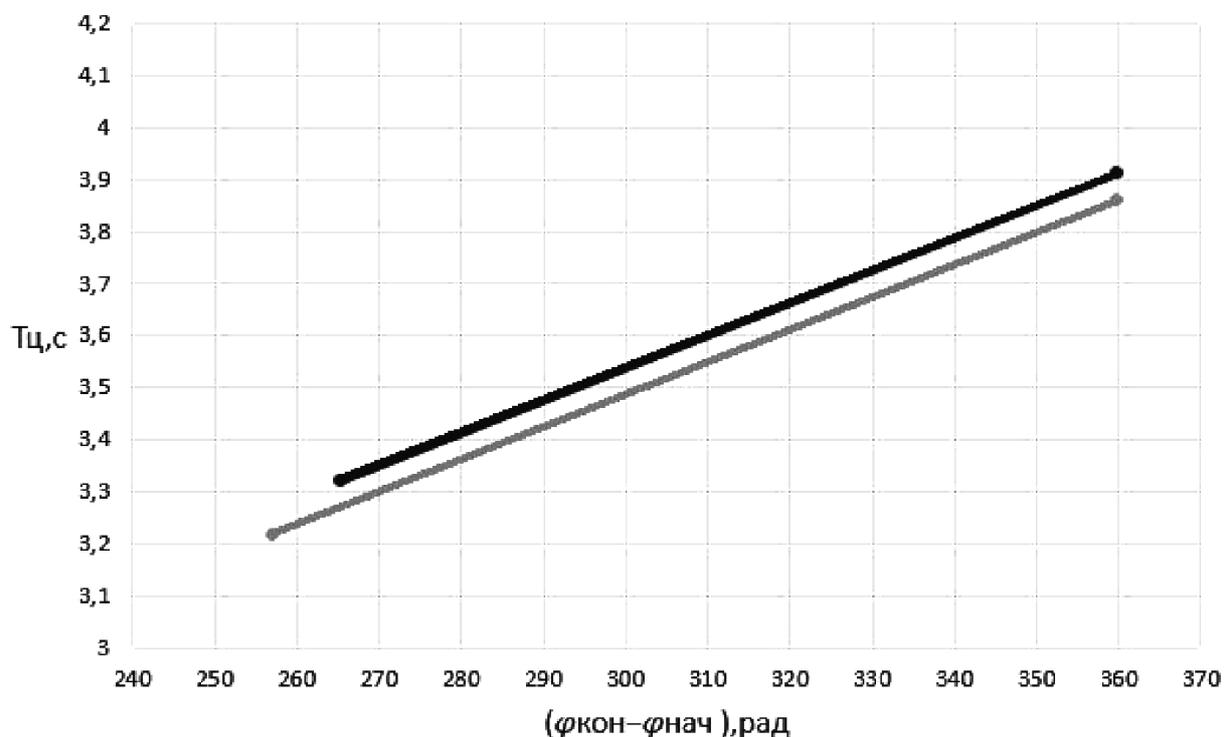


Рисунок 2 – Зависимости длительности цикла от величины перемещения (угла поворота) исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом при различных значениях максимальной величины четвёртой производной угловой скорости.

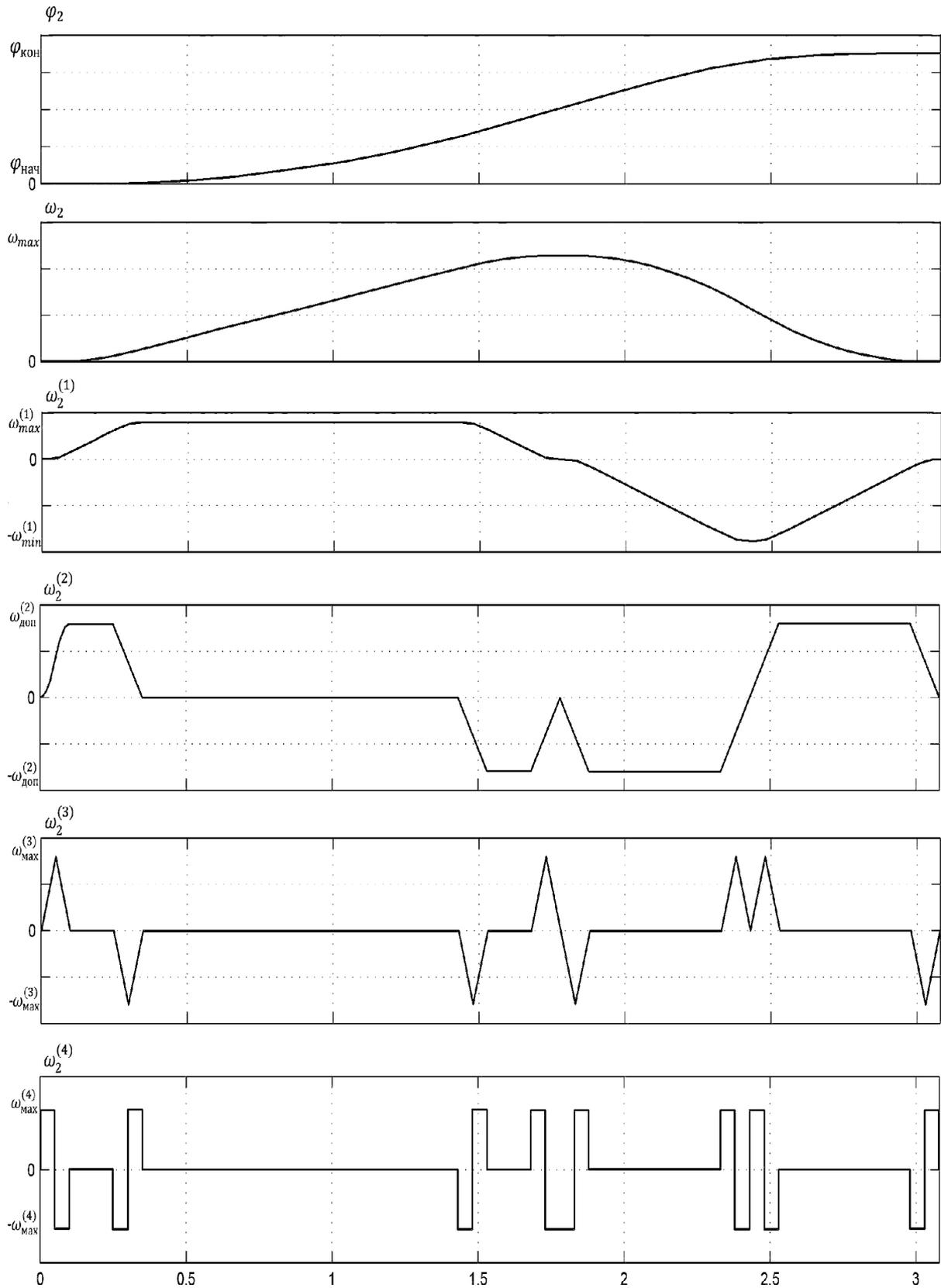


Рисунок 1 – Асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с упругим валопроводом с ограничениями по максимальному значению тока, скорости и её второй и четвёртой производным.