

УДК 62.83.52:62.503.56

**АССИМЕТРИЧНАЯ ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ
ДИАГРАММА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
ОСОБО ТОЧНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА
С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ БЕЗ ОГРАНИЧЕНИЯ ПО СКОРОСТИ**



**ASYMMETRIC OPTIMAL SPEED DIAGRAM
OF THE MOVEMENT OF THE EXECUTIVE BODY
OF A PARTICULARLY PRECISE DC ELECTRIC DRIVE WITH
AN ELASTIC SHAFT WITHOUT SPEED LIMIT**

Добробаба Юрий Петрович

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

Ульрих Ренат Викторович

студент,
Кубанский государственный
технологический университет
alexandrovnav32@mail.ru

Аннотация. Разработана асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом без ограничения по скорости. Разработан алгоритм определения параметров асимметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом без ограничения по скорости.

Ключевые слова: оптимальная по быстродействию диаграмма, особо точный электропривод.

Dobrobaba Yuriy Petrovich

Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Power Supply of Industrial Enterprises,
Kuban State Technological University

Ulrikh Renat Viktorovich

Student,
Kuban state technological university

Annotation. An asymmetric diagram of the movement of the Executive body of a particularly precise DC electric drive with an elastic shaft with no speed limit has been developed. An algorithm for determining the parameters of an asymmetric speed-optimal diagram of the movement of the Executive body of a particularly precise DC electric drive with an elastic shaft without a speed limit has been developed.

Keywords: the optimum diagramme on speed, high-precision electric drive.

В монографии [1] представлена квазиоптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом при ограничениях по максимальному и минимальному значениям тока.

В монографии [2] показано, что из-за влияния инерционности системы автоматического регулирования положения реальное перемещение исполнительного органа электропривода отличается от перемещения исполнительного органа электропривода, формируемого задающим устройством, на величину ошибки.

В данной работе для прецизионного электропривода разрабатывается асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом без ограничения по скорости, позволяющая полностью избавиться от ошибки по перемещению его исполнительного органа.

На рисунках 1–3 приведена асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом без ограничения по скорости. Для данной диаграммы перемещения исполнительного органа справедливы следующие четырнадцать уравнений:

$$C_m I_{\text{доп}} = M_{\text{co}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max}}^{(1)}; \quad (1)$$

$$\omega_{\text{max}}^{(4)} = \omega_{\text{max}}^{(5)} \cdot t_1; \quad (2)$$

$$\omega_{\max}^{(3)} = \omega_{\max}^{(4)} \cdot t_1 = \omega_{\max}^{(5)} \cdot t_1^2; \quad (3)$$

$$\omega_{\max}^{(2)} = 2\omega_{\max}^{(3)} \cdot t_1 = 2\omega_{\max}^{(5)} \cdot t_1^3; \quad (4)$$

$$\omega_{\max}^{(1)} = 4\omega_{\max}^{(2)} \cdot t_1 = 8\omega_{\max}^{(5)} \cdot t_1^4; \quad (5)$$

$$\omega_{\max} = \omega_{\max}^{(1)} \cdot (8t_1 + t_2); \quad (6)$$

$$-C_m I_{\text{доп}} = M_{\text{со}} + (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\min}^{(1)}; \quad (7)$$

$$\omega_{\max*}^{(4)} = \omega_{\max*}^{(5)} \cdot t_1; \quad (8)$$

$$\omega_{\max*}^{(3)} = \omega_{\max*}^{(4)} \cdot t_1 = \omega_{\max*}^{(5)} \cdot t_1^2; \quad (9)$$

$$\omega_{\max*}^{(2)} = 2\omega_{\max*}^{(3)} \cdot t_1 = 2\omega_{\max*}^{(5)} \cdot t_1^3; \quad (10)$$

$$\omega_{\min}^{(1)} = -4\omega_{\max*}^{(2)} \cdot t_1 = 8\omega_{\max*}^{(5)} \cdot t_1^4; \quad (11)$$

$$\omega_{\max} = -\omega_{\min}^{(1)} \cdot (8t_1 + t_3); \quad (12)$$

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{1}{2} \omega_{\max} \cdot (32t_1 + t_2 + t_3); \quad (13)$$

$$T_{\text{ц}} = 32t_1 + t_2 + t_3, \quad (14)$$

где 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; $\omega_{\max}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной скорости, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; $\omega_{\max}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной скорости при разгоне, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$; $\omega_{\max}^{(3)}$ – максимальное значение третьей производной скорости при разгоне, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$; $\omega_{\max}^{(4)}$ – максимальное значение четвертой производной скорости при разгоне, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$; $\omega_{\max}^{(5)}$ – максимальное значение пятой производной скорости при разгоне, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^6}$; ω_{\max} – максимальное значение скорости, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $\omega_{\min}^{(1)}$ – минимальное значение первой производной скорости, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$; $\omega_{\max*}^{(2)}$ – максимальное значение второй производной скорости при торможении, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$; $\omega_{\max*}^{(3)}$ – максимальное значение третьей производной скорости при торможении, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$; $\omega_{\max*}^{(4)}$ – максимальное значение четвертой производной скорости при торможении, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$; $\omega_{\max*}^{(5)}$ – максимальное значение пятой производной скорости при торможении, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^6}$; $\varphi_{\text{нач}}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад; $\varphi_{\text{кон}}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад; t_1 – длительность первого, третьего, четвертого, шестого, восьмого, десятого, одиннадцатого, тринадцатого, четырнадцатого, шестнадцатого, семнадцатого, девятнадцатого, двадцать первого, двадцать третьего, двадцать четвертого, двадцать шестого этапов, с; $2t_1$ – длительность второго, пятого, девятого, двенадцатого, пятнадцатого, восемнадцатого, двадцать второго, двадцать пятого этапов, с; t_2 – длительность седьмого этапа, с; t_3 – длительность двадцатого этапа, с; $T_{\text{ц}}$ – длительность цикла, с.

Из уравнения (1):

$$\omega_{\max}^{(1)} = \frac{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J_1 + J_2}. \quad (15)$$

Из уравнения (5) и зависимости (15):

$$\omega_{\max}^{(5)} = \frac{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{8 \cdot (J_1 + J_2) \cdot t_1^4}. \quad (16)$$

Из уравнения (7):

$$\omega_{\min}^{(1)} = -\frac{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J_1 + J_2}. \quad (17)$$

Из уравнения (12) и зависимости (17):

$$\omega_{\max}^{(5)} = \frac{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{8 \cdot (J_1 + J_2) \cdot t_1^4}. \quad (18)$$

Из уравнений (6) и (12), зависимостей (15) и (17):

$$t_3 = \frac{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}} \cdot (8t_1 + t_2) - 8t_1. \quad (19)$$

Из уравнений (6) и (12) и зависимости (15):

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J_1 + J_2} \cdot (8t_1 + t_2) \cdot (32t_1 + t_2 + t_3). \quad (20)$$

Из зависимостей (19) и (20):

$$t_2^2 + 8t_1 \cdot \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}}} + 3 \right) + t_2 + 64t_1^2 \cdot \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}}} + 2 \right) - \frac{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{J_1 + J_2}{C_m I_{\text{доп}}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 0. \quad (21)$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{J_1 + J_2}{C_m I_{\text{доп}}} \cdot (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) + 16t_1^2 \cdot \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}}} + 1 \right)^2} - 4t_1 \cdot \left(\frac{M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}}} + 3 \right). \quad (22)$$

Если $t_3 = 0$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.1}}$.

При этом

$$t_2 = \frac{16M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_1; \quad (23)$$

$$\omega_{\max} = 8 \cdot \frac{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J_1 + J_2} \cdot t_1; \quad (24)$$

$$\varphi_{\text{гр.1}} = 64 \cdot \frac{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{2C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot t_1^2. \quad (25)$$

Если $\omega_{\max} = \omega_{\text{доп}}$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}}$.

При этом:

$$t_2 = \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - 8t_1; \quad (26)$$

$$t_3 = \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}} - 8t_1; \quad (27)$$

$$\varphi_{\text{гр.2}} = \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}} \cdot \left[16t_1 + \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_m I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} + \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_m I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}} \right]. \quad (28)$$

В данной работе рассмотрена двухмассовая упругая электромеханическая система имеющая следующие параметры:

$$C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с};$$

$$J_1 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$J_2 = 0,1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

На контролируемые координаты двухмассовой упругой электромеханической системы накладывались следующие ограничения:

$$I_{\text{доп}} = 8 \text{ А};$$

$$\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \text{ – допустимое значение скорости, } \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Момент сопротивления имел следующее значение:

$$M_{\text{со}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

В работе выполнен численный эксперимент с целью определения зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа двухмассовой упругой электромеханической системы, результаты которого приведены в таблице 1.

Таблица 1

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}), \text{ рад}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$	$\omega_{\text{max}}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
57,6	0,8	0	2,4	48
84	1,1	0,1	2,8	60
115,2	1,4	0,2	3,2	72
151,2	1,7	0,3	3,6	84
192	2	0,4	4	96
237,6	2,3	0,5	4,4	108
288	2,6	0,6	4,8	120
343,2	2,9	0,7	5,2	132
403,2	3,2	0,8	5,6	144
468	3,5	0,9	6	156
490,67	3,6	0,933	6,133	160

Приведенная на рисунках 1–3 диаграмма имеет следующие параметры:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 84;$$

$$t_1 = 0,05 \text{ с}; t_2 = 1,1 \text{ с}; t_3 = 0,1 \text{ с}; T_{\text{ц}} = 2,8 \text{ с}; \omega_{\text{max}} = 60 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{max}}^{(1)} = 40 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{max}}^{(5)} = 800000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(1)} = -120 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\text{max}^*}^{(5)} = 2400000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^6}.$$

Выводы

Для прецизионного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом разработана асимметричная оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа без ограничения по скорости.

Получен алгоритм, позволяющий определить параметры асимметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом без ограничения по скорости.

Построены механические и электрические координаты особо точного электропривода постоянного тока с упругим валопроводом от времени при обработке им асимметричной оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа без ограничения по скорости.

Литература

1. Добрабаба Ю.П., Литаш Б.С. Квазиоптимальный по быстродействию программно-управляемый позиционный электропривод : монография / Кубан. гос. технол. ун-т. – Краснодар : Изд. ГУО ВО «КубГТУ», 2009. – 178 с.

2. Добробаба Ю.П., Хорцев А.Л. Особо точный позиционный электропривод постоянного тока : монография. – Краснодар : Изд-во ФГБОУ ВО «КубГТУ», 2014. – 104 с.

Literature

1. Dobrobaba Yu.P., Litash B.S. Quasi-optimal software-controlled positional electric drive : monograph / Kuban. state technol. un-t. – Krasnodar : Publ. GUO VO «KubGTU», 2009. – 178 p.
2. Dobrobaba Yu.P., Kortsov A.L. a Particularly precise positional DC electric drive : monograph. – Krasnodar : Publishing House of FGBOU VO «KubSTU», 2014. – 104 p.