

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ОПТИМАЛЬНОГО ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПРИ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ ЕГО ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА**



**INVESTIGATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS  
OF AN ELECTRIC DRIVE OPTIMAL IN TERMS OF SPEED  
WITH LARGE MOVEMENTS OF ITS EXECUTIVE BODY**

**Добробаба Юрий Петрович**

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

**Мурлина Владислава Анатольевна**

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

**Пшеничнов Евгений Александрович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Асланян Ярослав Вадимович**

студент,  
Кубанский государственный технологический университет

**Аннотация.** Предложена оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода (с ограничениями по максимальному и минимальному значениям тока, скорости и её второй производной). Диаграмма состоит из семи этапов. Определены аналитические зависимости для определения параметров диаграммы при больших перемещениях исполнительного органа электропривода.

**Ключевые слова:** оптимальная по быстродействию диаграмма, параметры диаграммы, граничное значение угла поворота.

**Dobrobaba Yury Petrovich**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate professor, Associate Professor  
of the Department of Power Supply  
Industrial Enterprises,  
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

**Pshenichnov Evgeny Aleksandrovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Aslanyan Yaroslav Vadimovich**

Student,  
Kuban State Technological University

**Annotation.** An optimal performance diagram is proposed for large displacements of the actuator (with restrictions on the maximum and minimum values of current, speed and its second derivative). The diagram consists of seven stages. The analytical dependences for determining the parameters of the diagram for large movements of the executive body of the electric drive are determined.

**Keywords:** optimal performance diagram, diagram parameters, boundary value of the rotation angle.

**В** настоящее время известна оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода с ограничениями по скорости и её первой и второй производным (используется при больших перемещениях) [1]. Достоинства такой диаграммы – простота определения параметров диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода и инвариантность к изменению момента сопротивления электропривода. Однако при движении электропривода в соответствии с известной диаграммой перемещения его исполнительного органа время цикла значительно превышает свое минимально возможное значение.

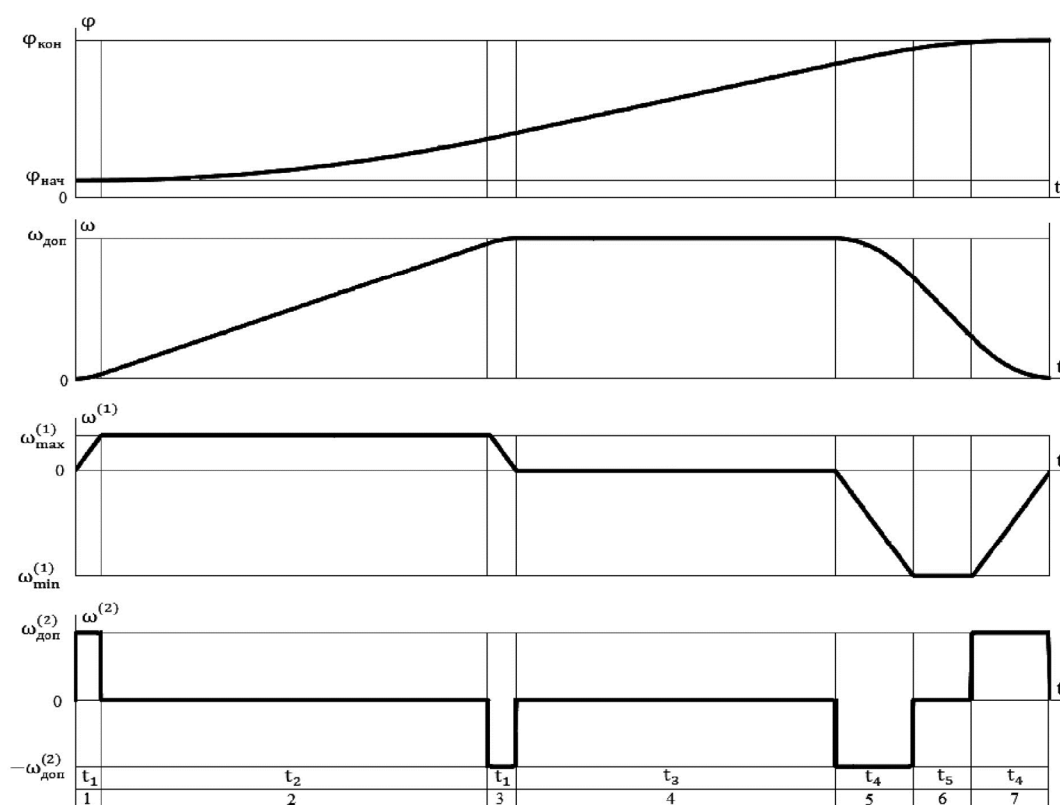
В данной статье исследуются динамические характеристики оптимального по быстродействию электропривода (с ограничениями по максимальному и минимальному значениям тока, скорости и её второй производной) при больших перемещениях его исполнительного органа.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода (механические координаты). На рисунке приняты следующие обозначения:

$\varphi$  – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;

$\omega$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода, рад/с;

- $\omega^{(1)}$  – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с<sup>2</sup>;  
 $\omega^{(2)}$  – вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с<sup>3</sup>;  
 $t$  – время, с;  
 $\varphi_{нач}$  – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;  
 $\varphi_{кон}$  – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;  
 $\omega_{доп}$  – допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с;  
 $\omega_{max}^{(1)}$  – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с<sup>2</sup>;  
 $\omega_{min}^{(1)}$  – минимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с<sup>2</sup>;  
 $\omega_{доп}^{(2)}$  – допустимое значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с<sup>3</sup>;  
 $t_1$  – длительность первого и третьего этапов, с;  
 $t_2$  – длительность второго этапа, с;  
 $t_3$  – длительность четвёртого этапа, с;  
 $t_4$  – длительность пятого и седьмого этапов, с;  
 $t_5$  – длительность шестого этапа, с.



**Рисунок 1** – Оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода (механические координаты)

На рисунке 2 представлены оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода (электрические координаты).

На рисунке приняты следующие обозначения:

$U$  – напряжение, приложенное к якорной цепи электропривода, В;

$I_{я}$  – ток якорной цепи электропривода, А;  
 $U_{доп}$  – допустимое значение напряжения, приложенного к якорной цепи электропривода, В;  
 $R_{я}$  – сопротивление якорной цепи электропривода, Ом;  
 $I_{доп}$  – допустимое значение тока якорной цепи электропривода, А;  
 $C_M$  – коэффициент пропорциональности между током и моментом двигателя, В·с;  
 $M_{со}$  – момент сопротивления электропривода, Н·м.



Рисунок 2 – Оптимальная по быстродействию диаграмма при больших перемещениях исполнительного органа электропривода (электрические координаты)

Для данного электропривода справедливо соотношения:

$$\begin{aligned}
 C_M I_{доп} &= M_{со} + J \omega_{max}^{(1)}; \\
 -C_M I_{доп} &= M_{со} + J \omega_{min}^{(1)}; \\
 \omega_{max}^{(1)} &= \omega_{доп}^{(2)} \cdot t_1; \\
 \omega_{min}^{(1)} &= -\omega_{доп}^{(2)} \cdot t_4; \\
 \omega_{доп} &= \omega_{max}^{(1)} \cdot (t_1 + t_2); \\
 \omega_{доп} &= -\omega_{min}^{(1)} \cdot (t_4 + t_5); \\
 (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) &= \omega_{доп} \cdot \left( t_1 + \frac{1}{2} \cdot t_2 + t_3 + t_4 + \frac{1}{2} \cdot t_5 \right); \\
 T_{ц} &= 2t_1 + t_2 + t_3 + 2t_4 + t_5,
 \end{aligned}$$

где  $J$  – момент инерции исполнительного органа электропривода, кг· м<sup>2</sup>;  
 $T_{ц}$  – время цикла, с.

Из данных соотношений определяется параметры оптимальной по быстродействию диаграммы при больших перемещениях исполнительного органа электропривода:

$$\omega_{max}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{со}}{J};$$

$$\begin{aligned} \omega_{\min}^{(1)} &= -\frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}}{J}; \\ t_1 &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}; \\ t_2 &= \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}; \\ t_3 &= \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}} - \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}; \\ t_4 &= \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}; \\ t_5 &= \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}; \\ T_{\text{ц}} &= \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{\omega_{\text{доп}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}. \end{aligned}$$

Если  $t_3 = 0$ , то  $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.3}}$ . При этом третье граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода определяется по формуле

$$\varphi_{\text{гр.3}} = \frac{1}{2} \omega_{\text{доп}} \cdot \left[ \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}} + \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}} + \frac{J \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}} + \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{CO}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}} \right].$$

Предлагаемая диаграмма перемещения применима при выполнении условия  $\varphi_{\text{гр.3}} \leq (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ .

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры:  $C_e = 1,25 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;  $C_M = 1,25 \text{ В} \cdot \text{с}$ ;  $R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}$ ;  $L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}$ ;  $J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , где  $C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью электродвигателя и его ЭДС,  $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ ;  $L_{\text{я}}$  – индуктивность якорной цепи электропривода, Гн.

На контролируемые координаты электропривода наложены ограничения:  $U_{\text{доп}} = 250 \text{ В}$ ;  $I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}$ ;  $\omega_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ .

Момент сопротивления равен  $M_{\text{CO}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

При этом вторая производная угловой скорости электродвигателя равна  $\omega_{\text{доп}}^{(2)} = 1000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ .

В работе выполнены численные эксперименты, результаты которых представлены в таблицах № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, с целью доказать эффективность предлагаемой диаграммы для больших перемещений исполнительного органа электропривода при различных значениях момента сопротивления.

Если  $M_{\text{CO}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то  $\varphi_{\text{гр.3}} = 202 \frac{2}{3} \text{ рад}$ .

Таблица 1 – Результаты первого численного эксперимента

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}), \text{ рад}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_4, \text{ с}$	$t_5, \text{ с}$	$T_{\text{ц}}, \text{ с}$
$202 \frac{2}{3}$	0,1	1,5	0	0,3	$\frac{7}{30}$	$2 \frac{8}{15}$
400	0,1	1,5	$1 \frac{7}{30}$	0,3	$\frac{7}{30}$	$3 \frac{23}{30}$

Если  $M_{\text{CO}} = 3,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то  $\varphi_{\text{гр.3}} = 180 \frac{52}{55} \text{ рад}$ .

Таблица 2 – Результаты второго численного эксперимента

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ , рад	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$T_{\text{ц}}$ , с
$180 \frac{52}{55}$	0,125	1,155	0	0,275	$\frac{27}{88}$	$2 \frac{72}{275}$
400	0,125	1,155	$1 \frac{203}{550}$	0,275	$\frac{27}{88}$	$3 \frac{347}{550}$

Если  $M_{\text{CO}} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то  $\varphi_{\text{гр.3}} = 168 \frac{8}{15}$  рад.

Таблица 3 – Результаты третьего численного эксперимента

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ , рад	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$T_{\text{ц}}$ , с
$168 \frac{8}{15}$	0,15	$\frac{11}{12}$	0	0,25	0,39	$2 \frac{8}{75}$
400	0,15	$\frac{11}{12}$	$1 \frac{67}{150}$	0,25	0,39	$3 \frac{83}{150}$

Если  $M_{\text{CO}} = 1,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то  $\varphi_{\text{гр.3}} = 162 \frac{2}{63}$  рад.

Таблица 4 – Результаты четвертого численного эксперимента

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ , рад	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$T_{\text{ц}}$ , с
$162 \frac{2}{63}$	0,175	$\frac{207}{280}$	0	0,225	$\frac{35}{72}$	$2 \frac{8}{315}$
400	0,175	$\frac{207}{280}$	$1 \frac{307}{630}$	0,225	$\frac{35}{72}$	$3 \frac{323}{630}$

Если  $M_{\text{CO}} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то  $\varphi_{\text{гр.3}} = 160$  рад.

Таблица 5 – Результаты пятого численного эксперимента

$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ , рад	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	$t_4$ , с	$t_5$ , с	$T_{\text{ц}}$ , с
160	0,2	0,6	0	0,2	0,6	2
400	0,2	0,6	1,5	0,2	0,6	3,5

На рисунке 3 на основании проведенных численных экспериментов построены зависимости длительности цикла  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения исполнительного органа электропривода  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ .

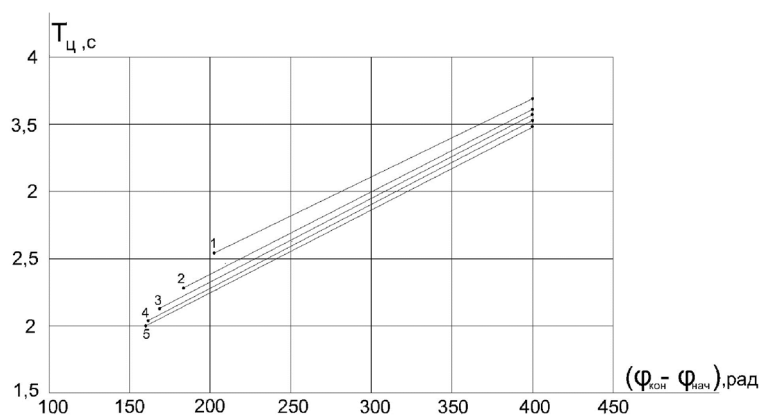


Рисунок 3 – Зависимость длительности цикла  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения исполнительного органа электропривода  $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ : 1) для  $M_{\text{CO}} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; 2) для  $M_{\text{CO}} = 3,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; 3) для  $M_{\text{CO}} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; 4) для  $M_{\text{CO}} = 1,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ; 5) для  $M_{\text{CO}} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$

### **Выводы**

При перемещении исполнительного органа рассматриваемого электропривода на 400 радиан в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой с ограничениями по скорости и её первой и второй производных затрачивается 4,2 секунды [1]. При уменьшении момента сопротивления электропривода длительность цикла остается постоянной [1].

При перемещении исполнительного органа электропривода на 400 радиан в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой с ограничениями по максимальному и минимальному значениям тока, скорости и её второй производной при номинальной нагрузке  $M_{CO} = 5$  Н·м время цикла уменьшается по сравнению с типовым решением на 13/30 секунды. При уменьшении момента сопротивления электропривода по сравнению с номинальным достигается дополнительное уменьшение времени цикла  $T_c$ .

### **Литература**

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

### **References**

1. Dobrobaba Yu.P., Khortsev A.L. Particularly accurate positional direct current electric drive: monograph. – Krasnodar : Publishing house of FGBOU VO «KubGTU», 2014. – 104 p.