

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



**INVESTIGATION OF THE DYNAMIC CHARACTERISTICS
OF AN ELECTRIC DRIVE OPTIMAL IN TERMS OF SPEED
WITH AVERAGE 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 средних перемещениях исполнительного органа электропривода (с ограничениями по максимальному и минимальному значениям тока, второй производной скорости). Диаграмма состоит из пяти этапов. Определены аналитические зависимости для определения параметров диаграммы при средних 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 average displacements of the actuator (with restrictions on the maximum and minimum values of current, second derivative of speed). 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 в промышленности широкое применение находит оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода с ограничениями по первой и второй производным скорости (используется при средних перемещениях) [1]. Такая диаграмма имеет следующие достоинства: 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 и второй производной скорости) при средних перемещениях его исполнительного органа.

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

φ – угол поворота исполнительного органа электропривода, рад;

ω – угловая скорость исполнительного органа электропривода, рад/с;

- $\omega^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с²;
 $\omega^{(2)}$ – вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с³;
 t – время, с;
 $\varphi_{нач}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
 $\varphi_{кон}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;
 ω_{max} – максимальное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с;
 $\omega_{max}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с²;
 $\omega_{min}^{(1)}$ – минимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с²;
 $\omega_{доп}^{(2)}$ – допустимое значение второй производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, рад/с³;
 t_1 – длительность первого и части третьего этапов, с;
 t_2 – длительность второго этапа, с;
 t_4 – длительность частитретьего и пятогоэтапов, с;
 t_5 – длительность четвертогоэтапа, с.

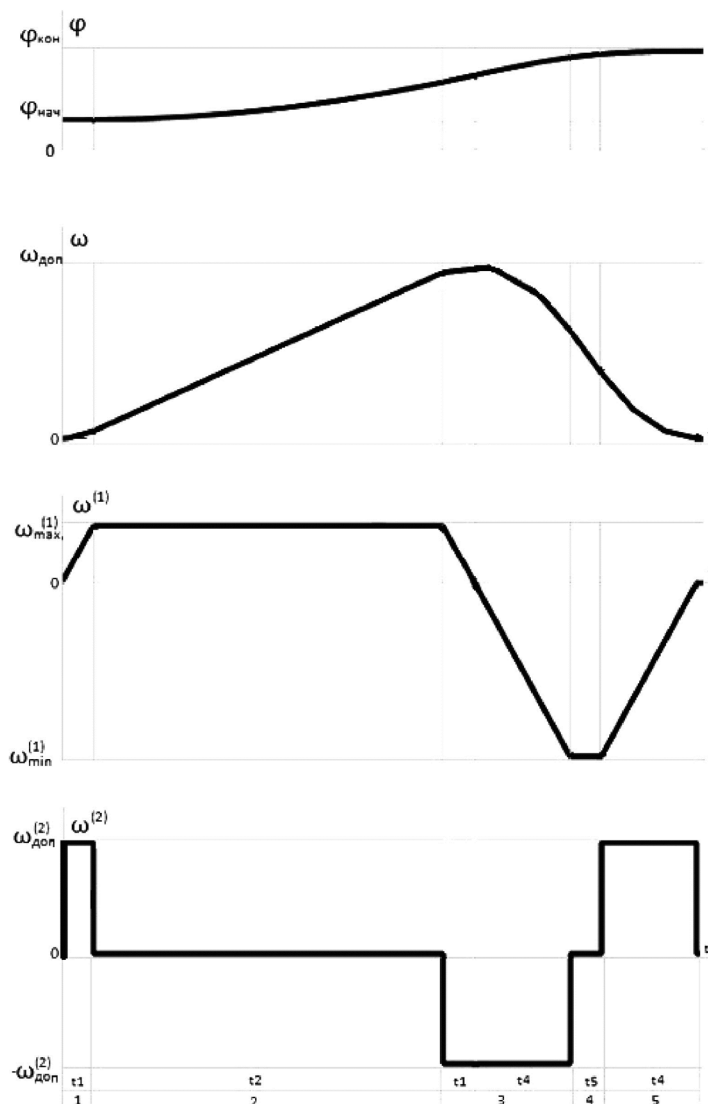


Рисунок 1 – Оптимальная по быстродействию диаграмма при средних перемещениях исполнительного органа электропривода (механические координаты)

На рисунке 2 представлены оптимальная по быстродействию диаграмма при средних 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.

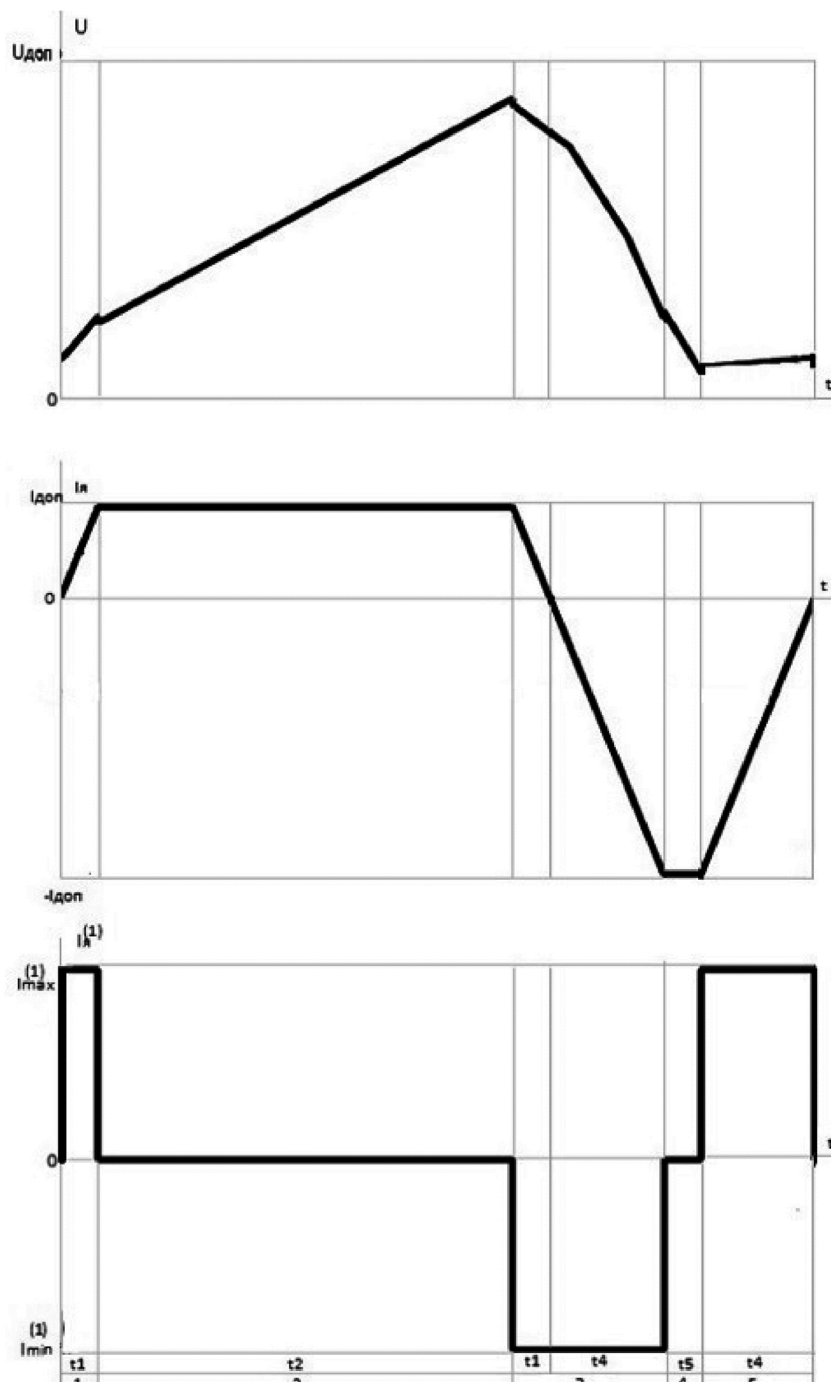


Рисунок 2 – Оптимальная по быстродействию диаграмма при средних перемещениях исполнительного органа электропривода (электрические координаты)

Для данного электропривода справедливо соотношение:

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

где J – момент инерции исполнительного органа электропривода, кг·м²;
 $T_{\text{ц}}$ – время цикла, с.

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

$$\begin{aligned} \omega_{\text{max}}^{(1)} &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J}; \\ \omega_{\text{min}}^{(1)} &= -\frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J}; \\ t_1 &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}; \\ t_2 &= \sqrt{\frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{J(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})}{C_M I_{\text{доп}}} + \frac{(C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}})^2}{4J^2 \cdot [\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^2}} - \frac{3C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{2J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}}; \\ t_4 &= \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}; \\ t_5 &= \sqrt{\frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}} \cdot \frac{J(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})}{C_M I_{\text{доп}}} + \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})^2}{4J^2 \cdot [\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^2}} - \frac{3C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{2J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}}; \\ \omega_{\text{max}} &= \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J} \times \left\{ \sqrt{\frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} \cdot \frac{J(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})}{C_M I_{\text{доп}}} + \frac{(C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}})^2}{4J^2 \cdot [\omega_{\text{доп}}^{(2)}]^2}} - \frac{C_M I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{2J \omega_{\text{доп}}^{(2)}}} \right\}. \end{aligned}$$

Если $t_5 = 0$, то $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \varphi_{\text{гр.2}}$. При этом второе граничное значение угла поворота исполнительного органа электропривода определяется по формуле

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

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

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

Или

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

Предлагаемая диаграмма перемещения применима при выполнении условия $\varphi_{гр.2} \leq (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) \leq \varphi_{гр.3}$.

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

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

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

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

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

При $M_{CO} = 5 Н \cdot м$, $\varphi_{гр.2} = 72 рад$ и $\varphi_{гр.3} = 202 \frac{2}{3} рад$.

Таблица 1 – Результаты первого численного эксперимента

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}), рад$	$t_2, с$	$t_5, с$	$T_{ц}, с$	$\omega_{max}, \frac{рад}{с}$
72	0,8	0	1,6	90
$86 \frac{2}{3}$	0,9	$\frac{1}{30}$	$1 \frac{11}{15}$	100
$102 \frac{2}{3}$	1	$\frac{1}{15}$	$1 \frac{13}{15}$	110
120	1,1	0,1	2	120
$138 \frac{2}{3}$	1,2	$\frac{2}{15}$	$2 \frac{2}{15}$	130
$158 \frac{2}{3}$	1,3	$\frac{1}{6}$	$2 \frac{4}{15}$	140
180	1,4	0,2	2,4	150
$202 \frac{2}{3}$	1,5	$\frac{7}{30}$	$2 \frac{8}{15}$	160

Остальные параметры диаграммы:

$$\omega_{max}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2}; \omega_{min}^{(1)} = -300 \frac{рад}{с^2}; t_1 = 0,1 с; t_4 = 0,3 с$$

При $M_{CO} = 3,75 Н \cdot м$, $\varphi_{гр.2} = 48,4 рад$ и $\varphi_{гр.3} = 180 \frac{52}{55} рад$.

Таблица 2 – Результаты второго численного эксперимента

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}), рад$	$t_2, с$	$t_5, с$	$T_{ц}, с$	$\omega_{max}, \frac{рад}{с}$
48,4	0,48	0	1,28	75,625
64,35	0,59	0,05	1,44	89,375
82,5	0,7	0,1	1,6	103,125
102,85	0,81	0,15	1,76	116,875
125,4	0,92	0,2	1,92	130,625
150,15	1,03	0,25	2,08	144,375
177,1	1,14	0,3	2,24	158,125
$180 \frac{52}{55}$	1,155	$\frac{27}{88}$	$2 \frac{72}{275}$	160

Остальные параметры диаграммы:

$$\omega_{max}^{(1)} = 125 \frac{рад}{с^2}; \omega_{min}^{(1)} = -275 \frac{рад}{с^2}; t_1 = 0,125 с; t_4 = 0,275 с.$$

При $M_{C0} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\varphi_{гр.2} = 33\frac{1}{3}$ рад и $\varphi_{гр.3} = 168\frac{8}{15}$ рад.

Таблица 3 – Результаты третьего численного эксперимента

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}), \text{ рад}$	$t_2, \text{ с}$	$t_5, \text{ с}$	$T_{ц}, \text{ с}$	$\omega_{max}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
$33\frac{1}{3}$	$\frac{4}{15}$	0	$1\frac{2}{30}$	62,5
45	0,35	0,05	1,2	75
61,2	0,45	0,11	1,36	90
79,8	0,55	0,17	1,52	105
100,8	0,65	0,23	1,68	120
124,2	0,75	0,29	1,84	135
150	0,85	0,35	2	150
$168\frac{8}{15}$	$\frac{11}{12}$	0,39	$2\frac{8}{75}$	160

Остальные параметры диаграммы:

$$\omega_{max}^{(1)} = 150 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{min}^{(1)} = -250 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; t_1 = 0,15 \text{ с}; t_4 = 0,25 \text{ с}.$$

При $M_{C0} = 1,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\varphi_{гр.2} = 23\frac{1}{7}$ рад и $\varphi_{гр.3} = 160\frac{2}{63}$ рад.

Таблица 4 – Результаты четвертого численного эксперимента

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}), \text{ рад}$	$t_2, \text{ с}$	$t_5, \text{ с}$	$T_{ц}, \text{ с}$	$\omega_{max}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
$23\frac{1}{7}$	$\frac{4}{35}$	0	$\frac{32}{35}$	50,625
26,46	0,14	0,02	0,96	55,125
32,76	0,185	0,055	1,04	63
39,69	0,23	0,09	1,12	70,875
47,25	0,275	0,125	1,2	78,75
55,44	0,32	0,16	1,28	86,625
64,26	0,365	0,195	1,36	94,5
73,71	0,41	0,23	1,44	102,375
83,79	0,455	0,265	1,52	110,25
94,5	0,5	0,3	1,6	118,125
105,84	0,545	0,335	1,68	126
117,81	0,59	0,37	1,76	133,875
130,41	0,635	0,405	1,84	141,75
143,64	0,68	0,44	1,92	149,625
15,5	0,725	0,475	2	157,5
$160\frac{2}{63}$	$\frac{207}{280}$	$\frac{35}{72}$	$2\frac{8}{315}$	160

Остальные параметры диаграммы:

$$\omega_{max}^{(1)} = 175 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{min}^{(1)} = -225 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; t_1 = 0,175 \text{ с}; t_4 = 0,225 \text{ с}.$$

При $M_{C0} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\varphi_{гр.2} = 16$ рад и $\varphi_{гр.3} = 160$ рад.

Таблица 5 – Результаты пятого численного эксперимента

$(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}), \text{ рад}$	$t_2, \text{ с}$	$t_5, \text{ с}$	$T_{ц}, \text{ с}$	$\omega_{max}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$
16	0	0	0	40
30	0,1	0,1	1	60
48	0,2	0,2	1,2	80
70	0,3	0,3	1,4	100
96	0,4	0,4	1,6	120
126	0,5	0,5	1,8	140
160	0,6	0,6	2	160

Остальные параметры диаграммы:

$$\omega_{\max}^{(1)} = 200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; \omega_{\min}^{(1)} = -200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}; t_1 = 0,2 \text{ с}; t_4 = 0,2 \text{ с}.$$

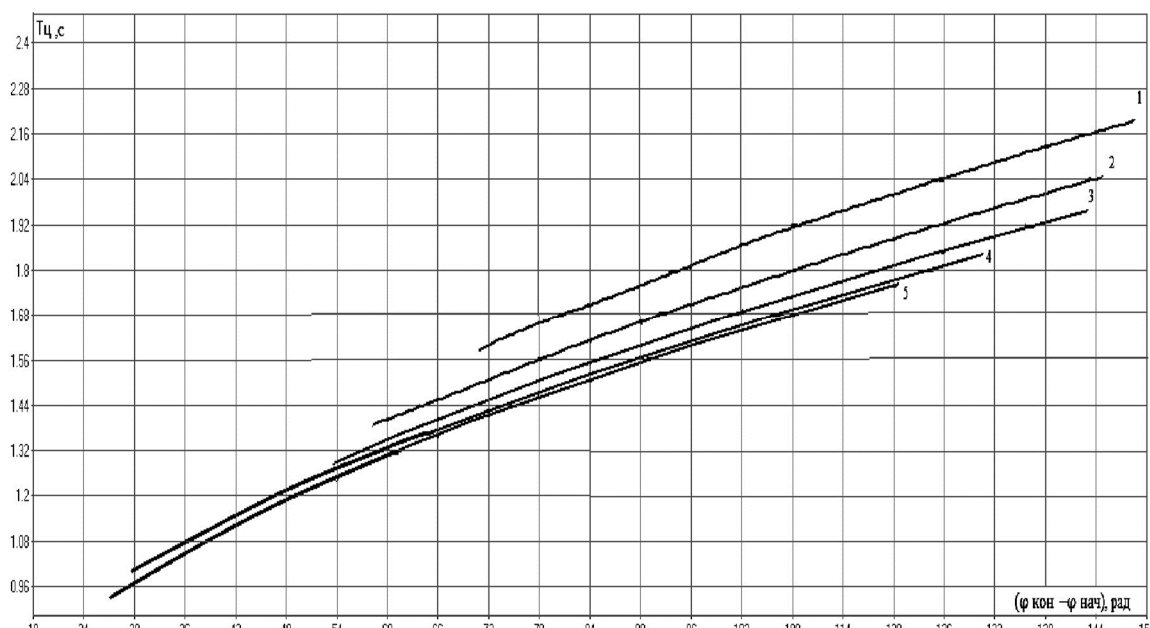


Рисунок 3 – Зависимость длительности цикла $T_{ц}$ от заданного перемещения исполнительного органа электропривода $\Delta\varphi = (\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$: 1) для $M_{CO} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$; 2) для $M_{CO} = 3,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$; 3) для $M_{CO} = 2,5 \text{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

Выводы

Электропривод осуществляет перемещение своего исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой с ограничениями по первой и второй производным скорости на 180 радиан за 2,785144316 секунд [1]. При этом уменьшения момента сопротивления электропривода длительность цикла остается постоянной [1].

При перемещении исполнительного органа электропривода на 180 радиан в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой с ограничениями по максимальному и минимальному значениям тока и второй производной скорости при номинальной загрузки $M_{CO} = 5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ время цикла уменьшается по сравнению с типовым решением на 0,385144316 секунды. При уменьшении момента сопротивления электропривода по сравнению с номинальным достигается дополнительное уменьшение времени цикла $T_{ц}$.

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.