

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММЫ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА ОСОБО ТОЧНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА С ОГРАНИЧЕНИЯМИ ПО МАКСИМАЛЬНОМУ ЗНАЧЕНИЮ ТОКА И ТРЕТЬЕЙ ПРОИЗВОДНОЙ СКОРОСТИ

Ю.П. ДОБРОБАБА, Г.А. КОШКИН, Ж.И. ШЕВЧЕНКО, Ю.В. ХОЛОДИЛОВ

*Кубанский государственный технологический университет,
350002, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Московская, 2;
электронная почта: kholodilov94@mail.ru*

Решена задача оптимального по быстродействию управления перемещением исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости. Разработан алгоритм, позволяющий определить параметры оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости. Установлена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости. Выполнен численный эксперимент, по результатам которого построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода от заданного перемещения (угла поворота) при различных значениях момента сопротивления электропривода.

Ключевые слова: особо точный электропривод, оптимальное по быстродействию перемещение исполнительного органа электропривода, ограничение по максимальному значению тока.

В настоящее время известны оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями [1]:

- третьей производной скорости;
- первой и третьей производной скорости;
- скорости и её первой и третьей производных.

В данной работе предлагается разработать оптимальную по быстродействию диаграмму перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничением по максимальному значению тока и третьей производной скорости.

На рисунке 1 предоставлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости.

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости состоит из восьми этапов. На первом, пятом и седьмом этапах третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(3)}$ равна максимальному значению $\omega_{max}^{(3)}$; на втором, четвертом, шестом и восьмом этапах третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(3)}$ равна максимальному значению со знаком «минус» $-\omega_{max}^{(3)}$; на третьем этапе третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю. Длительность первого, второго, четвертого и пятого этапов равна t_1 ; длительность третьего этапа равна t_2 ; длительность шестого и восьмого этапов равна t_3 ; длительность седьмого этапа равна $2t_3$. В момент времени t_1 вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(2)}$ достигает максимального значения $\omega_{max}^{(2)}$; в момент времени $(3t_1 + t_2)$ вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(2)}$ достигает максимального значения со знаком «минус» $-\omega_{max}^{(2)}$; в момент времени $(4t_1 + t_2 + t_3)$ вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(2)}$ достигает минимального значения $\omega_{min}^{(2)}$; в момент времени $(4t_1 + t_2 + 3t_3)$ вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(2)}$ достигает минимального значения со знаком «минус» $-\omega_{min}^{(2)}$. В момент времени $2t_1$ первая производная угловой скорости

электропривода $\omega^{(1)}$ достигает первого максимально допустимого значения $\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}$ (при этом ток якорной цепи электропривода $I_{\text{я}}$ достигает максимально допустимого значения $I_{\text{доп}}$); на третьем этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(1)}$ равно первому максимально допустимому значению $\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}$ (ток якорной цепи электропривода $I_{\text{я}}$ равен максимально допустимому значению $I_{\text{доп}}$); в момент времени $(4t_1 + t_2 + 2t_3)$ первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода $\omega^{(1)}$ достигает минимального значения $\omega_{\text{min}}^{(1)}$. В момент времени $(4t_1 + t_2)$ угловая скорость исполнительного органа электропривода ω достигает максимального значения ω_{max} . За время цикла $T_{\text{ц}} = 4t_1 + t_2 + 4t_3$ угол поворота исполнительного органа электропривода изменяется от начального значения угла поворота $\varphi_{\text{нач}}$ до конечного значения угла поворота $\varphi_{\text{кон}}$.

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости справедливы следующие соотношения:

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{J};$$

$$\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = \frac{C_{\text{м}} I_{\text{доп}} + M_{\text{со}}}{J};$$

$$t_1 = \sqrt{\frac{\omega_{\text{доп.1}}^{(1)}}{\omega_{\text{max}}^{(3)}}};$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = \sqrt{\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} \omega_{\text{max}}^{(3)}};$$

$$t_3^6 + 2t_1^2 t_3^4 + t_1^3 t_3^3 - \frac{\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}}{2\omega_{\text{max}}^{(3)}} \cdot t_1^2 = 0;$$

$$\omega_{\text{max}} = 2\omega_{\text{max}}^{(3)} \cdot t_3^3;$$

$$t_2 = \frac{\omega_{max}}{\omega_{доп.1}^{(1)}} - 2t_1;$$

$$\omega_{min}^{(1)} = -\omega_{max}^{(3)} \cdot t_3^2;$$

$$\omega_{min}^{(2)} = -\omega_{max}^{(3)} \cdot t_3;$$

$$T_{ц} = 4t_1 + t_2 + 4t_3,$$

где M_{co} – момент сопротивления электропривода, Н·м;

$\omega_{доп.2}^{(1)}$ – второе максимально допустимое значение первой производной угловой скорости электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$.

Если длительность третьего этапа t_2 равна нулю, то угол поворота исполнительного органа электропривода ($\varphi_{кон} - \varphi_{нач}$) равен первому граничному значению $\varphi_{гр.1}$.

Если минимальное значение первой производной угловой скорости электропривода равно второму максимально допустимому значению первой производной угловой скорости электропривода, взятому со знаком «минус», $-\omega_{доп.2}^{(1)}$ (при этом ток якорной цепи электропривода равен максимально допустимому значению, взятому со знаком «минус» $-I_{доп}$), то угол поворота исполнительного органа электропривода ($\varphi_{кон} - \varphi_{нач}$) равен второму граничному значению $\varphi_{гр.2}$.

Область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости:

$$\varphi_{гр.1} \leq (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) \leq \varphi_{гр.2},$$

$$\text{где } \varphi_{гр.1} = 8 \cdot \frac{[\omega_{доп.1}^{(1)}]^2}{\omega_{max}^{(3)}};$$

$$\varphi_{гр.2} = 2\omega_{доп.2}^{(1)} \cdot \sqrt{\frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(3)}}} \cdot \left[\sqrt{\frac{\omega_{доп.1}^{(1)}}{\omega_{max}^{(3)}}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(3)}}} + \frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{доп.1}^{(1)}} \cdot \sqrt{\frac{\omega_{доп.2}^{(1)}}{\omega_{max}^{(3)}}} \right].$$

Проведён численный эксперимент с целью определения зависимостей длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода $T_{ц}$ от заданного перемещения (угла поворота) $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ при различных значениях момента сопротивления электропривода $M_{со}$.

В работе рассматривается электропривод, имеющий следующие параметры и ограничения:

$$C_e = 1,25 \frac{В \cdot с}{рад}; C_M = 1,25 В \cdot с; R_{я} = 5 \text{ Ом}; L_{я} = 0,1 \text{ Гн}; J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2;$$

$$U_{доп} = 250 \text{ В}; I_{доп} = 8 \text{ А}; \omega_{доп} = 160 \frac{рад}{с}.$$

При этом максимальное значение третьей производной угловой скорости электропривода равнялось $\omega_{max}^{(3)} = 40000 \frac{рад}{с^4}$.

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

$$\omega_{доп.1}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 - 5}{0,05} = 100 \frac{рад}{с^2};$$

$$\omega_{доп.2}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 + 5}{0,05} = 300 \frac{рад}{с^2}.$$

$$\varphi_{гр.1} = 8 \cdot \frac{100^2}{40000} = 2 \text{ рад};$$

$$\begin{aligned} \varphi_{гр.2} &= 2 \cdot 300 \cdot \sqrt{\frac{300}{40000}} + \left[\sqrt{\frac{100}{40000}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{300}{40000}} + \frac{300}{100} \cdot \sqrt{\frac{300}{40000}} \right] = \frac{3}{2} \cdot (15 + \sqrt{3}) \approx \\ &\approx 25,098075 \text{ рад}. \end{aligned}$$

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 2 \text{ рад}$, то

$$t_1 = 0,05 \text{ с}; t_2 = 0 \text{ с}; t_3 = 0,05 \text{ с}; T_{ц} = 0,4 \text{ с}; \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{рад}{с^3}; \omega_{max} = 10 \frac{рад}{с};$$

$$\omega_{min}^{(2)} = -2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -100 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 4,430592$ рад, то

$$t_1 = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = 0,0728 \text{ с}; \quad t_3 = 0,06 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 0,5128 \text{ с}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{max} = 17,28 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -2400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -144 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 8,978368$ рад, то

$$t_1 = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = 0,1744 \text{ с}; \quad t_3 = 0,07 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 0,6544 \text{ с}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{max} = 27,44 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -2800 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -196 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 16,990208$ рад, то

$$t_1 = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = 0,3096 \text{ с}; \quad t_3 = 0,08 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 0,8296 \text{ с}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{max} = 40,96 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -3200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -256 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{3}{2} \cdot (15 + \sqrt{3}) \approx 25,098075$ рад, то

$$t_1 = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = \frac{3\sqrt{3}-1}{10} \approx 0,4196152 \text{ с}; \quad t_3 = \frac{\sqrt{3}}{20} \approx 0,0866025 \text{ с};$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{5\sqrt{3}+1}{10} \approx 0,9660254 \text{ с}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 30\sqrt{3} \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{min}^{(2)} = -2000\sqrt{3} \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -300 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Вторая серия эксперимента. $M_{\text{со}} = 3,75$ Н·м.

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 - 3,75}{0,05} = 125 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$$

$$\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 + 3,75}{0,05} = 275 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

$$\varphi_{гр.1} = 8 \cdot \frac{125^2}{40000} = 3,125 \text{ рад};$$

$$\varphi_{гр.2} = 2 \cdot 275 \cdot \sqrt{\frac{275}{40000}} \cdot \left[\sqrt{\frac{125}{40000}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{275}{40000}} + \frac{275}{125} \cdot \sqrt{\frac{275}{40000}} \right] = \frac{11}{32} \cdot \left(\frac{231}{5} + \sqrt{55} \right) \approx 18,430567 \text{ рад}.$$

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 3,125$ рад, то

$$t_1 = 0,0559016 \text{ с}; \quad t_2 = 0 \text{ с}; \quad t_3 = 0,0559016 \text{ с}; \quad T_{ц} = 0,4472128 \text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2236,0679 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 13,9754 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -2236,0679 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{min}^{(1)} = -125 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 4,2339732$ рад, то

$$t_1 = 0,0559016 \text{ с}; \quad t_2 = 0,0264368 \text{ с}; \quad t_3 = 0,06 \text{ с}; \quad T_{ц} = 0,4900432 \text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2236,0679 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 17,28 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{min}^{(2)} = -2400 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -144 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 8,3873543$ рад, то

$$t_1 = 0,0559016 \text{ с}; \quad t_2 = 0,1077168 \text{ с}; \quad t_3 = 0,07 \text{ с}; \quad T_{ц} = 0,6113232 \text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2236,0679 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 27,44 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -2800 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{min}^{(1)} = -196 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) = 15,554215$ рад, то

$$t_1 = 0,0559016 \text{ с}; \quad t_2 = 0,2158768 \text{ с}; \quad t_3 = 0,08 \text{ с}; \quad T_{ц} = 0,7594832 \text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2236,0679 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 40,96 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -3200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{min}^{(1)} = -256 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{11}{160} \cdot (231 + 5\sqrt{55}) \approx 18,430567$ рад, то

$$t_1 = \frac{\sqrt{5}}{40} \approx 0,0559016 \text{ с};$$

$$t_2 = \frac{11\sqrt{11} - 5\sqrt{5}}{100} \approx 0,2530253 \text{ с};$$

$$t_3 = \frac{\sqrt{11}}{40} \approx 0,0829156 \text{ с};$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{21\sqrt{11} + 5\sqrt{5}}{100} = 0,8082945 \text{ с};$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = 2236,0679 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{\text{max}} = \frac{55\sqrt{11}}{4} \approx 45,603587 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = -1000\sqrt{11} \approx -3316,6247 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{\text{min}}^{(1)} = -275 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Третья серия эксперимента. $M_{\text{св}} = 2,5 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 - 2,5}{0,05} = 150 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$$

$$\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 + 2,5}{0,05} = 250 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

$$\varphi_{\text{гр.1}} = 8 \cdot \frac{150^2}{40000} = 4,5 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{гр.2}} = 2 \cdot 250 \cdot \sqrt{\frac{250}{40000}} \cdot \left[\sqrt{\frac{150}{40000}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{250}{40000}} + \frac{250}{150} \cdot \sqrt{\frac{250}{40000}} \right] = \frac{5}{24} \cdot (55 + 3\sqrt{15}) \approx 13,878947 \text{ рад}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 4,5$ рад, то

$$t_1 = 0,0612372 \text{ с}; \quad t_2 = 0 \text{ с}; \quad t_3 = 0,0612372 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 0,4898976 \text{ с};$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = 2449,488 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{\text{max}} = 18,37116 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{\text{min}}^{(2)} = -2449,488 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(1)} = -150 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 8,0317935$ рад, то

$$t_1 = 0,0612372 \text{ с}; \quad t_2 = 0,0604589 \text{ с}; \quad t_3 = 0,07 \text{ с}; \quad T_{ц} = 0,5854077 \text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2449,488 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 27,44 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{min}^{(2)} = -2800 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -196 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{5}{24} \cdot (55 + 3\sqrt{15}) \approx 13,878947 \text{ рад}$, то

$$t_1 = \frac{\sqrt{6}}{40} \approx 0,0612372 \text{ с};$$

$$t_2 = \frac{\sqrt{10}}{12} - \frac{\sqrt{6}}{20} \approx 0,1410487 \text{ с};$$

$$t_3 = \frac{\sqrt{10}}{40} \approx 0,0790569 \text{ с};$$

$$T_{ц} = \frac{11\sqrt{10}}{60} + \frac{\sqrt{6}}{20} \approx 0,7022252 \text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2449,488 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{max} = \frac{25\sqrt{10}}{2} \approx 39,52847 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{min}^{(2)} = -1000\sqrt{11} \approx -3162,2776 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -250 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Четвёртая серия эксперимента. $M_{с0} = 1,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 - 1,25}{0,05} = 175 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$$

$$\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8 + 1,25}{0,05} = 225 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

$$\varphi_{\text{гр.1}} = 8 \cdot \frac{175^2}{40000} = 6,125 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{гр.2}} = 2 \cdot 225 \cdot \sqrt{\frac{225}{40000}} \cdot \left[\sqrt{\frac{175}{40000}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{225}{40000}} + \frac{225}{175} \cdot \sqrt{\frac{225}{40000}} \right] = \frac{27}{224} \cdot (6 + 7\sqrt{7}) \approx 10,549316 \text{ рад}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 6,125 \text{ рад}$, то

$$t_1 = 0,0661437 \text{ с}; \quad t_2 = 0 \text{ с}; \quad t_3 = 0,0661437 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 0,5291496 \text{ с};$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = 2645,7513 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{\text{max}} = 23,150323 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{\text{min}}^{(2)} = -2645,7513 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(1)} = -175 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 7,807879 \text{ рад}$, то

$$t_1 = 0,0661437 \text{ с}; \quad t_2 = 0,0245126 \text{ с}; \quad t_3 = 0,07 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 0,5690874 \text{ с};$$

$$\omega_{\text{max}}^{(2)} = 2645,7513 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{\text{max}} = 27,44 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = -2800 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{\text{min}}^{(1)} = -196 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = \frac{27}{224} \cdot (69 + 7\sqrt{7}) \approx 10,549316 \text{ рад}$, то

$$t_1 = \frac{\sqrt{7}}{40} \approx 0,0661437 \text{ с}; \quad t_2 = \frac{27}{140} - \frac{\sqrt{7}}{20} \approx 0,0605696 \text{ с}; \quad t_3 = 0,075 \text{ с};$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{69}{140} + \frac{\sqrt{7}}{20} \approx 0,6251446 \text{ с}; \quad \omega_{\text{max}}^{(2)} = 2645,7513 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{\text{max}} = 33,75 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{\text{min}}^{(2)} = -3000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{\text{min}}^{(1)} = -225 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Пятая серия эксперимента. $M_{\text{с0}} = 0 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

$$\omega_{\text{доп.1}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8}{0,05} = 200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2};$$

$$\omega_{\text{доп.2}}^{(1)} = \frac{1,25 \cdot 8}{0,05} = 200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

$$\varphi_{\text{гр.1}} = 8 \cdot \frac{200^2}{40000} = 8 \text{ рад};$$

$$\varphi_{\text{гр.2}} = 2 \cdot 200 \cdot \sqrt{\frac{200}{40000}} \cdot \left[\sqrt{\frac{200}{40000}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{200}{40000}} + \frac{200}{200} \cdot \sqrt{\frac{200}{40000}} \right] = 8 \text{ рад}.$$

Если $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 8 \text{ рад}$, то

$$t_1 = \frac{\sqrt{2}}{20} \approx 0,0707106 \text{ с}; \quad t_2 = 0 \text{ с}; \quad t_3 = \frac{\sqrt{2}}{20} = 0,0707106 \text{ с};$$

$$T_{ц} = \frac{2\sqrt{2}}{5} \approx 0,5656854 \text{ с};$$

$$\omega_{max}^{(2)} = 2000\sqrt{2} \approx 2828,427 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 20\sqrt{2} = 28,28427 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$\omega_{min}^{(2)} = -2000\sqrt{2} \approx -2828,427 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{min}^{(1)} = -200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости, которая имеет следующие параметры:

$$(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}}) = 16,990208 \text{ рад}; \quad T_{ц} = 0,8296 \text{ с}; \quad t_1 = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = 0,3096 \text{ с};$$

$$t_3 = 0,08 \text{ с}; \quad \omega_{max}^{(2)} = 2000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}; \quad \omega_{max} = 40,96 \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \quad \omega_{min}^{(2)} = -3200 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3};$$

$$\omega_{min}^{(1)} = -256 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

На рисунке 2 на основании результатов проведённого численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода $T_{ц}$ от заданного перемещения (угла поворота) $(\varphi_{\text{кон}} - \varphi_{\text{нач}})$ при различных значениях момента сопротивления электропривода M_{ω} .

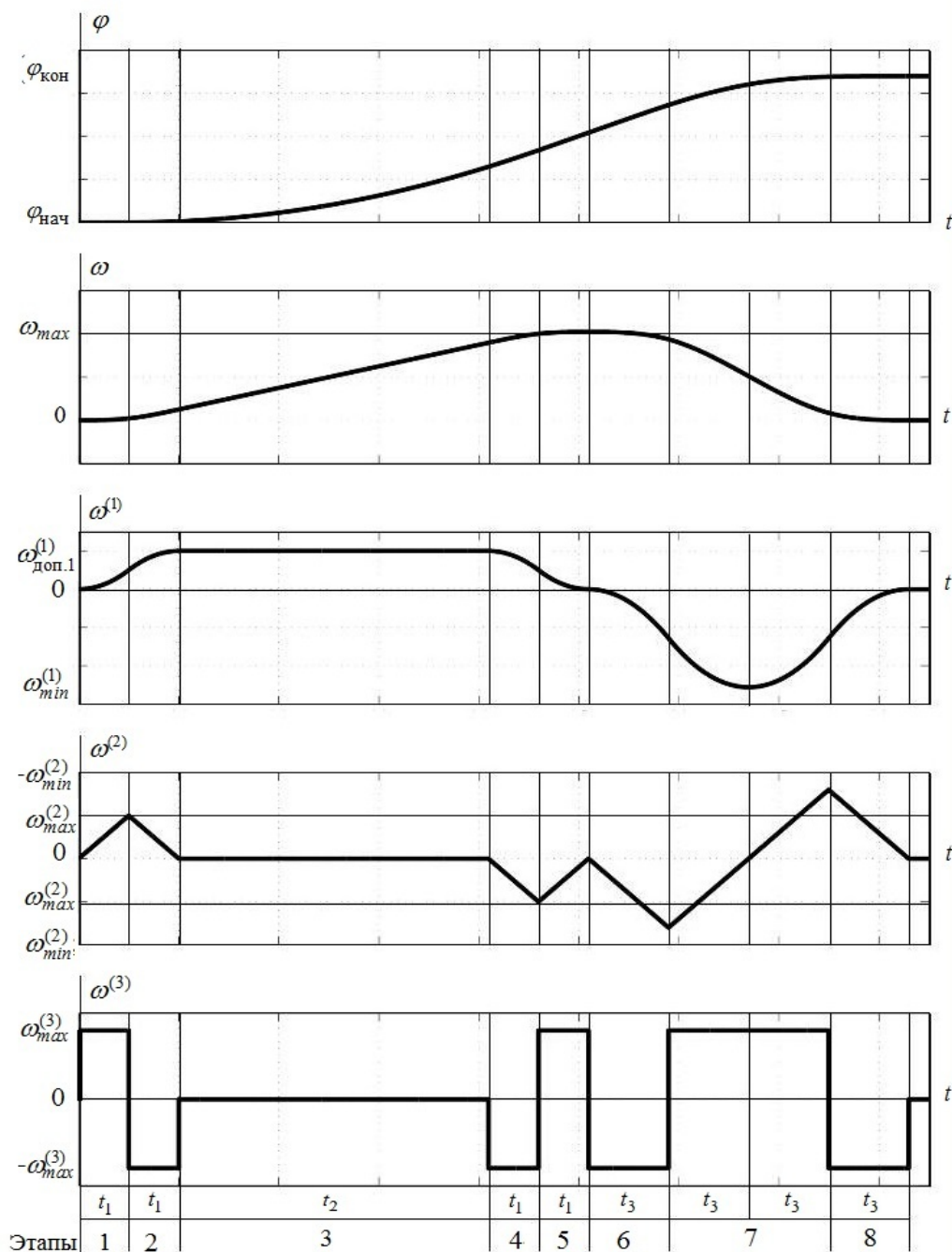


Рисунок 1 – Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничением по максимальному значению тока и третьей производной скорости.

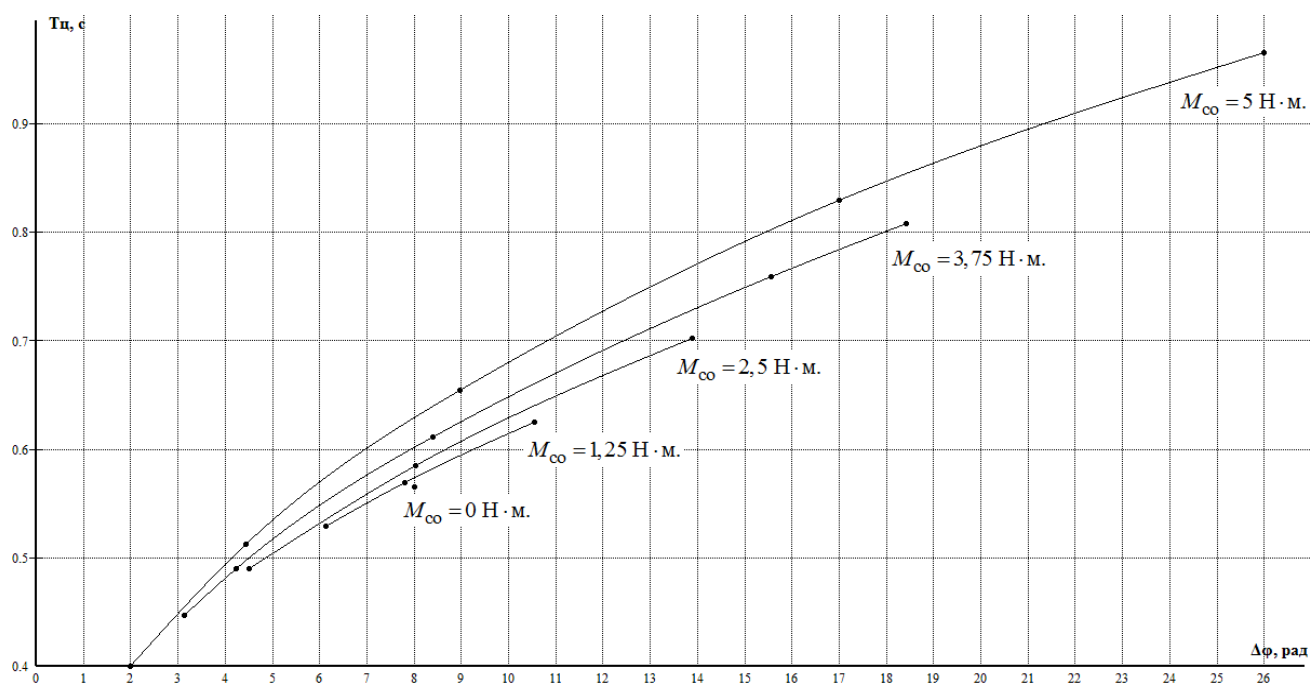


Рисунок 2 – Графики зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода $T_{ц}$ от заданного перемещения (угла поворота) $(\varphi_{кон} - \varphi_{нач})$ при различных значениях момента сопротивления электропривода $M_{со}$.

Выводы

Предложена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости, состоящая из восьми этапов.

Разработано математическое обеспечение для определения параметров оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости.

Определена область существования оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости.

Построены зависимости координат электропривода от времени при его перемещении в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой перемещения исполнительного органа особо точного электропривода постоянного

тока с ограничениями по максимальному значению тока и третьей производной скорости.

ЛИТЕРАТУРА

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

REFERENCES

1. Dobrobaba Yu.P., Khortsev A.L. Osobo tochnyy pozitsionnyy elektroprivod postoyannogo toka: monografiya. Izd-vo FGBOU VPO «KubGTU», 2014.-104 s.

DEVELOPMENT OPTIMUM ON SPEED CHART MOVEMENT OF THE EXECUTIVE BODY, HIGH PRECISION DC MOTOR WITH A LIMIT ON THE MAXIMUM CURRENT VALUE AND THE THIRD DERIVATIVE OF THE SPEED

YU.P. DOBROBABA, G.A. KOSHKIN, ZH.I. SHEVCHENKO, YU.V. KHOLODILOV

*Kuban State Technological University,
2, Moskovskaya st., Krasnodar, Russian Federation, 350002;
e-mail: kholodilov94@mail.ru*

Solved the problem of time-optimal motion control of the Executive body, high precision DC motor with a limit on the maximum current value and the third derivative of the speed. The algorithm to determine the optimal parameters according to the speed chart movement of the Executive body, high precision DC motor with a limit on the maximum current value and the third derivative of the speed. Set the region of existence of time-optimal chart movement of the Executive body, high precision DC motor with a limit on the maximum current value and the third derivative of the speed. The numerical experiment, the results of which are constructed according to the duration of the cycle of movement of electric drives Executive authority from prescribed displacement (rotation angle) at various values of the resistance moment of the drive.

Key words: high-precision electric drive, optimal movement of electric drives Executive authority, the maximum value of the current.