

УДК 62

**БЛИЗКАЯ К ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА
ДЛЯ БОЛЬШИХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО ОРГАНА
ЭЛЕКТРОПРИВОДА С УПРУГИМ ВАЛОПРОВОДОМ**



**CLOSE TO THE OPTIMAL IN SPEED DIAGRAM OF MOVEMENT
OF THE EXECUTIVE BODY FOR LARGE DISPLACEMENTS
OF THE ELECTRIC DRIVE WITH AN ELASTIC SHAFT LINE**

Добробаба Ю.П.

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

Кияшко Д.С.

студент,
Кубанский государственный технологический университет.

Аннотация. Разработана близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом, состоящая из пятнадцати этапов. Предложен алгоритм, позволяющий определить параметры диаграммы.

Ключевые слова: близкая к оптимальной, электропривод, упругий валопровод, быстродействие, пятнадцати-этапная диаграмма.

Dobrobaba Yu.P.

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

Kiyashko D.S.

Student,
Kuban State Technological University

Annotation. A diagram has been developed that is close to optimal in speed for large movements of the actuator with an elastic shaft, consisting of nineteen stages. An algorithm is proposed to determine the parameters of the diagram.

Keywords: close to optimal, electric drive, elastic shaft line, performance, fifteen-stage diagram.

В монографии [1] и четырех статьях приведены близкие к оптимальным по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода с ограничениями: по напряжению [2]; по напряжению и максимальному току [3]; по напряжению, максимальному и минимальному токам [4]; по напряжению, максимальному и минимальному токам и скорости [5]. Данные диаграммы разработаны для электроприводов, описываемых дифференциальными уравнениями третьего порядка.

В данной работе разработана близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

На рисунке 1 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа механизма (механические контролируемые координаты).

На рисунке 2 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом (моменты упругости).

На рисунке 3 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электродвигателя (механические контролируемые координаты).

На рисунке 4 приведена близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом (электрические контролируемые координаты).

На рисунках приняты обозначения:

$\varphi_{\text{кон}}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

$\varphi_{\text{нач}}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода, рад;

ω – допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электродвигателя, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

$\omega^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$;

$\omega^{(2)}$ – вторая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$;

$\omega^{(3)}$ – третья производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$;

$\omega^{(4)}$ – четвертая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$;

U – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$I_{\text{я}}$ – ток якорной цепи электродвигателя, А;

$I_{\text{я}}^{(1)}$ – первая производная тока якорной цепи электродвигателя, $\frac{\text{А}}{\text{с}}$;

$M_{\text{со}}$ – момент сопротивления электропривода, Н·м;

$\omega_{\text{доп}}$ – допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$;

$\omega_{\text{max1}}^{(4)}$ – первое максимальное значение четвертой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$;

$\omega_{\text{max2}}^{(4)}$ – второе максимальное значение четвертой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$;

$\omega_{\text{max3}}^{(4)}$ – третье максимальное значение четвертой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$;

$\omega_{\text{max4}}^{(4)}$ – четвертое максимальное значение четвертой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода, $\frac{\text{рад}}{\text{с}^5}$;

$U_{\text{доп}}$ – допустимое значение напряжения, приложенное к якорной цепи электродвигателя, В;

$I_{\text{доп}}$ – допустимое значение тока якорной цепи электродвигателя, А;

$M_{\text{у}}$ – упругий момент, Н·м;

t – время, с;

t_1 – длительность первого, второго и третьего этапов, с;

t_2 – длительность четвертого этапа, с;

t_3 – длительность пятого, шестого и седьмого этапов, с;

t_4 – длительность восьмого этапа, с;

t_5 – длительность девятого, десятого и одиннадцатого этапов, с;

t_6 – длительность двенадцатого этапа, с;

t_7 – длительность тринадцатого, четырнадцатого и пятнадцатого этапов, с;

$R_{\text{я}}$ – сопротивление якорной цепи, Ом.

$C_{\text{м}}$ – коэффициент пропорциональности между током и моментом электродвигателя, В·с;

$C_{\text{у}}$ – жесткость валопровода, $\frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{рад}}$;

J_1 – момент инерции исполнительного органа электродвигателя, кг·м²;

J_2 – момент инерции исполнительного органа механизма, кг·м²;

$C_{\text{е}}$ – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью и ЭДС электродвигателя, $\frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$;

$L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя, Гн.

В данной статье рассматривается электропривод имеющий следующие параметры: $C_e = 1,25 \frac{\text{В}\cdot\text{с}}{\text{рад}}$; $C_M = 1,25 \text{ В}\cdot\text{с}$; $R_{\text{я}} = 5 \text{ Ом}$; $L_{\text{я}} = 0,1 \text{ Гн}$; $J_1 = 0,025 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $J_2 = 0,025 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $C_y = 50 \frac{\text{Н}\cdot\text{м}}{\text{рад}}$. На контролируемые координаты электропривода наложены ограничения: $U_{\text{доп}} = 250 \text{ В}$; $I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}$. Момент сопротивления электропривода $M_{\text{со}} = 5 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

Так как ток якорной цепи электропривода на третьем этапе достигает $I_{\text{я3}} = I_{\text{доп}}$, то:

$$I_{\text{я3}} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{со}} + 2 \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max1}}^{(4)} \cdot t_1^3];$$

$$\omega_{\text{max1}}^{(4)} \cdot t_1^3 = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{2 \cdot (J_1 + J_2)};$$

$$\omega_{\text{max1}}^{(4)} \cdot t_1^3 = 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Так как ток якорной цепи электропривода на первом этапе достигает $I_{\text{я1}} = I_{\text{доп}}$, то:

$$I_{\text{я1}} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{со}} + \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max1}}^{(4)} \cdot t_1^3 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max1}}^{(4)} \cdot t_1];$$

$$(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}) = \frac{1}{12} \cdot (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}) + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max1}}^{(4)} \cdot t_1;$$

$$\omega_{\text{max1}}^{(4)} \cdot t_1 = \frac{11}{12} \cdot \frac{C_y}{J_1 J_2} \cdot (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}});$$

$$t_1^2 = \frac{6}{11} \cdot \frac{J_1 J_2}{C_y (J_1 + J_2)};$$

$$t_1 = 0,011677484 \text{ с.}$$

$$\omega_{\text{max1}}^{(4)} = 31399457,85 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}.$$

Так как ток якорной цепи электропривода на седьмом этапе достигает $I_{\text{я7}} = \frac{M_{\text{со}}}{C_M}$, то:

$$\frac{M_{\text{со}}}{C_M} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{со}} + (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}) - 2 \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max2}}^{(4)} \cdot t_3^3];$$

$$(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}) = 2 \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max2}}^{(4)} \cdot t_3^2;$$

$$\omega_{\text{max2}}^{(4)} \cdot t_3^3 = \frac{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}}{2 \cdot (J_1 + J_2)};$$

$$\omega_{\text{max2}}^{(4)} \cdot t_3^3 = 50 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$

Так как ток якорной цепи электропривода на пятом этапе достигает $I_{\text{я7}} = \frac{M_{\text{со}}}{C_M}$, то:

$$\frac{M_{\text{со}}}{C_M} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{\text{со}} + (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}) - \frac{1}{6} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{max2}}^{(4)} \cdot t_3^3 -$$

$$- \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{\text{max2}}^{(4)} \cdot t_3];$$

$$\omega_{\text{max2}}^{(4)} \cdot t_3 = \frac{11}{12} \cdot \frac{C_y}{J_1 J_2} \cdot (C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}});$$

$$t_3^2 = \frac{6}{11} \cdot \frac{J_1 J_2}{C_y (J_1 + J_2)};$$

$$t_3 = 0,011677484 \text{ с.}$$

$$\omega_{\text{max2}}^{(4)} = 31399457,85 \frac{\text{рад}}{\text{с}^5}.$$

Так как допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода равно:

$$\omega_{\text{доп}} = \frac{(C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}})}{J_1 + J_2} \cdot (2t_1 + t_2 + 2t_3), \text{ то:}$$

$$t_2 = \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{\text{доп}}}{C_M I_{\text{доп}} - M_{\text{со}}} - 2t_1 - 2t_3.$$

$$t_2 = 1,553290064 \text{ с.}$$

Так как ток якорной цепи электропривода на одиннадцатом этапе достигает $I_{я11} = -I_{доп}$, то:

$$-I_{доп} = \frac{1}{C_M} \cdot [M_{co} - 2(J_1 + J_2) \cdot \omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5^3];$$

$$\omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5^3 = \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{2(J_1 + J_2)};$$

$$\omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5^3 = 150 \frac{\text{рад}}{c^2}.$$

Так как ток якорной цепи электропривода на девятом этапе достигает $I_{я9} = -I_{доп}$, то:

$$-I_{доп} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} - \frac{1}{6}(J_1 + J_2) \cdot \omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5^3 - \frac{J_1 J_2}{C_y} \omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5 \right];$$

$$\omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5 = \frac{11}{12} \cdot \frac{C_y}{J_1 J_2} \cdot (C_M I_{доп} + M_{co});$$

$$t_5^2 = \frac{6}{11} \cdot \frac{J_1 J_2}{C_y (J_1 + J_2)};$$

$$t_5 = 0,011677484 \text{ с.}$$

$$\omega_{max3}^{(4)} = 94198372,24 \frac{\text{рад}}{c^5}.$$

Так как ток якорной цепи электропривода на пятнадцатом этапе достигает $I_{я15} = \frac{M_{co}}{C_M}$, то:

$$\frac{M_{co}}{C_M} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} - 2(J_1 + J_2) \cdot \omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5^3 + 2(J_1 + J_2) \cdot \omega_{max4}^{(4)} \cdot t_7^3 \right];$$

$$(C_M I_{доп} + M_{co}) = 2 \cdot (J_1 + J_2) \cdot \omega_{max4}^{(4)} \cdot t_7^3;$$

$$\omega_{max4}^{(4)} \cdot t_7^3 = \frac{C_M I_{доп} + M_{co}}{2 \cdot (J_1 + J_2)};$$

$$\omega_{max4}^{(4)} \cdot t_7^3 = 150 \frac{\text{рад}}{c^2}.$$

Так как ток якорной цепи электропривода на тринадцатом этапе достигает $I_{я13} = \frac{M_{co}}{C_M}$, то:

$$\frac{M_{co}}{C_M} = \frac{1}{C_M} \cdot \left[M_{co} - 2(J_1 + J_2) \cdot \omega_{max3}^{(4)} \cdot t_5^3 + \frac{1}{6}(J_1 + J_2) \cdot \omega_{max4}^{(4)} \cdot t_7^3 + \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot \omega_{max4}^{(4)} \cdot t_7 \right];$$

$$\omega_{max4}^{(4)} \cdot t_7 = \frac{11}{12} \cdot \frac{J_1 J_2}{C_y (J_1 + J_2)};$$

$$t_7^2 = \frac{6}{11} \cdot \frac{J_1 J_2}{C_y (J_1 + J_2)};$$

$$t_7 = 0,011677484 \text{ с.}$$

$$\omega_{max4}^{(4)} = 94198372,24 \frac{\text{рад}}{c^5}.$$

Так как допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода равно:

$$\omega_{доп} = \frac{(C_M I_{доп} + M_{co})}{J_1 + J_2} \cdot (2t_5 + t_6 + 2t_7), \text{ то:}$$

$$t_6 = \frac{(J_1 + J_2) \cdot \omega_{доп}}{C_M I_{доп} + M_{co}} - 2t_5 - 2t_7.$$

$$t_6 = 0,486623397 \text{ с.}$$

$$\varphi_{разг} = \frac{1}{2} \omega_{доп} \cdot (4t_1 + t_2 + 4t_3).$$

$$\varphi_{торм} = \frac{1}{2} \omega_{доп} \cdot (4t_5 + t_6 + 4t_7).$$

$$\varphi_{уст} = (\varphi_{кон} - \varphi_{нач}) - \varphi_{разг} - \varphi_{торм}$$

$$T_{ц} = 4t_1 + t_2 + 4t_3 + t_4 + 4t_5 + t_6 + 4t_7.$$

$$T_{ц} = 2,363376602 \text{ с.}$$

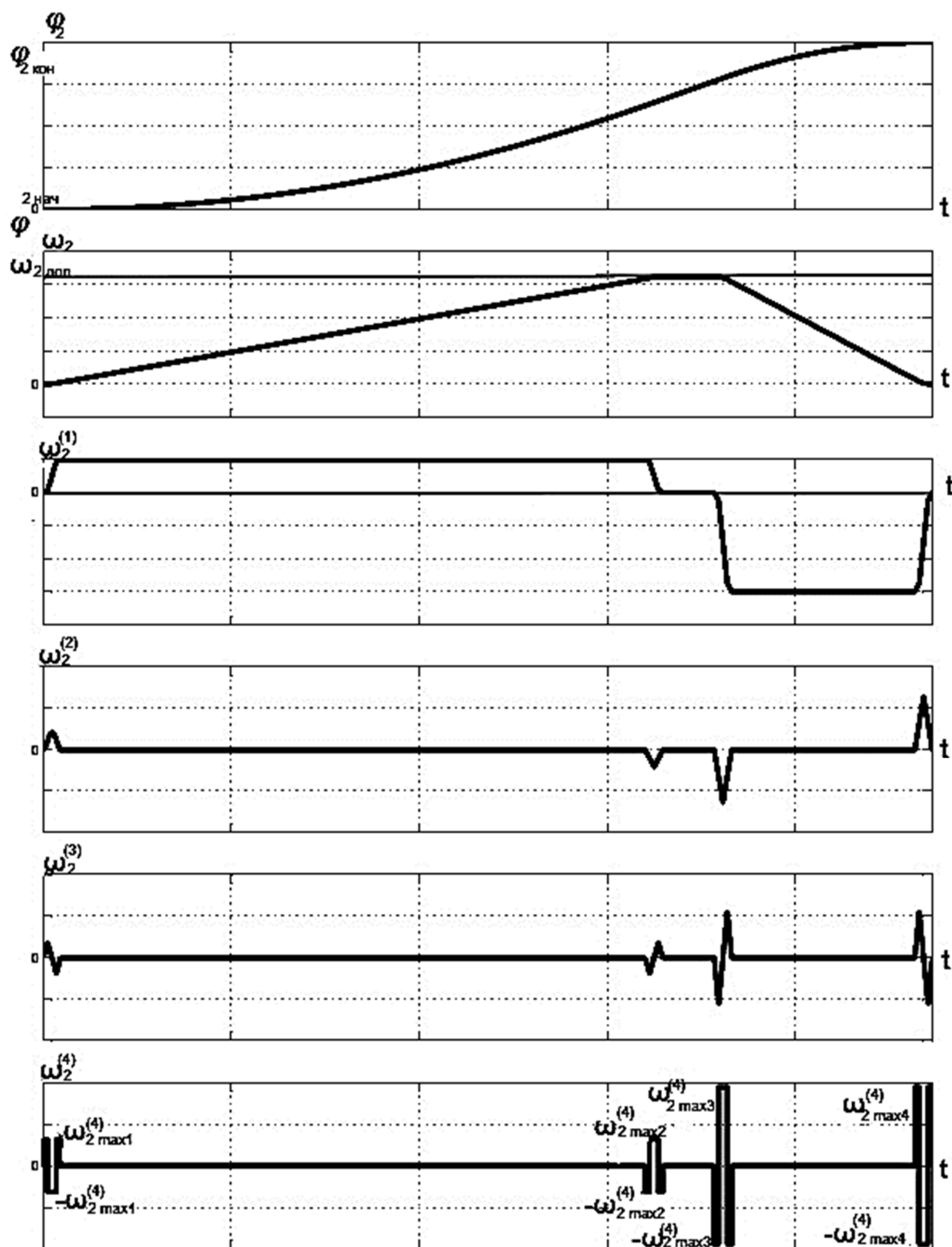


Рисунок 1 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа механизма (механические контролируемые координаты)



Рисунок 2 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом (моменты упругости)

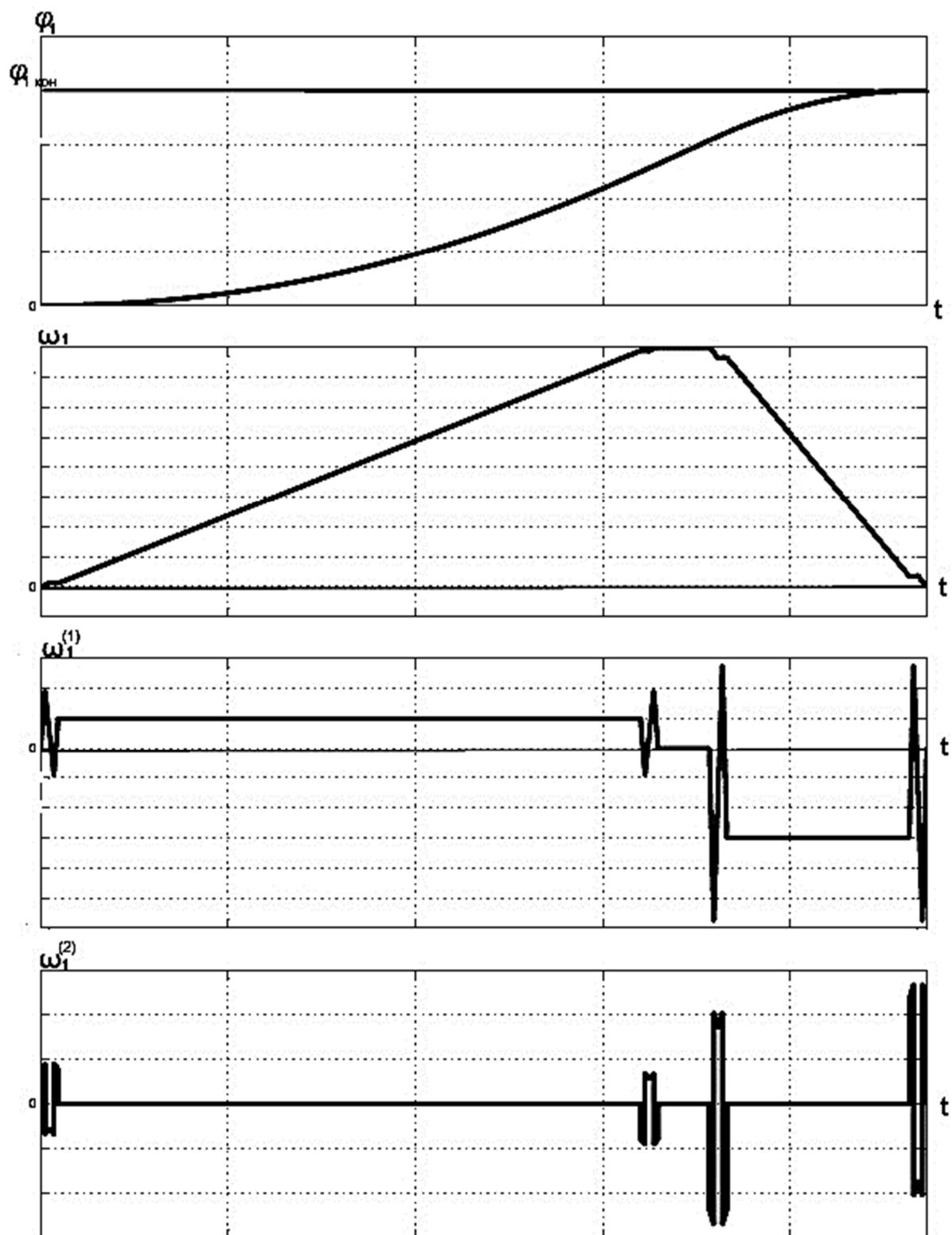


Рисунок 3 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электродвигателя (механические контролируемые координаты)

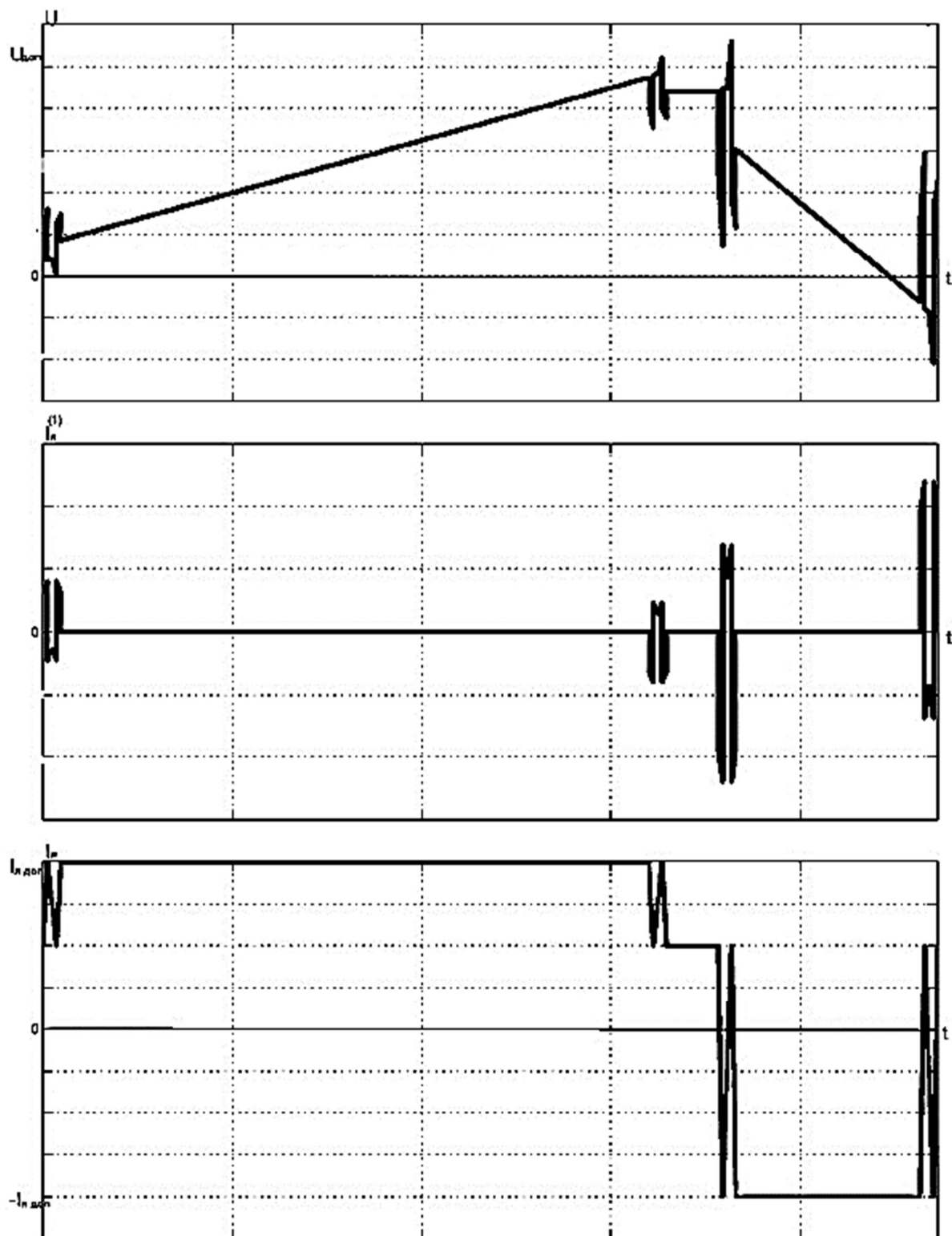


Рисунок 4 – Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма для больших перемещений исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом (электрические контролируемые координаты)

Вывод.

Разработан алгоритм формирования близкой к оптимальной по быстродействию диаграммы для больших перемещений исполнительного органа электропривода с упругим валопроводом.

Литература

1. Близкие к оптимальным по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода : монография / Ю.П. Добробаба, В.А. Мурлина, М.В. Чернуха, Д.С. Кияшко // ФГБОУ ВО «КубГТУ» – Краснодар : Издательский Дом – ЮГ, 2021. – 98 с.
2. Добробаба Ю.П. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничении по напряжению / Ю.П. Добробаба, В.А. Мурлина, М.В. Чернуха // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – № 1. – С. 404–413.
3. Добробаба Ю.П. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному значению тока / Ю.П. Добробаба, В.А. Мурлина, М.В. Чернуха // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2020. – № 4. – С. 374–385.
4. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному и минимальному значениям тока / Ю.П. Добробаба [и др.] // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 2. – С. 52–63.
5. Близкая к оптимальной по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода при ограничениях по напряжению и максимальному и минимальному значениям тока и скорости / Ю.П. Добробаба [и др.] // Наука. Техника. Технологии (политехнический вестник). – 2021. – № 1. – С. 82–95.

References

1. The close to optimal diagram of the motion of the actuator : monograph / Y.P. Dobrobaba, V.A. Murlina, M.V. Chernukha, D.S. Kiyashko // Kuban State Technological University. – Krasnodar : Publishing house-South, 2021. – 98 p.
2. Dobrobaba Y.P. The close to optimal diagram of the motion of the actuator under the voltage limit / Y.P. Dobrobaba, V.A. Murlina, M.V. Chernukha // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2020. – № 1. – P. 404–413.
3. Dobrobaba Y.P. The diagram is close to the optimum in terms of speed actuator movement diagram at voltage limits and maximum current value / Y.P. Dobrobaba, V.A. Murlina, M.V. Chernukha // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2020. – № 4. – P. 374–385.
4. Close to the optimal speed diagram of movement of the executive body of the electric drive under voltage limitations, at the maximum and minimum current values / Y.P. Dobrobaba, V.A. Murlina, M.V. Chernukha, D.S. Kiyashko // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2021. – № 2. – P. 52–63.
5. The diagram is close to the optimum in terms of speed actuator movement diagram at voltage limits, maximum and minimum current and speed / Y.P. Dobrobaba, V.A. Murlina, M.V. Chernukha, D.S. Kiyashko // Science. Engineering. Technology (polytechnical bulletin). – 2021. – № 1. – P. 82–95.