

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

**УПРАВЛЕНИЕ ПОЗИЦИОННЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С ПОСТОЯННЫМ  
МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ И УПРУГИМ  
ВАЛОПРОВОДОМ****CONTROL OF POSITIONAL ELECTRIC  
DRIVES WITH CONSTANT TORQUE  
RESISTANCE AND ELASTIC SHAFTS**

Добробаба Юрий Петрович  
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yuri Petrovitch  
Cand.Tech.Sci., professor

Живодров Тимур Сергеевич  
аспирант  
*Кубанский государственный технологический  
университет, Краснодар, Россия*

Zhivodrov Timur Sergeevich  
postgraduate student  
*Kuban State Technological University,  
Krasnodar, Russia*

Разработаны оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом. Определены условия существования диаграмм

In this article we developed the optimal movement charts of executive motor with constant torque and flexible shafts. The conditions of existence of the diagrams were also given

Ключевые слова: ОПТИМАЛЬНАЯ ПО  
БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ДИАГРАММА,  
ИСПОЛНИТЕЛЬНЫЙ ОРГАН, ПОЗИЦИОННЫЙ  
ЭЛЕКТРОПРИВОД

Keywords: OPTIMUM SPEED OF DIAGRAMS,  
ELECTRIC DRIVE ACTUATOR, POSITIONAL  
ELECTRIC DRIVE

В настоящее время на промышленных предприятиях внедряются электроприводы переменного тока, выполненные по системе «частотный преобразователь – асинхронный двигатель» и электроприводы постоянного тока, выполненные по системе «тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока».

Если электропривод осуществляет изменение угла поворота своего исполнительного органа, то обычно используются следующие оптимальные по быстродействию диаграммы [1; 2]:

- с ограничением первой производной угловой скорости;
- с ограничениями угловой скорости и её первой производной.

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода с ограничением первой производной угловой скорости состоит из двух этапов. Длительности первого и второго этапов равны. На первом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению  $w_{don}^{(1)}$ ; на втором этапе первая производная угловой скорости ис-

полнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус  $-w_{\text{дон}}^{(1)}$ . На первом этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода увеличивается от нулевого значения до максимального значения  $w_{\text{max}}$ ; на втором этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода уменьшается от максимального значения  $w_{\text{max}}$  до нулевого значения. За два этапа угол поворота исполнительного органа электропривода изменяется от начального значения  $j_{\text{нач}}$  до конечного значения  $j_{\text{кон}}$ .

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода с ограничениями угловой скорости и её первой производной состоит из трёх этапов. Длительности первого и третьего этапов равны. На первом этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению  $w_{\text{дон}}^{(1)}$ ; на втором этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна нулю; на третьем этапе первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению со знаком минус  $-w_{\text{дон}}^{(1)}$ . На первом этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода увеличивается от нулевого значения до максимально допустимого значения  $w_{\text{дон}}$ ; на втором этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода равна максимально допустимому значению  $w_{\text{дон}}$ ; на третьем этапе угловая скорость исполнительного органа электропривода уменьшается от максимально допустимого значения  $w_{\text{дон}}$  до нулевого значения. За три этапа угол поворота исполнительного органа электропривода изменяется от начального значения  $j_{\text{нач}}$  до конечного значения  $j_{\text{кон}}$ .

Рассмотренные оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода разработаны для электропривода с идеальным валопроводом, т.е. без учёта влияния упругости валопровода. Использование таких диаграмм перемещения исполнительного органа для реального электропривода (с упругим валопроводом) приведёт к несанкционированному движению, в результате уменьшится динамическая точность позиционирования.

Данная работа посвящена разработке оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом.

Математическая модель силовой части электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом [1; 2]:

$$M = M_y + J_1 w_1^{(1)}; \quad (1)$$

$$M_y = M_{c0} + J_2 w_2^{(1)}; \quad (2)$$

$$j_1^{(1)} = w_1; \quad (3)$$

$$j_2^{(1)} = w_2; \quad (4)$$

$$M_y = C_y \cdot (j_1 - j_2), \quad (5)$$

где  $M$  – момент электропривода,  $H \cdot м$ ;

$M_y$  – упругий момент,  $H \cdot м$ ;

$M_{c0}$  – постоянный по величине момент сопротивления электропривода,  $H \cdot м$ ;

$w_1$  – угловая скорость исполнительного органа электродвигателя,  $\frac{рад}{с}$ ;

$w_2$  – угловая скорость исполнительного органа механизма,  $\frac{рад}{с}$ ;

$j_1$  – угол поворота исполнительного органа электродвигателя, *рад*;

$j_2$  – угол поворота исполнительного органа механизма, *рад*;

$J_1$  – момент инерции исполнительного органа электродвигателя, *кг·м<sup>2</sup>*;

$J_2$  – момент инерции исполнительного органа механизма, *кг·м<sup>2</sup>*;

$C_y$  – жёсткость валопровода,  $\frac{H \cdot m}{рад}$ .

На рисунках 1, 2 и 3 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом при ограничениях первой и третьей производных угловой скорости.

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом при ограничениях первой и третьей производных скорости справедливы следующие соотношения:

$$t_1 = \sqrt{\frac{W_{\partial on}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}. \tag{6}$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\partial on}^{(1)}} + \frac{W_{\partial on}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}} - 3 \cdot \sqrt{\frac{W_{\partial on}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}. \tag{7}$$

$$T_y = 8t_1 + 2t_2. \tag{8}$$

$$W_{\max} = W_{\partial on}^{(1)} \cdot \left[ \sqrt{\frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\partial on}^{(1)}} + \frac{W_{\partial on}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}} - \sqrt{\frac{W_{\partial on}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}} \right]; \tag{9}$$

$$W_{\max}^{(2)} = \sqrt{W_{\partial on}^{(1)} \cdot W_{\max}^{(3)}}, \tag{10}$$

где  $t_1$  – длительность первого, второго, четвёртого, пятого, шестого, седьмого, девятого и десятого этапов, *с*;

$t_2$  – длительность третьего и восьмого этапов, с ;

$T_{\text{ц}}$  – длительность цикла перемещения, с .

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом при ограничениях первой и третьей производных угловой скорости справедлива при выполнении условия

$$j_{\text{зр1}} \leq (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) \leq j_{\text{зр2}}, \quad (11)$$

где  $j_{\text{зр1}} = 8 \cdot \frac{[w_{\text{дон}}^{(1)}]^2}{w_{\text{max}}^{(3)}}$ ;

$$j_{\text{зр2}} = w_{\text{дон}} \cdot \left[ \frac{w_{\text{дон}}}{w_{\text{дон}}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{w_{\text{дон}}^{(1)}}{w_{\text{max}}^{(3)}}} \right].$$

На рисунках 1, 2 и 3 приведена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом, имеющего следующие параметры:  $J_1 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $J_2 = 0,025 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ ;  $C_y = 5 \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ .

Момент сопротивления  $M_{c0} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Координаты электропривода имели

следующие ограничения:  $w_{\text{дон}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $w_{\text{дон}}^{(1)} = 150 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}$ ;

$w_{\text{max}}^{(3)} = 60000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^4}$ . Электропривод обрабатывал угол поворота

$(j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) = 30 \text{ рад}$  за время  $T_{\text{ц}} = 1 \text{ с}$ . Остальные параметры диаграммы:

$t_1 = 0,05 \text{ с}$ ;  $t_2 = 0,3 \text{ с}$ ;  $w_{\text{max}} = 60 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;  $w_{\text{дон}}^{(2)} = 3000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}$ . Граничные значения

углов поворота для электропривода при таких ограничениях его координат

соответственно равны  $j_{\text{зр.1}} = 3 \text{ рад}$  и  $j_{\text{зр.2}} = 186 \frac{2}{3} \text{ рад}$ .

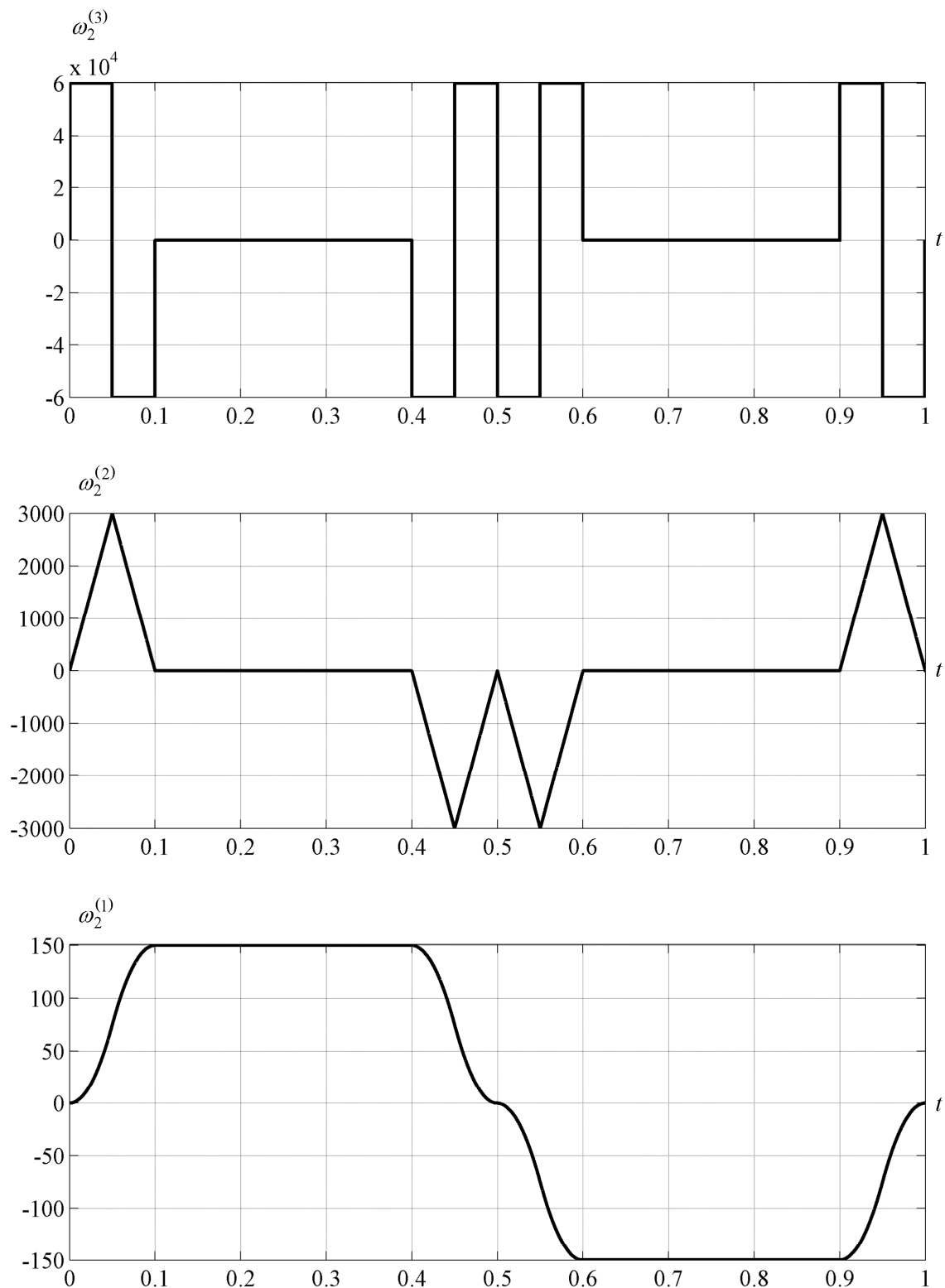


Рисунок 1

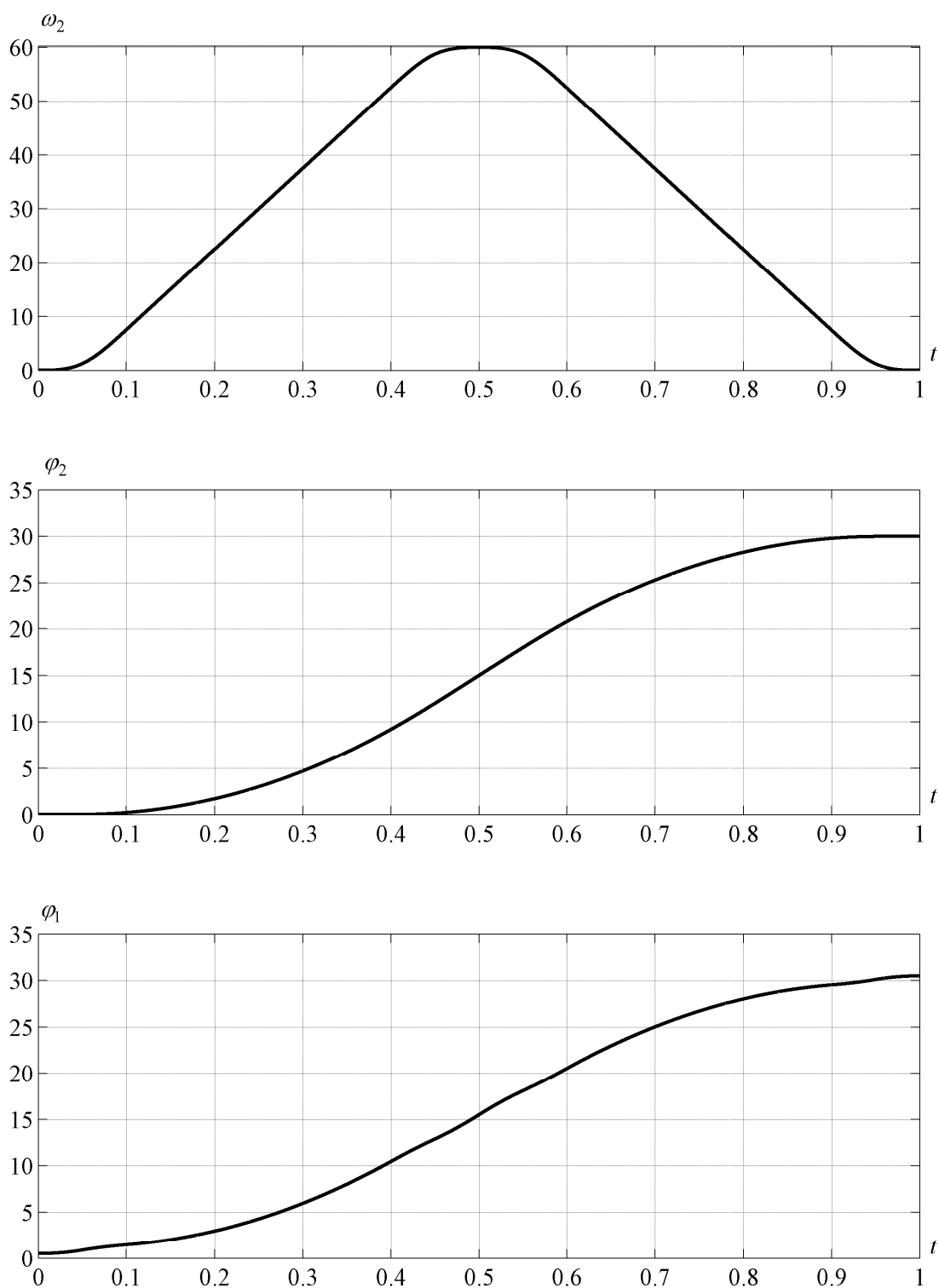


Рисунок 2

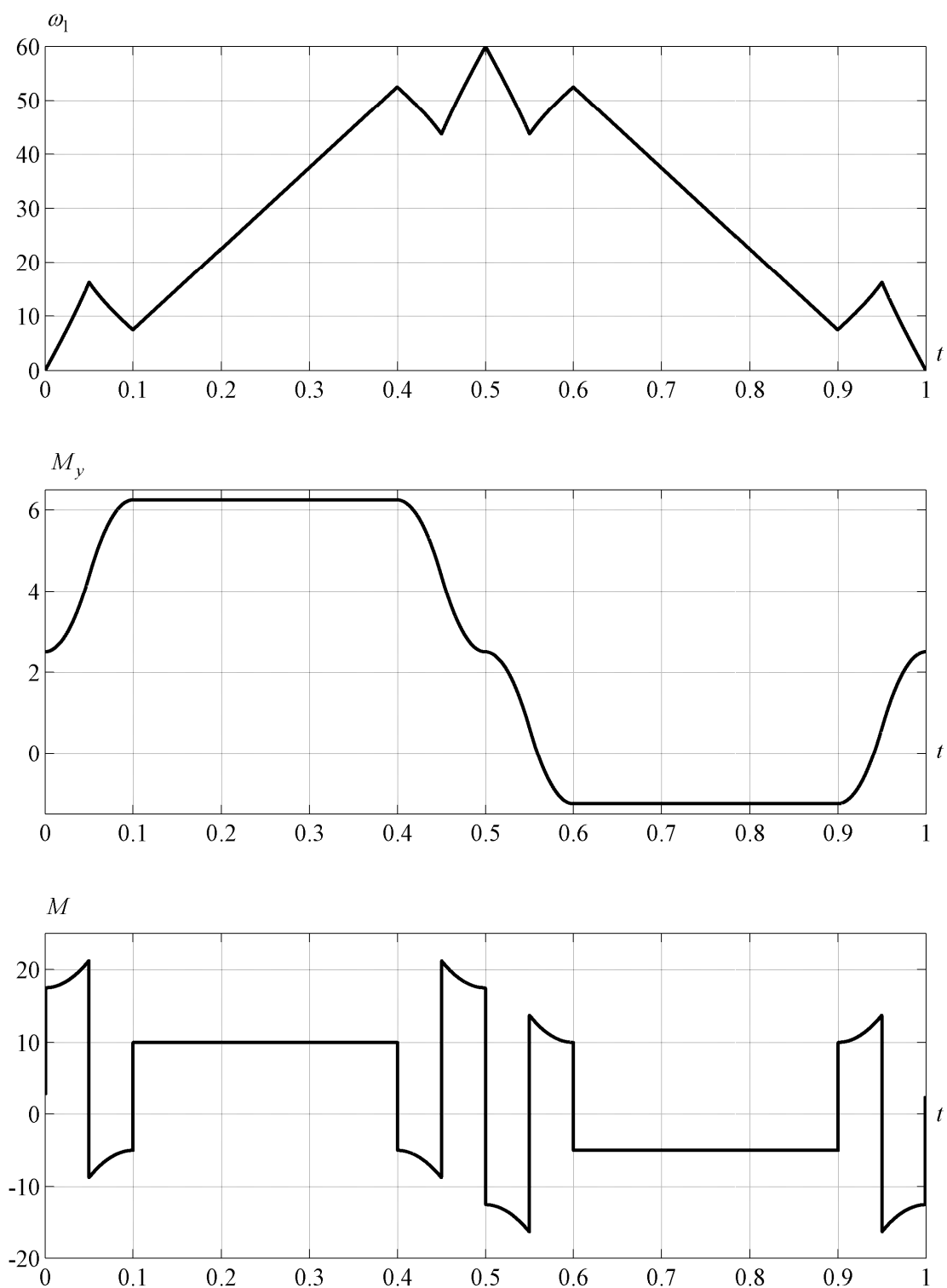


Рисунок 3



На рисунках 4, 5 и 6 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом при ограничениях угловой скорости и её первой и третьей производных.

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом при ограничениях угловой скорости и её первой и третьей производных справедливы следующие соотношения:

$$t_2 = \frac{W_{\dot{\omega}_{don}}}{W_{\dot{\omega}_{don}}^{(1)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{W_{\dot{\omega}_{don}}^{(1)}}{W_{\dot{\omega}_{don}}^{(3)}}}. \quad (12)$$

$$t_3 = \frac{j_{кон} - j_{нач}}{W_{\dot{\omega}_{don}}} - \frac{W_{\dot{\omega}_{don}}}{W_{\dot{\omega}_{don}}^{(1)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{W_{\dot{\omega}_{don}}^{(1)}}{W_{\dot{\omega}_{don}}^{(3)}}}. \quad (13)$$

$$T_{\omega} = 8t_1 + 2t_2 + t_3. \quad (14)$$

Значения  $t_1$  и  $W_{\dot{\omega}_{don}}^{(2)}$  определяются по формулам (6) и (10) соответственно. При этом приняты следующие обозначения:

где  $t_1$  – длительность первого, второго, четвёртого, пятого, седьмого, восьмого, десятого и одиннадцатого этапов, с ;

$t_2$  – длительность третьего и девятого этапов, с ;

$t_3$  – длительность шестого этапа, с .

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом при ограничениях угловой скорости и её первой и третьей производных справедлива при выполнении условия

$$j_{гр2} \leq (j_{кон} - j_{нач}). \quad (15)$$

На рисунках 4, 5 и 6 приведена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом, имеющего те же

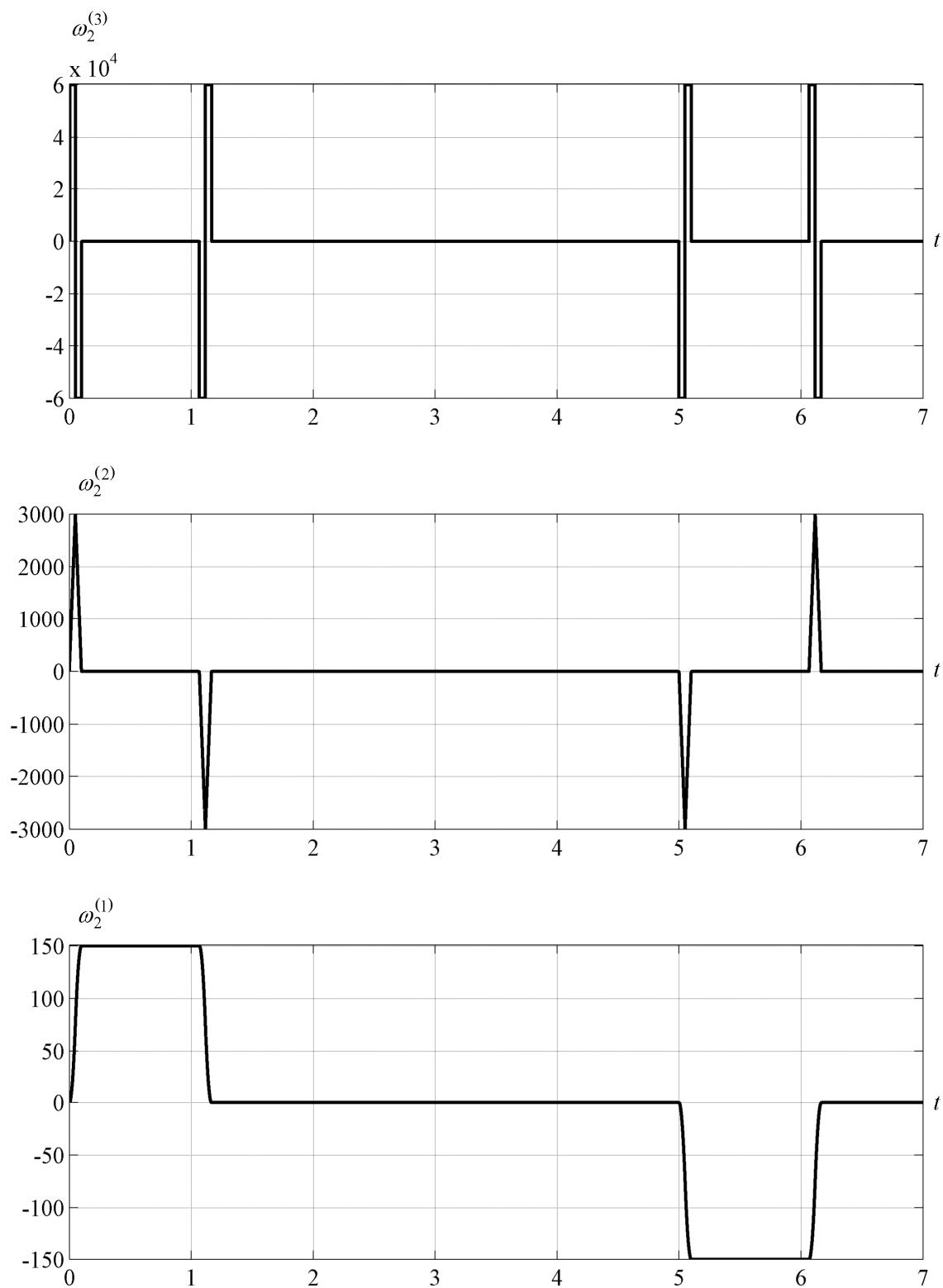


Рисунок 4

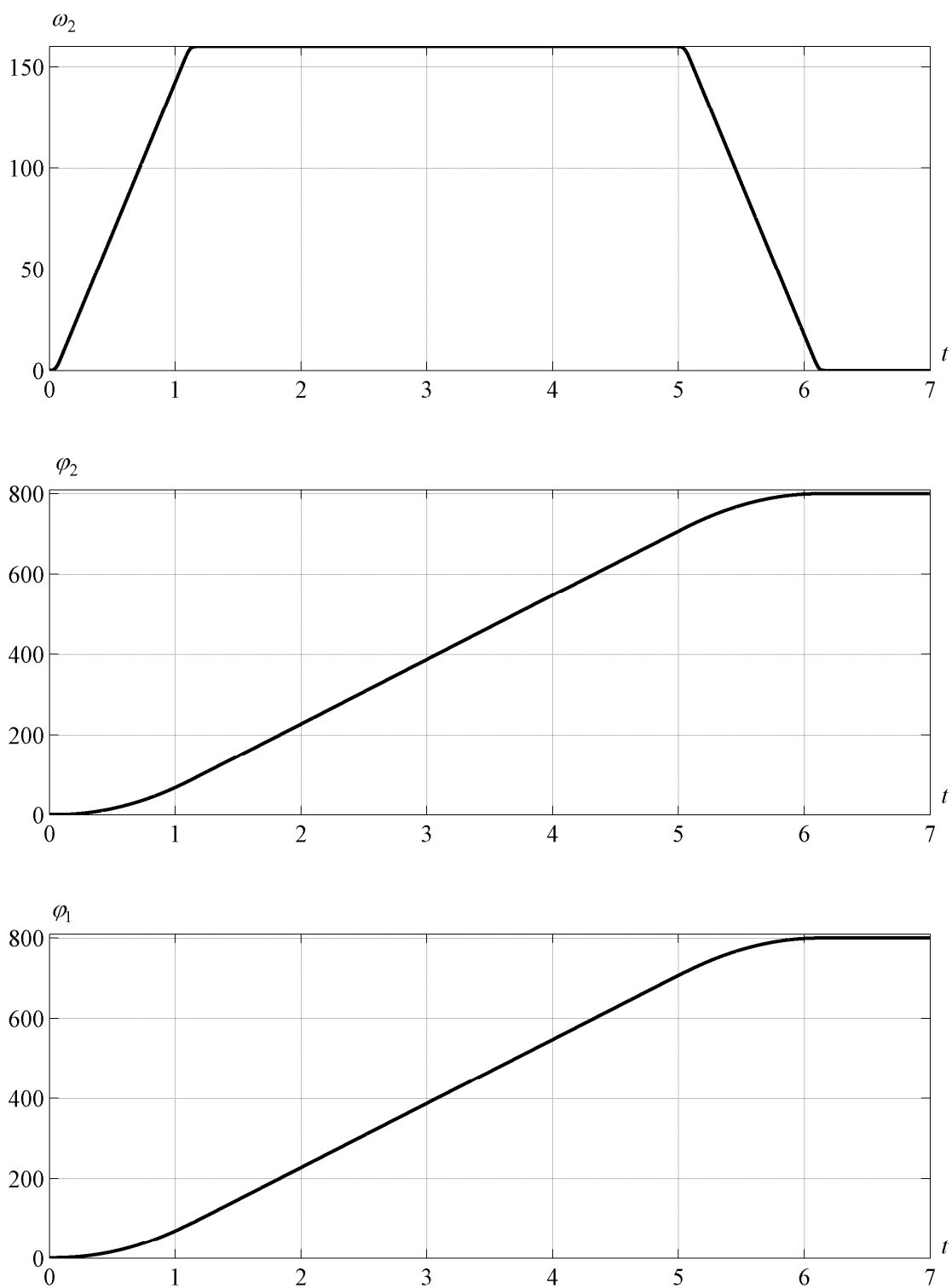


Рисунок 5

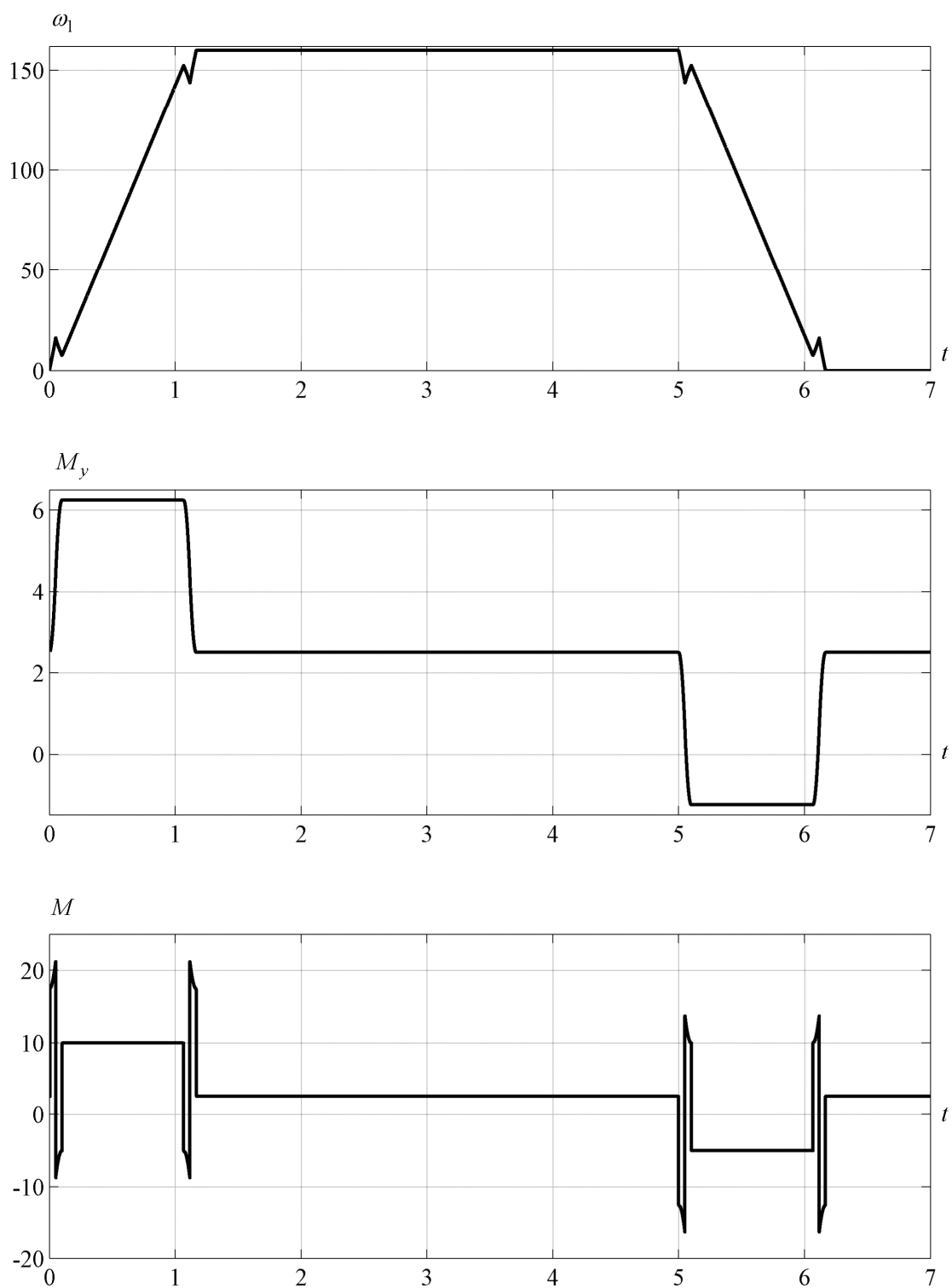


Рисунок 6

параметры, момент сопротивления и ограничения координат, но при этом электропривод отработывал угол  $(j_{кон} - j_{нач}) = 800 \text{ рад}$  за время

$$T_{\omega} = 6 \frac{1}{6} \text{ с}. \text{ Остальные параметры диаграммы: } t_1 = 0,05 \text{ с}; \quad t_2 = \frac{29}{30} \text{ с};$$

$$t_3 = 3 \frac{5}{6} \text{ с}; \quad w_{\max}^{(2)} = 3000 \frac{\text{рад}}{\text{с}^3}.$$

### Выводы

Разработаны две оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом: при ограничениях первой и третьей производных угловой скорости; при ограничениях угловой скорости и её первой и третьей производных. Определены области существования для каждой оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом.

Предлагаемые оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительных органов электропривода с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом применимы для электроприводов постоянного и переменного токов.

Внедрение разработанного управления позиционными электроприводами с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом без дополнительных материальных затрат приведёт к повышению точности перемещения исполнительных органов механизмов.

### Список литературы

1. Ключев В.И., Терехов В.М. Электропривод и автоматизация общепромышленных механизмов: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 360 с., ил.
2. Добробаба Ю.П. Электрический привод. учеб. пособие /Кубан. гос. технол. ун-т. Краснодар: Изд-во ГОУ ВПО “КубГТУ”, 2011. – 252 с.

### References

1. Kljuchev V.I., Terehov V.M. Jelektroprivod i avtomatizacija obshhepromyshlennyh mehanizmov: Uchebnyk dlja vuzov. – M.: Jenergija, 1980. – 360 s., il.
2. Dobrobaba Ju.P. Jelektricheskiy privod. ucheb. posobie /Kuban. gos. tehnol. un-t. Krasnodar: Izd-vo GOU VPO “KubGTU”, 2011. – 252 s.