

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

**УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИМ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С МОМЕНТОМ СОПРОТИВЛЕНИЯ, ЗАВИСЯЩИМ ОТ СКОРОСТИ В ВИДЕ ПОЛИНОМА ПЕРВОЙ СТЕПЕНИ**

**OPERATION OF ENERGY SAVING POSITIONAL ELECTRIC DRIVE WITH RESISTING MOMENT, DEPENDING ON SPEED AS A POLYNOMIAL FIRST DEGREE**

Добробаба Юрий Петрович  
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yuriy Petrovitch  
Cand.Tech.Sci., professor

Луценко Артём Юрьевич  
аспирант

Lutsenko Artyom Yurievich  
postgraduate student

Миرونюк Павел Геннадиевич  
студент  
*Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия*

Mironyuk Pavel Gennadievich  
student  
*Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia*

Разработаны оптимальные по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода: с ограничением по скорости; без ограничения по скорости. Определены и построены зависимости длительности цикла и потребляемой электроэнергии от заданного перемещения

The optimum speed diagrams were developed for an electric drive actuator depending from speed limit and without speed limit. Ratio between cycle duration and electric power consumption depending on specified movement was identified

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

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

Позиционные электропривода переменного тока, выполненные по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» в настоящее время широко внедряются на предприятиях в различных технологических установках. Управление перемещением исполнительного органа электропривода предлагается реализовать в соответствии с оптимальными по быстродействию диаграммами:

- при малых перемещениях без ограничения по скорости исполнительного органа электропривода (диаграмма приведена на рисунке 1);
- при больших перемещениях с ограничением по скорости исполнительного органа электропривода (диаграмма приведена на рисунке 2).

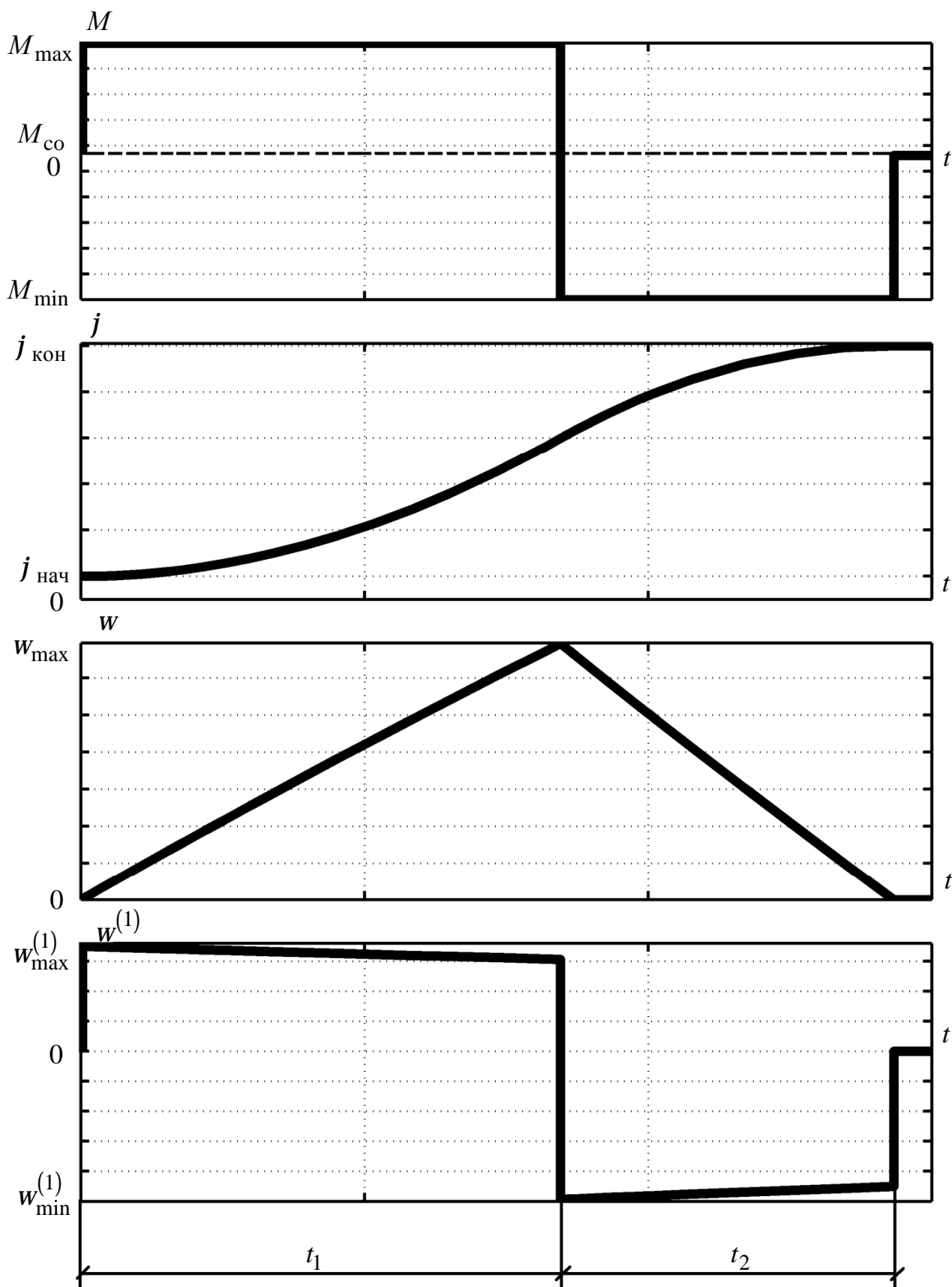


Рисунок 1

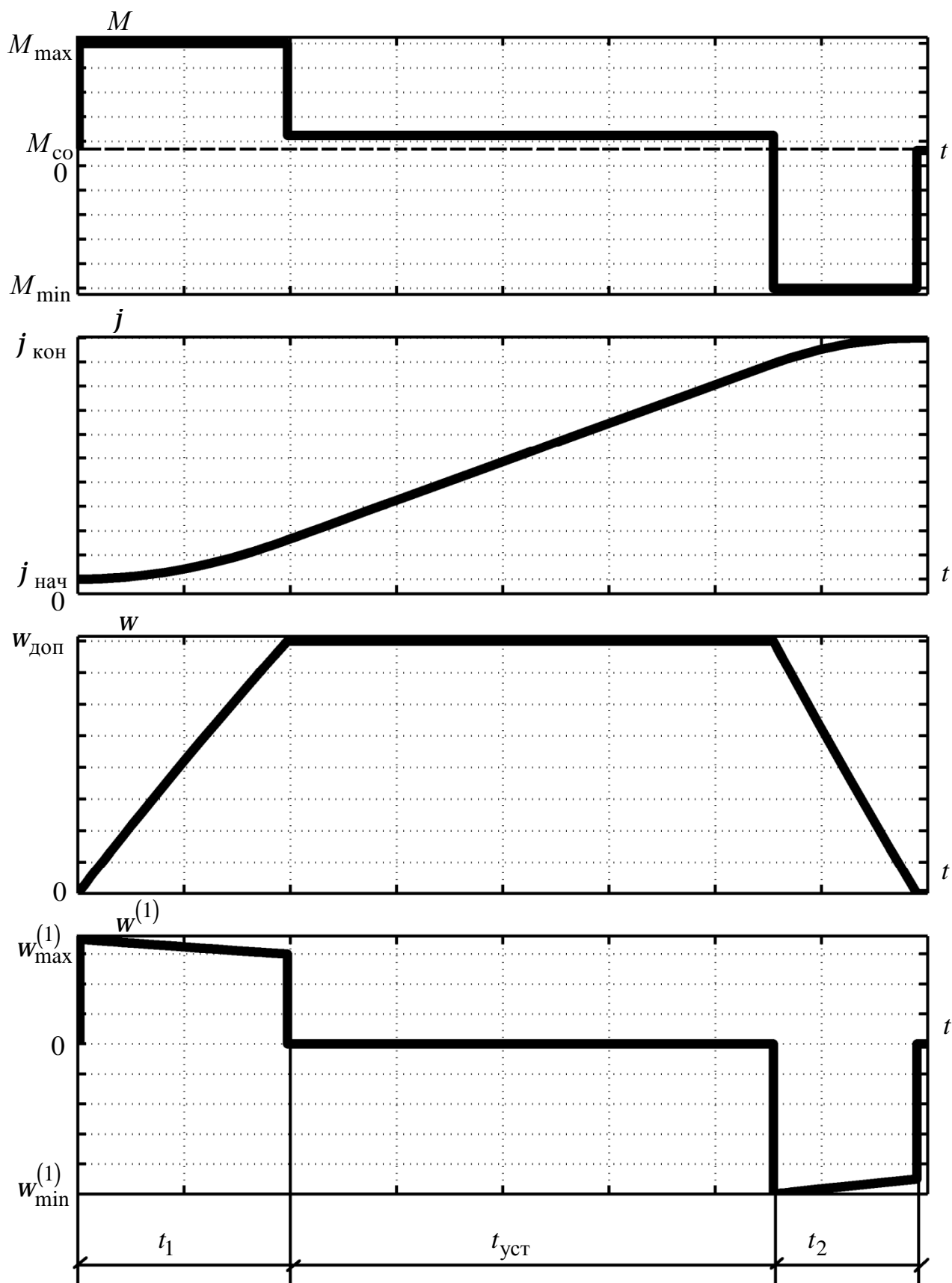


Рисунок 2

На рисунках приняты следующие обозначения:

- $M$  – момент электропривода,  $H \cdot м$  ;
- $M_{\max}$  – максимальное значение момента электропривода,  $H \cdot м$  ;
- $M_{\min}$  – минимальное значение момента электропривода,  $H \cdot м$  ;
- $M_{\text{со}}$  – постоянный по величине момент сопротивления электропривода,  $H \cdot м$  ;
- $j$  – угол поворота исполнительного органа электропривода,  $рад$  ;
- $j_{\text{нач}}$  – начальное значение угла поворота исполнительного органа электропривода,  $рад$  ;
- $j_{\text{кон}}$  – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода,  $рад$  ;
- $w$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с}$  ;
- $w_{\max}$  – максимальное значение скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с}$  ;
- $w_{\text{доп}}$  – максимально допустимое значение скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с}$  ;
- $w^{(1)}$  – первая производная угловой скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с^2}$  ;
- $w_{\max}^{(1)}$  – максимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с^2}$  ;
- $w_{\min}^{(1)}$  – минимальное значение первой производной скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с^2}$  ;
- $t_1$  – длительность первого этапа,  $с$  ;
- $t_2$  – длительность второго этапа (при малых перемещениях); длительность третьего этапа (при больших перемещениях)  $с$  ;
- $t_{\text{уст}}$  – время установившегося движения (второй этап при больших перемещениях),  $с$  .

Для первого этапа оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, состоящей из двух этапов, без ограничения по скорости на интервале времени  $0 \leq t \leq t_1$  справедливы следующие зависимости:

$$M(t) = M_{\max}; \quad (1)$$

$$j(t) = \frac{J}{K_c} \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t} + \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot t + j_{\text{нач}} - \frac{J}{K_c} \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c}; \quad (2)$$

$$w(t) = -\frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t} + \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c};$$

$$w^{(1)}(t) = \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t}, \quad (3)$$

где  $J$  – момент инерции исполнительного органа электропривода,  $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ ;

$K_c$  – коэффициент пропорциональности между скоростью и моментом сопротивления электропривода, зависящим от скорости,  $\frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ .

Для второго этапа оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, состоящей из двух этапов, без ограничения по скорости на интервале времени  $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_2)$  справедливы следующие зависимости:

$$M(t) = M_{\min}; \quad (4)$$

$$j(t) = \frac{J}{K_c} \cdot \left[ \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{M_{\max} - M_{\min}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot (t-t_1)} + \frac{M_{\min} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot (t - t_1) + j_{\text{нач}} + \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot t_1 -$$

$$-\frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\min} - M_{co}}{K_c}; \quad (5)$$

$$w(t) = - \left[ \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - \frac{M_{\max} - M_{\min}}{K_c} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot (t-t_1)} + \frac{M_{\min} - M_{co}}{K_c}; \quad (6)$$

$$w^{(1)}(t) = \left[ \frac{M_{\max} - M_{co}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - \frac{M_{\max} - M_{\min}}{J} \right] \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot (t-t_1)}. \quad (7)$$

Для определения длительностей первого и второго этапов оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода без ограничения по скорости необходимо решить систему уравнений:

$$(M_{\max} - M_{co}) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} - (M_{\max} - M_{\min}) = (M_{\min} - M_{co}) \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_2}; \quad (8)$$

$$(j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) = \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c} \cdot t_1 + \frac{M_{\min} - M_{co}}{K_c} \cdot t_2. \quad (9)$$

Для остальных параметров диаграммы перемещения, состоящей из двух этапов, справедливы соотношения:

$$T_{ц} = t_1 + t_2; \quad (10)$$

$$j_1 = \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} + \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c} \cdot t_1 + j_{\text{нач}} - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c}; \quad (11)$$

$$w_{\max} = \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c} - \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1}, \quad (12)$$

где  $T_{ц}$  – длительность цикла перемещения,  $c$ ;

$j_1$  – значение угла поворота исполнительного органа электропривода в конце первого этапа,  $rad$ .

В статье [1] доказано, что если выполняется закон управления

$$w_0(t) = Z \cdot w(t) + \frac{2}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{M_{12}} \cdot \left[ \frac{4}{9} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(L_2 - M_2)^2}{M_{12}^2} + 1 \right]^{-0,5}, \quad (13)$$

то электропривод потребляет из электрической сети минимальную мощность

$$P(t) = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{Z M_{12}} \cdot \left[ \frac{4}{9} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(L_2 - M_2)^2}{M_{12}^2} + 1 \right]^{0,5} \times \\ \times |M(t)| + M(t) \cdot w(t), \quad (14)$$

где  $w_0$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода при идеальном холостом ходе,  $\frac{rad}{c}$ ;

$Z$  – число пар полюсов асинхронного двигателя;

$R_1$  – активное сопротивление обмотки статора,  $Om$ ;

$R_2$  – активное сопротивление обмотки ротора,  $Om$ ;

$L_2$  – индуктивность обмотки ротора,  $Гн$ ;

$M_2$  – взаимоиндуктивность между любыми двумя обмотками ротора,  $Гн$ ;

$M_{12}$  – максимальная величина взаимоиндуктивности между любой обмоткой статора и любой обмоткой ротора,  $Гн$ .

При управлении в соответствии с законом (13) электропривод за цикл перемещения потребляет электроэнергию

$$W = M_{\max} \cdot \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c} \cdot \left[ t_1 - \frac{J}{K_c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \right] +$$

$$\begin{aligned}
 & +M_{\min} \cdot \left[ \frac{M_{\min} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot t_2 + \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\max} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \right] + \\
 & + \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{Z M_{12}} \cdot \left[ \frac{4}{9} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(L_2 - M_2)^2}{M_{12}^2} + 1 \right]^{0,5} \times \\
 & \times [ |M_{\max}| \cdot t_1 + |M_{\min}| \cdot t_2 ]. \tag{15}
 \end{aligned}$$

Для электропривода с асинхронным электродвигателем справедливы соотношения:

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{1 - h_{\text{НОМ}}}{h_{\text{НОМ}}} \cdot P_{\text{НОМ}}; \tag{16}$$

$$w_{\text{НОМ}} = (1 - S_{\text{НОМ}}) \cdot w_0; \tag{17}$$

$$M_{\text{НОМ}} = \frac{P_{\text{НОМ}}}{w_{\text{НОМ}}}, \tag{18}$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  - номинальная мощность асинхронного электродвигателя, *Вт*;

$\Delta P_{\text{НОМ}}$  - номинальные потери мощности асинхронного электродвигателя, *Вт*;

$h_{\text{НОМ}}$  - номинальное значение КПД;

$w_{\text{НОМ}}$  - номинальная угловая скорость асинхронного электродвигателя,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

$S_{\text{НОМ}}$  - номинальное значение скольжения;

$M_{\text{НОМ}}$  - номинальный момент асинхронного электродвигателя, *Н·м*.

При управлении в соответствии с законом (13) для электропривода справедлива зависимость

$$\Delta P_{\text{НОМ}} = \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{Z M_{12}} \cdot \left[ \frac{4}{9} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(L_2 - M_2)^2}{M_{12}^2} + 1 \right]^{0,5} \cdot M_{\text{НОМ}}. \tag{19}$$



Таким образом

$$\frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{Z M_{12}} \cdot \left[ \frac{4}{9} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(L_2 - M_2)^2}{M_{12}^2} + 1 \right]^{0,5} = \frac{h_{\text{НОМ}}}{1 - h_{\text{НОМ}}} \cdot \frac{1}{(1 - S_{\text{НОМ}}) \cdot w_0}. \quad (20)$$

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода с ограничением по скорости, состоящей из двух этапов, справедливы следующие условия:

$$(j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) \leq j_{\text{гр}} = \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot \ln \frac{M_{\text{max}} - M_{\text{co}}}{M_{\text{max}} - M_{\text{co}} - K_c w_{\text{доп}}} + \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\text{min}} - M_{\text{co}}}{K_c} \cdot \ln \frac{M_{\text{min}} - M_{\text{co}} - K_c w_{\text{доп}}}{M_{\text{min}} - M_{\text{co}}}. \quad (21)$$

Если не выполняется условие (21), то необходимо использовать оптимальную по быстродействию диаграмму перемещения исполнительного органа электропривода с ограничением по скорости, состоящей из трех этапов.

Так первый этап оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, состоящей из трех этапов, с ограничением по скорости идентичен первому этапу оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, состоящей из двух этапов, без ограничения по скорости, то на интервале времени  $0 \leq t \leq t_1$  справедливы зависимости (1) ÷ (3).

Для второго этапа оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, состоящей из трех этапов, с ограничением по скорости на интервале времени  $t_1 \leq t \leq (t_1 + t_{\text{уст}})$  справедливы следующие зависимости:

$$M(t) = M_{\text{co}} + K_c w_{\text{доп}}; \quad (22)$$

$$j(t) = j_1 + w_{\text{доп}} \cdot (t - t_1); \quad (23)$$

$$w(t) = w_{\text{доп}}; \quad (24)$$

$$w^{(1)}(t) = 0. \tag{25}$$

Для третьего этапа оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода, состоящей из трех этапов, с ограничением по скорости на интервале времени  $(t_1 + t_{уст}) \leq t \leq (t_1 + t_{уст} + t_2)$  справедливы следующие зависимости:

$$M(t) = M_{\min}; \tag{26}$$

$$j(t) = \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\min} - M_{co} - K_c w_{доп}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot (t - t_1 - t_{уст})} + \frac{M_{\min} - M_{co}}{K_c} \cdot (t - t_1 - t_{уст}) + j_2 - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\min} - M_{co} - K_c w_{доп}}{K_c}; \tag{27}$$

$$w(t) = -\frac{M_{\min} - M_{co} - K_c w_{доп}}{K_c} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot (t - t_1 - t_{уст})} + \frac{M_{\min} - M_{co}}{K_c}; \tag{28}$$

$$w^{(1)}(t) = \frac{M_{\min} - M_{co} - K_c w_{доп}}{J} \cdot e^{-\frac{K_c}{J} \cdot (t - t_1 - t_{уст})}. \tag{29}$$

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода с ограничением по скорости, состоящей из трех этапов, справедливы следующие соотношения:

$$t_1 = \frac{J}{K_c} \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_{co}}{M_{\max} - M_{co} - K_c w_{доп}}; \tag{30}$$

$$t_2 = \frac{J}{K_c} \cdot \ln \frac{M_{\min} - M_{co} - K_c w_{доп}}{M_{\min} - M_{co}}; \tag{31}$$

$$t_{уст} = \frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{доп}} - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\max} - M_{co}}{K_c w_{доп}} \cdot \ln \frac{M_{\max} - M_{co}}{M_{\max} - M_{co} - K_c w_{доп}} - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{\min} - M_{co}}{K_c w_{доп}} \cdot \ln \frac{M_{\min} - M_{co} - K_c w_{доп}}{M_{\min} - M_{co}}; \tag{32}$$

$$T_{ц} = t_1 + t_{уст} + t_2; \tag{33}$$

$$j_1 = j_{нач} - \frac{J}{K_c} \cdot w_{доп} + \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{max} - M_{co}}{K_c} \times \\ \times \ln \frac{M_{max} - M_{co}}{M_{max} - M_{co} - K_c w_{доп}}; \tag{34}$$

$$j_2 = j_{кон} - \frac{J}{K_c} \cdot w_{доп} - \frac{J}{K_c} \cdot \frac{M_{min} - M_{co}}{K_c} \times \\ \times \ln \frac{M_{min} - M_{co} - K_c w_{доп}}{M_{min} - M_{co}}, \tag{35}$$

где  $j_2$  – значение угла поворота исполнительного органа электропривода в конце второго этапа, *рад*.

При управлении в соответствии с законом (13) электропривод за цикл перемещения потребляет электроэнергию

$$W = M_{max} \cdot \frac{M_{max} - M_{co}}{K_c} \cdot \left[ t_1 - \frac{J}{K_c} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{K_c}{J} \cdot t_1} \right) \right] + \\ + [M_{co} + K_c w_{доп}] \cdot w_{доп} \cdot t_{уст} + M_{min} \cdot \left[ \frac{M_{min} - M_{co}}{K_c} \cdot t_2 + \frac{J}{K_c} \cdot w_{доп} \right] + \\ + \frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{Z M_{12}} \cdot \left[ \frac{4}{9} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(L_2 - M_2)^2}{M_{12}^2} + 1 \right]^{0,5} \times \\ \times [ |M_{max}| \cdot t_1 + |M_{co} + K_c w_{доп}| \cdot t_{уст} + |M_{min}| \cdot t_2 ]. \tag{36}$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода с ограничением по скорости справедлива при выполнении условия

$$j_{гр} \leq (j_{кон} - j_{нач}). \tag{37}$$

Для проведения численного эксперимента выбран электрический привод с асинхронным двигателем основного исполнения 4А71В4У3.

Так как асинхронный двигатель основного исполнения 4А71В4У3 имеет следующие параметры  $P_{\text{НОМ}} = 0,75 \text{ кВт}$ ;  $n_o = 1500 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$ ;  $S_{\text{НОМ}} = 0,087$ ;  $h_{\text{НОМ}} = 0,72$ , то

$$\frac{4}{3} \cdot \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{Z M_{12}} \cdot \left[ \frac{4}{9} \cdot \frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{(L_2 - M_2)^2}{M_{12}^2} + 1 \right]^{0,5} = 55,83.$$

Если момент инерции электропривода  $J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ , максимально допустимое значение угловой скорости  $w_{\text{доп}} = 160 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ , постоянный по величине момент сопротивления  $M_{\text{со}} = 1,25 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , коэффициент пропорциональности между скоростью и моментом сопротивления электропривода  $K_c = 7,8125 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$ , максимальное значение момента электропривода  $M_{\text{max}} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , минимальное значение момента электропривода  $M_{\text{min}} = -10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , то граничное значение угла поворота электропривода  $j_{\text{гр}} = 133,94956 \text{ рад}$ .

При отработке перемещения  $(j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) = 100 \text{ рад}$  оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода, состоящая из двух этапов, без ограничения по скорости имеет следующие параметры:

$$t_1 = 0,845404204 \text{ с}; \quad t_2 = 0,588092158 \text{ с};$$

$$T_{\text{ц}} = 1,433496362 \text{ с}; \quad w_{\text{max}} = 138,5907417 \frac{\text{рад}}{\text{с}};$$

$$j_1 = (j_{\text{нач}} + 59,8719615) \text{ рад}.$$

При этом за цикл перемещения исполнительного органа электропривода потребляется энергия

$$W = 197,4392273 + 800,3210189 = 997,7602462 \text{ Дж}.$$

Первая составляющая  $197,4392273 \text{ Дж}$  является полезной работой, а вторая составляющая  $800,3210189 \text{ Дж}$  является энергией потерь.

При отработке перемещения  $(j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) = 500 \text{ рад}$  оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа элек-

троп привода, состоящая из трех этапов, с ограничением по скорости имеет следующие параметры:

$$t_1 = 0,98656435 \text{ с}; \quad t_2 = 0,6743073 \text{ с};$$

$$t_{\text{уст}} = 2,28781525 \text{ с}; \quad T_{\text{ц}} = 3,9486869 \text{ с};$$

$$j_1 = (j_{\text{нач}} + 80,952072) \text{ рад}; \quad j_2 = (j_{\text{кон}} - 52,997488) \text{ рад}.$$

При этом за цикл перемещения исполнительного органа электропривода потребляется энергия:

$$W = 1194,671949 + 1246,148478 = 2440,820427 \text{ Дж}.$$

Первая составляющая 1194,671949 Дж является полезной работой, а вторая составляющая 1246,148478 Дж является энергией потерь.

Анализ выполненных расчетов показывает, что даже при реализации предлагаемого закона управления потери энергии имеют существенную величину.

Для электропривода, осуществляющего перемещение своего исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой без ограничения по скорости проведена серия численного эксперимента, выполняемого с целью определения зависимостей: длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения  $\Delta j = (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}})$ ; потребляемой электроприводом электроэнергии  $W$  от заданного перемещения  $\Delta j = (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}})$ . При этом задание на перемещение  $\Delta j$  изменялось от нуля до  $j_{\text{гр}}$ . Значение максимального момента электропривода задавалось равным  $M_{\text{max}} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . Значение минимального момента принималось равным:  $M_{\text{min}} = -10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (при этом  $j_{\text{гр}} = 133,94956$ );  $M_{\text{min}} = -7,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (при этом  $j_{\text{гр}} = 147,79905$ );  $M_{\text{min}} = -5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (при этом  $j_{\text{гр}} = 171,46570$ );  $M_{\text{min}} = -2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (при этом  $j_{\text{гр}} = 221,19274$ );  $M_{\text{min}} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (при этом  $j_{\text{гр}} = 395,16935$ ).

Для электропривода, осуществляющего перемещение своего исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой с ограничением по скорости, исследуемые зависимости являются линейными, поэтому достаточно рассчитать параметры электропривода для одной окончательной точки.

На рисунке 3 на основании проведенного численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{ц}$  от заданного перемещения  $\Delta j = (j_{кон} - j_{нач})$ . Кривая 1 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 2 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 3 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 4 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -7,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 5 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

На рисунке 4 на основании проведенного численного эксперимента построены зависимости потребляемой электроприводом электроэнергии  $W$  от заданного перемещения  $\Delta j = (j_{кон} - j_{нач})$ . Кривая 1 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = 0 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 2 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 3 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 4 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -7,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ , кривая 5 получена при  $M_{max} = 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$  и  $M_{min} = -10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ .

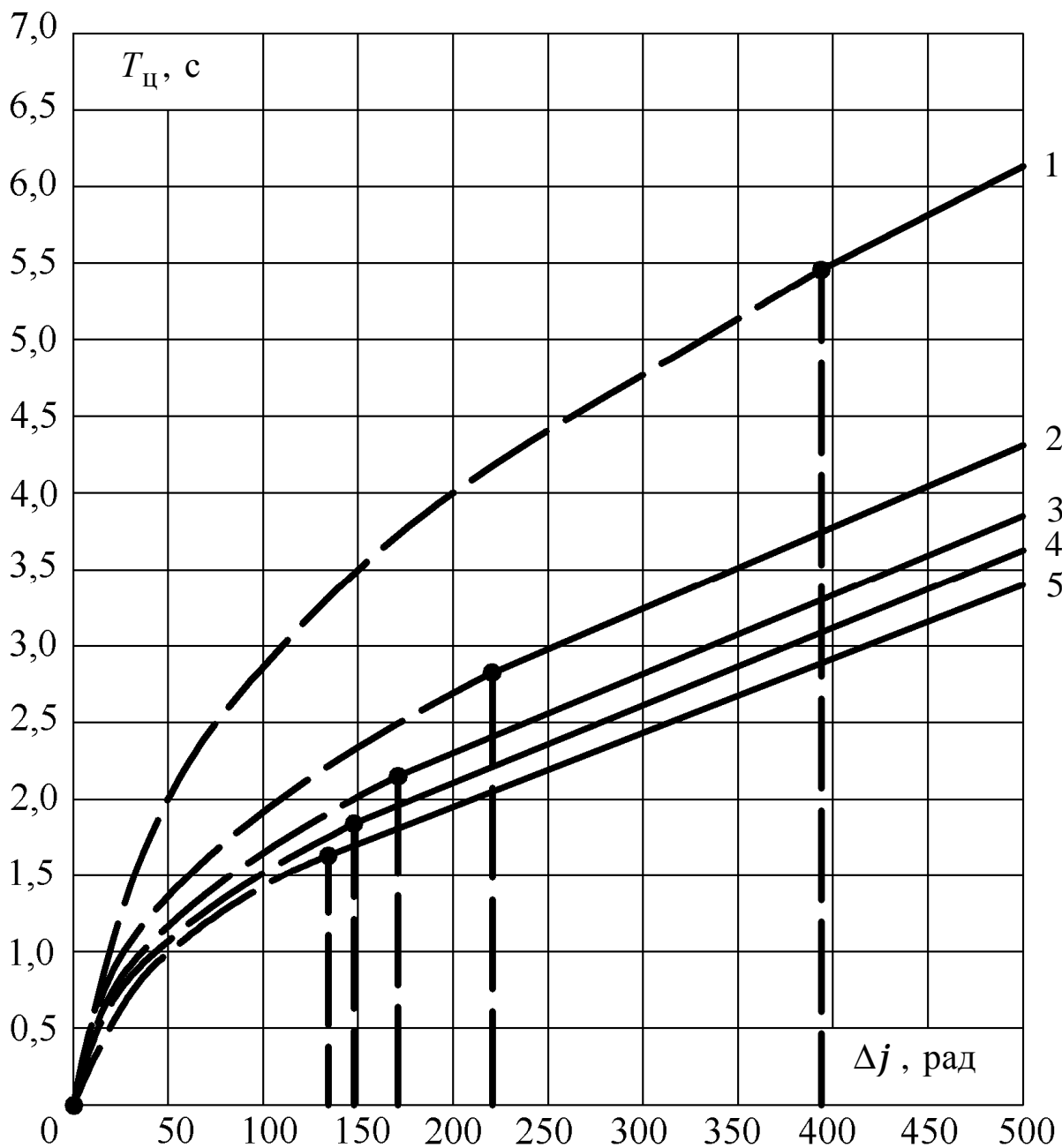


Рисунок 3

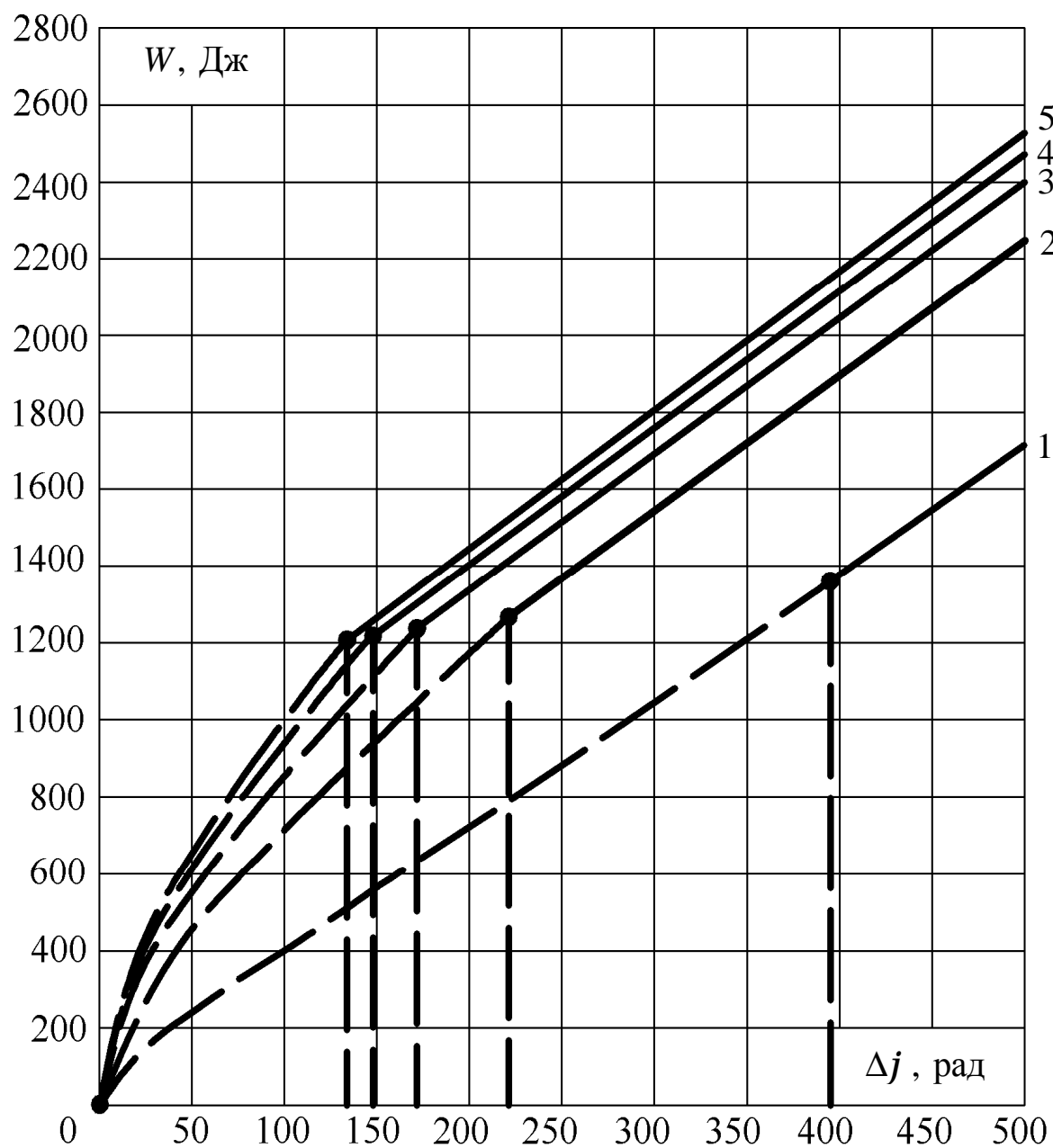


Рисунок 4



### Выводы

В настоящее время позиционный программно-управляемый электропривод находит все большее применение в промышленности. Для получения максимально возможной производительности отработки технологических операций позиционные электропривода выполняются по системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель», при этом управление электроприводом в зависимости от заданной величины перемещения исполнительного органа, следует реализовать по одной из предложенных диаграмм. Для различных технологических процессов задается время длительности циклов. Предлагаемое в статье математическое обеспечение позволяет при заданном времени длительности цикла выбрать одну из оптимальных по быстродействию диаграмм перемещения исполнительного органа электропривода и величину минимального момента электропривода, а затем определить потребляемую электроприводом электроэнергию. Реализация предлагаемого закона управления позиционным электроприводом переменного тока позволяет без снижения производительности технологического оборудования уменьшать потребляемую позиционным электроприводом электроэнергию.

### Список литературы

1 Добробаба Ю.П., Шаповало А.А., Барандыч В.Ю. Управление электроприводом с асинхронным двигателем и частотным преобразователем по минимуму потерь мощности в обмотках статора и ротора. Изв. ВУЗов “Пищевая технология”, 2009, №2-3, с. 90-92.