

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC 62.83.52:62.503.56

**РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМ  
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА  
С ПОСТОЯННЫМ МОМЕНТОМ  
СОПРОТИВЛЕНИЯ**

**DEVELOPMENT OF RATIONAL OPERATION  
OF A POSITIONAL DC ELECTRIC DRIVE  
WITH CONSTANT RESISTING MOMENT**

Добробаба Юрий Петрович  
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yuri Petrovitch  
Cand.Tech.Sci., professor

Кравченко Артем Владимирович  
студент  
*Кубанский государственный технологический  
университет, Краснодар, Россия*

Kravchenko Artyom Vladimirovich  
student  
*Kuban State Technological University,  
Krasnodar, Russia*

Предложено рациональное управление позиционным электроприводом постоянного тока с постоянным моментом сопротивления. Определены и построены зависимости длительности цикла и потребляемой электроэнергии от заданного перемещения

Rational operation is proposed for a positional DC electric drive with constant resisting moment. Ratio between the cycle duration and electric power consumption has been identified depending on specified move

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

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

В настоящее время позиционные электроприводы в основном осуществляют перемещение исполнительных органов промышленных механизмов по оптимальным по быстродействию диаграммам [1, 2]. Однако, максимальное быстродействие (минимальная длительность цикла перемещения) целесообразно на самом узком участке технологической линии (с наибольшей длительностью цикла перемещения), а на остальных участках технологической линии возможны два варианта реализации перемещения исполнительного органа механизма.

Вариант 1. Перемещение исполнительного органа механизма за минимально возможное время, а по окончании перемещения исполнительного органа механизма технологическая пауза.

Вариант 2. Перемещение исполнительного органа механизма за время, обусловленное технологическим процессом.

При втором варианте перемещение исполнительного органа механизма осуществляется с меньшей интенсивностью, но при этом возможно уменьшение потребляемой электроприводом электрической энергии из сети. Электропривод обеспечивает перемещение исполнительного органа механизма не за минимально возможное время с большим потреблением электрической энергии из сети, а за заданное по технологии время с меньшим потреблением электрической энергии из сети. Такое управление назовем рациональным (экономически целесообразным).

Данная работа посвящена разработке рационального управления позиционным электроприводом постоянного тока с постоянным моментом сопротивления.

Математическая модель силовой части позиционного электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления имеет вид [1, 2]:

$$\left. \begin{aligned} U(t) &= C_e \cdot w(t) + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}(t); \\ C_m \cdot I_{\text{я}}(t) &= M_{\text{с0}} + J \cdot w^{(1)}(t); \\ j^{(1)} &= w(t), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $U$  – напряжение, приложенное к якорной цепи электродвигателя,  $B$ ;

$w$  – угловая скорость исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{\text{с}}$ ;

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

$M_{\text{с0}}$  – постоянный по величине момент сопротивления электропривода,  $H \cdot m$ ;

$w^{(1)}$  – первая производная угловой скорости исполнительного

органа электропривода,  $\frac{рад}{с^2}$ ;

$j$  – угол поворота исполнительного органа электропривода,  $рад$ ;

$C_e$  – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью исполнительного органа электропривода и ЭДС двигателя,  $\frac{В \cdot с}{рад}$ ;

$R_{я}$  – сопротивление якорной цепи электродвигателя,  $Ом$ ;

$C_M$  – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом,  $В \cdot с$ ;

$J$  – момент инерции электропривода,  $кг \cdot м^2$ .

Перемещение исполнительного органа электропривода предлагается реализовать в соответствии с оптимальными по быстродействию диаграммами:

– без ограничения по скорости исполнительного органа при малых перемещениях;

– с ограничением по скорости исполнительного органа при больших перемещениях.

На рисунке 1 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничения по скорости, состоящая из двух этапов. На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

$U_{max}$  – максимальное значение напряжения, приложенного к якорной цепи электропривода,  $В$ ;

$I_{max}$  – максимальное значение тока якорной цепи электродвигателя,  $А$ ;

$I_{min}$  – минимальное значение тока якорной цепи электродвигателя,  $А$ ;

$j_{нач}$  – начальное значение угла поворота исполнительного органа

электропривода,  $рад$ ;

$j_{кон}$  – конечное значение угла поворота исполнительного органа электропривода,  $рад$ ;

$w_{max}$  – максимальное значение угловой скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с}$ ;

$w_{max}^{(1)}$  – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{рад}{с^2}$ ;

$t_1$  – длительность первого и второго этапов,  $с$ .

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничения по скорости справедливы следующие соотношения:

$$t_1 = \sqrt{\frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{max}^{(1)}}}; \quad (2)$$

$$T_{ц} = 2 \cdot \sqrt{\frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{max}^{(1)}}}; \quad (3)$$

$$I_{max} = \frac{M_{с0}}{C_M} + \frac{J}{C_M} \cdot w_{max}^{(1)}; \quad (4)$$

$$I_{min} = \frac{M_{с0}}{C_M} - \frac{J}{C_M} \cdot w_{max}^{(1)}; \quad (5)$$

$$w_{max} = w_{max}^{(1)} \cdot t_1; \quad (6)$$

$$U_{max} = C_e \cdot w_{max} + R_{я} \cdot I_{max}; \quad (7)$$

$$U_{min} = R_{я} \cdot I_{min}, \quad (8)$$

где  $T_{ц}$  – длительность цикла перемещения исполнительного органа электропривода,  $с$ .

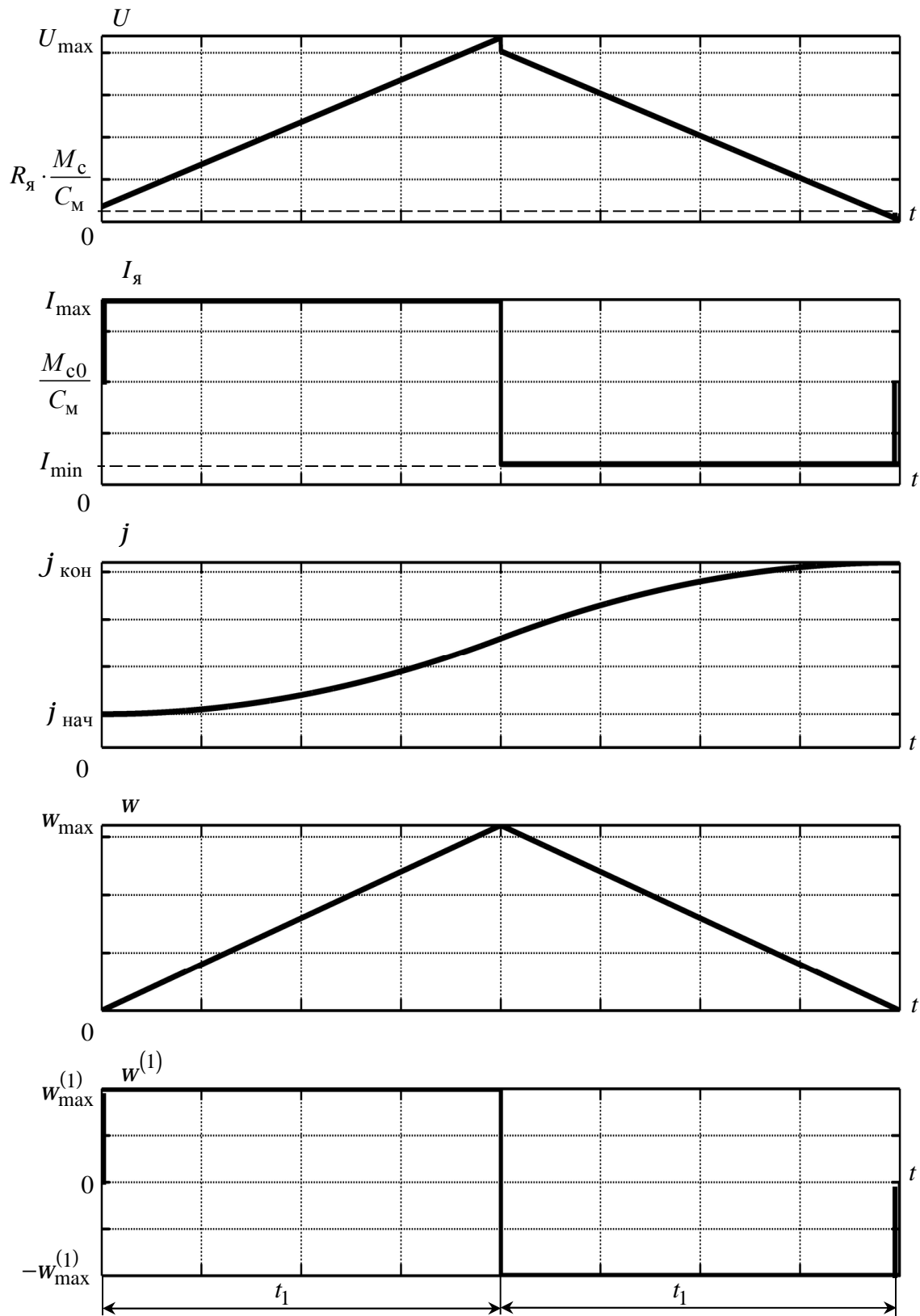


Рисунок 1

При реализации перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой без ограничения по скорости якорной цепью электропривода из сети потребляется электроэнергия

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{c0} \cdot (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) + 2R_{\text{я}} \cdot \frac{M_{c0}^2}{C_M^2} \cdot \sqrt{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}} \cdot [w_{\text{max}}^{(1)}]^{-\frac{1}{2}} + 2R_{\text{я}} \cdot \frac{J^2}{C_M^2} \cdot \sqrt{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}} \cdot [w_{\text{max}}^{(1)}]^{\frac{3}{2}}. \quad (9)$$

Анализ зависимости (9) показывает, что при выполнении условия

$$w_{\text{max экстр}}^{(1)} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \frac{M_{c0}}{J} \quad (10)$$

якорная цепь электрического привода потребляет из сети за цикл перемещения его исполнительного органа минимальное возможное количество электроэнергии

$$W_{\text{min}} = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{c0} \cdot (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) + \frac{8}{3} \cdot \sqrt[4]{3} \cdot R_{\text{я}} \cdot \frac{M_{c0}}{C_M} \cdot \frac{\sqrt{M_{c0} \cdot J}}{C_M} \cdot \sqrt{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}. \quad (11)$$

Оптимальная по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничения по скорости справедлива при выполнении условия

$$(j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) \leq j_{\text{гр}}, \quad (12)$$

где  $j_{\text{гр}} = \frac{w_{\text{доп}}^2}{w_{\text{max}}^{(1)}}$ ;

$w_{\text{доп}}$  – максимальное допустимое значение угловой скорости исполнительного органа электропривода,  $\frac{\text{рад}}{c^2}$ .

Если условие (12) не выполняется, то необходимо перемещение исполнительного органа электропривода осуществлять по оптимальной по быстродействию диаграмме с ограничением по скорости.

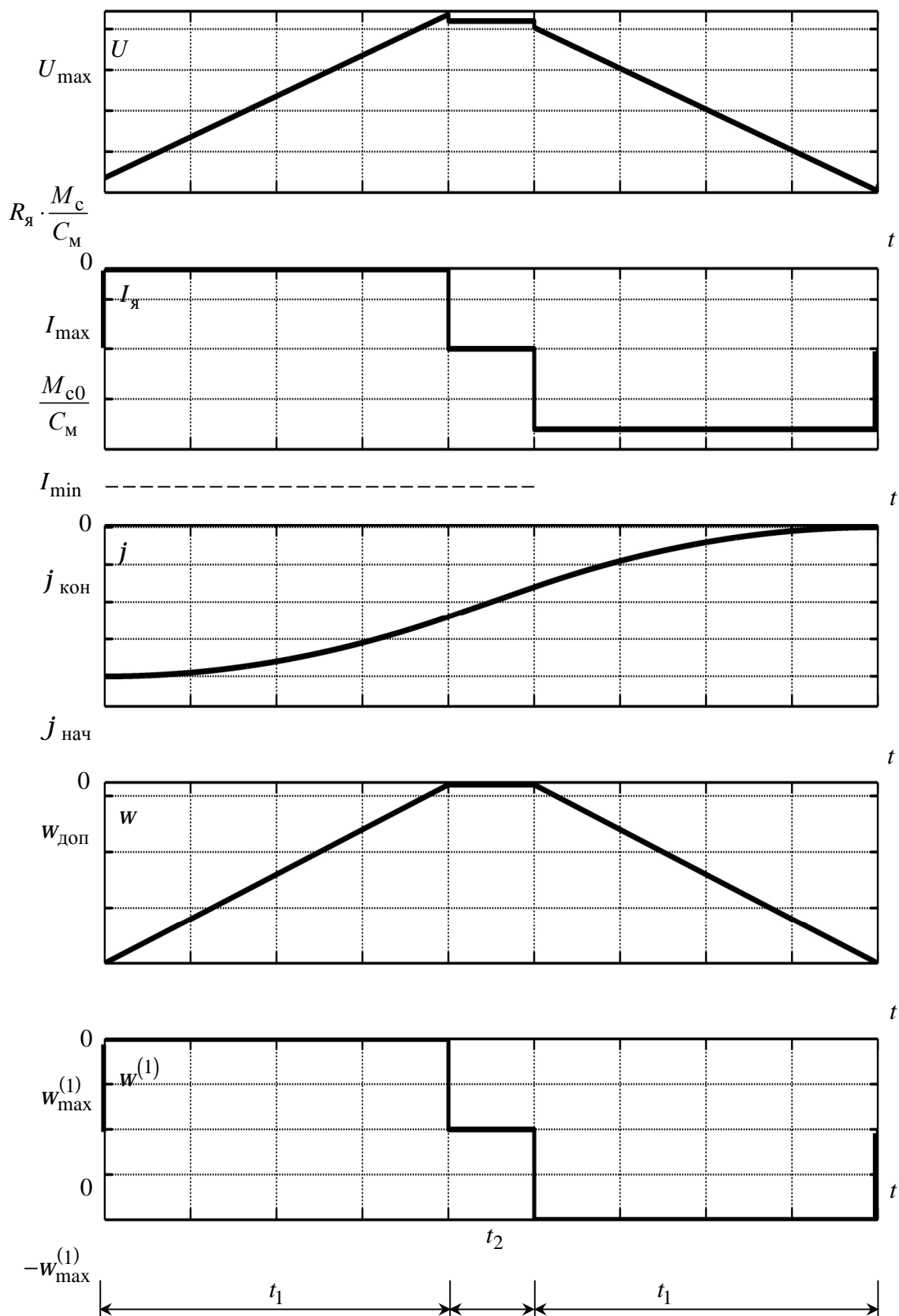


Рисунок 2

На рисунке 2 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода

постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением по скорости, состоящая из трех этапов. На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

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

$t_2$  – длительность второго этапа, с .

Для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением по скорости справедливы следующие соотношения:

$$t_1 = \frac{W_{\text{доп}}}{W_{\text{max}}^{(1)}}; \quad (13)$$

$$t_2 = \frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\text{доп}}} - \frac{W_{\text{доп}}}{W_{\text{max}}^{(1)}}; \quad (14)$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\text{доп}}} + \frac{W_{\text{доп}}}{W_{\text{max}}^{(1)}}; \quad (15)$$

$$U_{\text{max}} = C_e \cdot W_{\text{доп}} + R_{\text{я}} \cdot I_{\text{max}}. \quad (16)$$

Значение  $I_{\text{max}}$ ,  $I_{\text{min}}$  и  $U_{\text{min}}$  определяются соответственно по формулам (4), (5) и (8).

При реализации перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой с

ограничением по скорости якорной цепью электропривода из сети потребляется электроэнергия

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot M_{\text{с0}} \cdot (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) + R_{\text{я}} \cdot \frac{M_{\text{с0}}^2}{C_M^2} \cdot \frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\text{доп}}} + \\ + R_{\text{я}} \cdot \frac{M_{\text{с0}}^2}{C_M^2} \cdot \frac{W_{\text{доп}}}{W_{\text{max}}^{(1)}} + 2R_{\text{я}} \cdot \frac{J^2}{C_M^2} \cdot W_{\text{доп}} \cdot W_{\text{max}}^{(1)}. \quad (17)$$



Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением по скорости справедлива при выполнении условия

$$j_{гр} \leq (j_{кон} - j_{нач}). \quad (18)$$

Проведенные исследования показывают, что при уменьшении минимального значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $w_{max}^{(1)}$  всегда увеличивается длительность цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{ц}$ . Количество электроэнергии, потребляемой якорной цепью из сети за цикл перемещения исполнительного органа электропривода,  $W$  уменьшается при уменьшении значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $w_{max}^{(1)}$  до значения  $w_{max\ экстр}^{(1)}$ . При дальнейшем уменьшении значения первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода  $w_{max}^{(1)}$  количество электроэнергии, потребляемой якорной цепью из сети за цикл перемещения исполнительного органа электропривода,  $W$  увеличивается.

При равенстве максимального тока якорной цепи электродвигателя максимально допустимому значению  $I_{max} = I_{доп}$  максимально возможное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода равно

$$w_{max\ max}^{(1)} = \frac{C_M I_{доп} - M_{с0}}{J}, \quad (19)$$

а длительность цикла перемещения исполнительного органа электропривода имеет минимально возможное значение.

Таким образом, в зависимости от заданных величин перемещения и длительности цикла исполнительного органа электропривода, возможны

два варианта реализации перемещения исполнительного органа электропривода.

Вариант 1. Если выполняется условие

$$T_{ц} \geq 2 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{W_{доп}}, \quad (20)$$

то для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления без ограничения по скорости справедливы соотношения

$$t_1 = \frac{1}{2} T_{ц}; \quad (21)$$

$$t_2 = 0; \quad (22)$$

$$W_{max}^{(1)} = 4 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{T_{ц}^2}. \quad (23)$$

Вариант 2. Если выполняется условие

$$T_{ц} \leq 2 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{W_{доп}}, \quad (24)$$

то для оптимальной по быстродействию диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления с ограничением по скорости справедливы соотношения

$$t_1 = T_{ц} - \frac{j_{кон} - j_{нач}}{W_{доп}}; \quad (25)$$

$$t_2 = 2 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{W_{доп}} - T_{ц}; \quad (26)$$

$$W_{max}^{(1)} = \frac{W_{доп}}{t_1}. \quad (27)$$

Для проведения численного эксперимента выбран электропривод постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, имеющий

следующие параметры:  $C_e = 1,25 \frac{B \cdot c}{rad}$ ;  $C_m = 1,25 B \cdot c$ ;  $R_{я} = 5 \text{ Ом}$ ;

$J = 0,05 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ . Допустимые значения напряжения, тока и угловой скорости исполнительного органа электропривода:  $U_{\text{доп}} = 250 \text{ В}$ ;  $I_{\text{доп}} = 8 \text{ А}$ ;

$w_{\text{доп}} = 160 \frac{rad}{c}$ . При расчетах постоянный по величине момент

сопротивления электропривода имел значение  $M_{c0} = 2,5 \text{ Н} \cdot \text{м}$ . В

соответствии с формулой (19) максимально возможное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа электропривода

$w_{\text{max max}}^{(1)} = 150 \frac{rad}{c^2}$ . В соответствии с формулой (10) максимальное

экстремальное значение первой производной угловой скорости

исполнительного органа электропривода  $w_{\text{max экстр}}^{(1)} = 28,8675 \frac{rad}{c^2}$ .

Для электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, осуществляющего перемещение своего исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстродействию диаграммой без ограничения по скорости, проведена серия численного эксперимента для определения зависимостей: длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{ц}$  от заданного перемещения  $\Delta j = (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}})$ ; потребляемой якорной цепью электропривода электроэнергии  $W$  от заданного перемещения  $\Delta j = (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}})$ . При этом задание на перемещение  $\Delta j$  изменялось от нуля до  $j_{\text{гр}}$ . Максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа принималось равным:

$$w_{\text{max}}^{(1)} = 150 \frac{rad}{c^2} \text{ (при этом } j_{\text{гр}} = 170 \frac{2}{3} rad);$$

$$w_{\max}^{(1)} = 125 \frac{pad}{c^2} \text{ (при этом } j_{\text{гр}} = 204,8 \text{ } pad);$$

$$w_{\max}^{(1)} = 100 \frac{pad}{c^2} \text{ (при этом } j_{\text{гр}} = 256 \text{ } pad);$$

$$w_{\max}^{(1)} = 75 \frac{pad}{c^2} \text{ (при этом } j_{\text{гр}} = 341\frac{1}{3} \text{ } pad);$$

$$w_{\max}^{(1)} = 50 \frac{pad}{c^2} \text{ (при этом } j_{\text{гр}} = 512 \text{ } pad);$$

$$w_{\max}^{(1)} = 40 \frac{pad}{c^2} \text{ (при этом } j_{\text{гр}} = 640 \text{ } pad).$$

Для электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, осуществляющего перемещение своего исполнительного органа в соответствии с оптимальной по быстрдействию диаграммой с ограничением по скорости, исследуемые зависимости являются линейными, поэтому достаточно рассчитать параметры электропривода для еще одной точки.

На рисунке 3 на основании проведенного численного эксперимента построены зависимости длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода  $T_{\text{ц}}$  от заданного перемещения

$\Delta j = (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}})$ . Кривая 1 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 150 \frac{pad}{c^2}$ ; кривая 2

получена при  $w_{\max}^{(1)} = 125 \frac{pad}{c^2}$ ; кривая 3 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 100 \frac{pad}{c^2}$ ;

кривая 4 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 75 \frac{pad}{c^2}$ ; кривая 5 получена при

$w_{\max}^{(1)} = 50 \frac{pad}{c^2}$ ; кривая 6 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 40 \frac{pad}{c^2}$ .

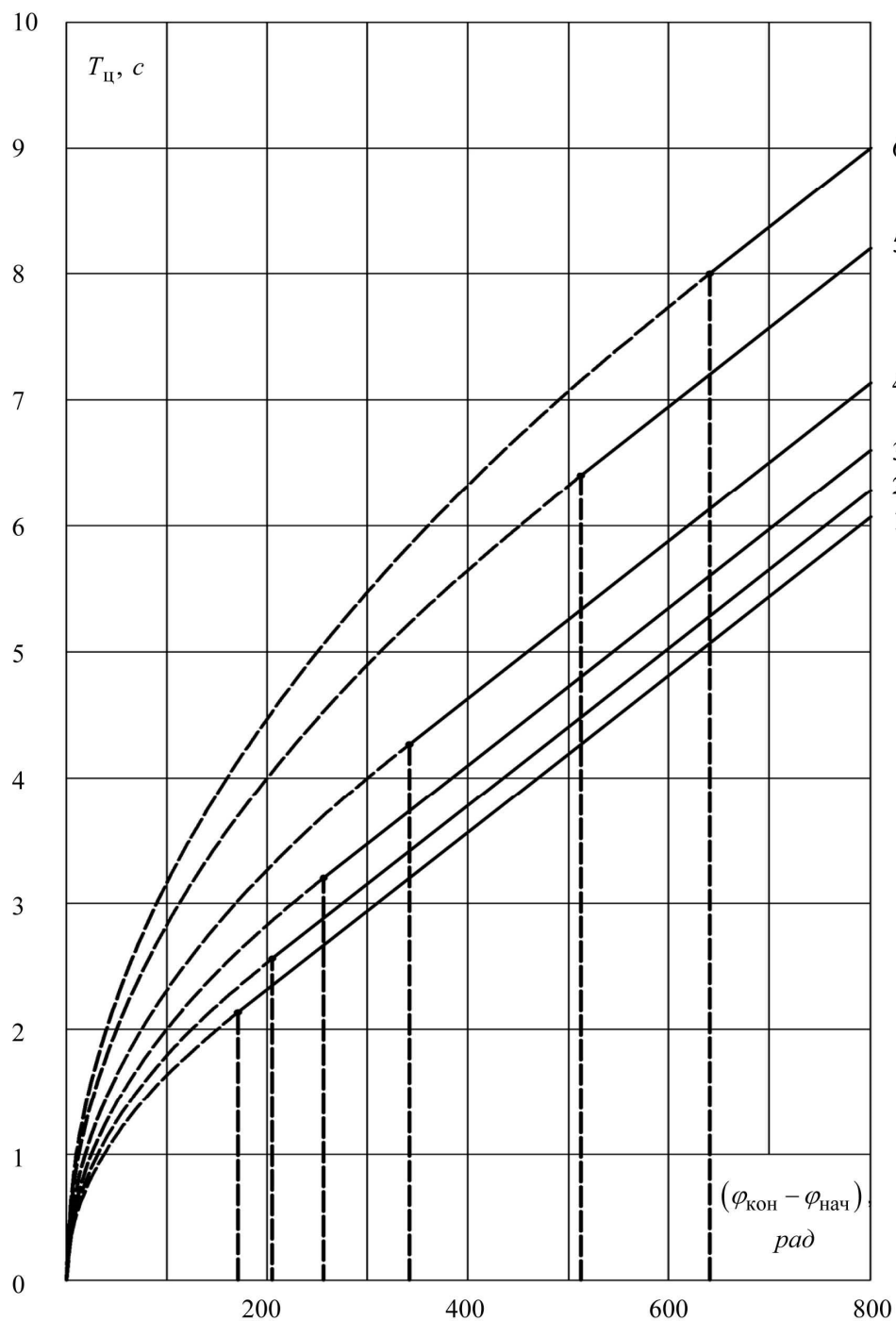


Рисунок 3

На рисунке 4 на основании проведенного численного эксперимента построены зависимости потребляемой якорной цепью электропривода электроэнергии  $W$  от заданного перемещения  $\Delta j = (j_{кон} - j_{нач})$ .

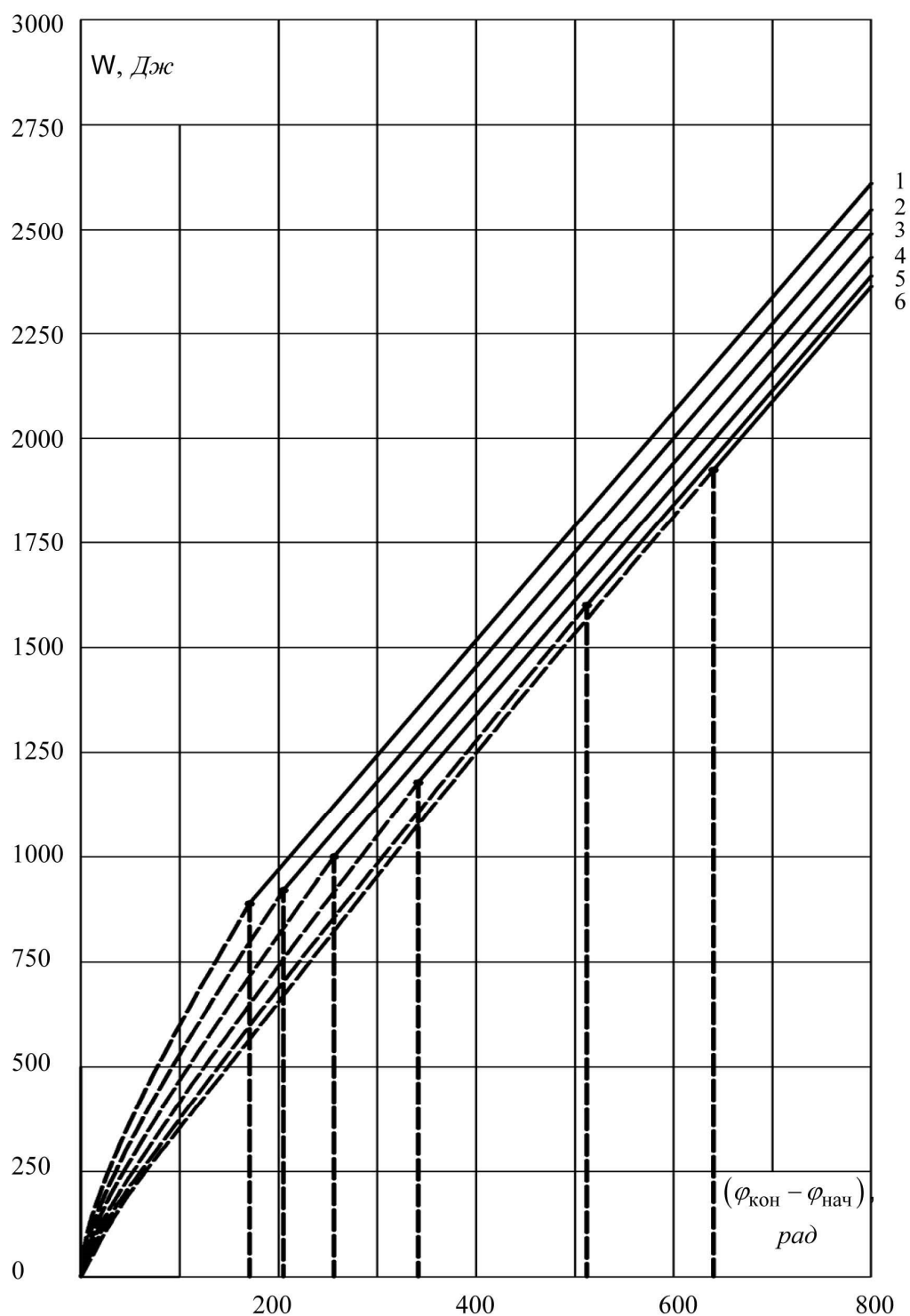


Рисунок 4

Кривая 1 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 150 \frac{\text{рад}}{c^2}$ ; кривая 2 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 125 \frac{\text{рад}}{c^2}$ ; кривая 3 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 100 \frac{\text{рад}}{c^2}$ ; кривая 4 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 75 \frac{\text{рад}}{c^2}$ ; кривая 5 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 50 \frac{\text{рад}}{c^2}$ ; кривая 6 получена при  $w_{\max}^{(1)} = 40 \frac{\text{рад}}{c^2}$ .

### Выводы

Предложено рационально управлять позиционным электроприводом постоянного тока с постоянным моментом сопротивления – осуществлять перемещение исполнительного органа промышленного механизма не за минимально возможное время с большим потреблением электрической энергии из сети, а за заданное по технологии время с меньшим потреблением электрической энергии из сети.

Получены аналитические зависимости для электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, при перемещении его исполнительного органа по оптимальным по быстродействию диаграммам как без ограничения, так и с ограничением по скорости.

Определено максимальное экстремальное значение первой производной угловой скорости электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления, при которой якорная цепь электропривода потребляет минимальное количество электроэнергии из сети за цикл перемещения его исполнительного органа.

Построены зависимости: длительности цикла от значения заданного перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода; величины электроэнергии, потребляемой якорной цепью электропривода, за цикл перемещения от значения заданного перемещения (поворота) исполнительного органа электропривода.

Реализация предлагаемого рационального управления позиционным электроприводом постоянного тока с постоянным моментом сопротивления приведет к энергосбережению.

### **Список литературы**

1. Соколов М.М. Автоматизированный электропривод общепромышленных механизмов. – М.: Энергия, 1976. – 488 с.
2. Ю.П. Добробаба. Электрический привод. Учеб. пособие /Кубан. гос. технол. ун-т. Краснодар: Изд-во ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2011. – 252 с.