

УДК 62.83.52:62.503.56

UDC62.83.52:62.503.56

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

**DEVELOPMENT OF RATIONAL OPERATION
OF POSITIONAL DC ELECTRIC DRIVE
WITH CONSTANT RESISTING MOMENT
AND ELASTIC SHAFTING**

Добробаба Юрий Петрович
к.т.н., профессор

Dobrobaba Yurii Petrovitch
Cand.Tech.Sci., professor

Кравченко Артем Владимирович
студент

Kravchenko Artyom Vladimirovich
student

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

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

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

This article proposes rational operation for positional dc electric drive with constant resisting moment and elastic shafting. Ratio between cycle duration and electric power consumption identified depending specified move

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

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

В работах [1, 2] показано, что в настоящее время позиционные электроприводы в основном осуществляют перемещение исполнительных органов промышленных механизмов по оптимальным по быстродействию диаграммам. Авторы статьи [3] акцентируют внимание на том, что максимальное быстродействие (минимальная длительность цикла перемещения) целесообразно на самом узком участке технологической линии (с наибольшей длительностью цикла перемещения). На остальных участках технологической линии предлагают осуществлять перемещение исполнительного органа механизма с меньшей интенсивностью (за время, обусловленное технологическим процессом). При этом электрический привод обеспечивает перемещение исполнительного органа механизма не за минимально возможное время с большим потреблением электроэнергии из сети, а за заданное по технологии время с меньшим потреблением

электрической энергии из сети. Такое управление названо рациональным (экономически целесообразным) [3].

В статье [3] разработано рациональное управление позиционным электроприводом постоянного тока с постоянным моментом сопротивления.

В статье [4] разработано рациональное управление позиционным электроприводом постоянного тока с моментом сопротивления, зависящим от скорости в виде полинома первой степени.

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

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

$$\left. \begin{aligned} U &= C_e w_1 + R_{я} I_{я}; \\ C_m I_{я} &= M_y + J_1 w_1^{(1)}; \\ M_y &= M_{c0} + K_c w_2 + J_2 w_2^{(1)}; \\ j_1^{(1)} &= w_1; \\ j_2^{(1)} &= w_2; \\ M_y &= C_y \cdot (j_1 - j_2), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

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

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

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

M_y – упругий момент электропривода, Н·м;

- $w_1^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа электродвигателя, $\frac{рад}{с^2}$;
- M_{c0} – постоянный по величине момент сопротивления электропривода, $H \cdot м$;
- w_2 – угловая скорость исполнительного органа механизма, $\frac{рад}{с}$;
- $w_2^{(1)}$ – первая производная угловой скорости исполнительного органа механизма, $\frac{рад}{с^2}$;
- j_1 – угол поворота исполнительного органа электродвигателя, $рад$;
- j_2 – угол поворота исполнительного органа механизма, $рад$;
- C_e – коэффициент пропорциональности между угловой скоростью исполнительного органа электродвигателя и его ЭДС, $\frac{В \cdot с}{рад}$;
- $R_{я}$ – сопротивление якорной цепи электродвигателя, $Ом$;
- C_m – коэффициент пропорциональности между током якорной цепи электродвигателя и его моментом, $В \cdot с$;
- J_1 – момент инерции исполнительного органа электродвигателя, $кг \cdot м^2$.
- J_2 – момент инерции исполнительного органа механизма, $кг \cdot м^2$;
- C_y – упругость валопровода, $\frac{Н \cdot м}{рад}$.

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 и упругим валопроводом без ограничения по скорости, состоящая из десяти этапов. На рисунке 1 приняты следующие обозначения:

U_{\max} – максимальное значение напряжения, приложенного к якорной цепи электропривода, B ;

I_{\max} – максимальное значение тока якорной цепи электродвигателя, A ;

I_{\min} – минимальное значение тока якорной цепи электродвигателя, A ;

$j_{\text{нач}}$ – начальное значение угла поворота исполнительного органа механизма, rad ;

$j_{\text{кон}}$ – конечное значение угла поворота исполнительного органа механизма, rad ;

w_{\max} – максимальное значение угловой скорости исполнительного органа механизма, $\frac{rad}{c}$;

$w_{\max}^{(1)}$ – максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа механизма, $\frac{rad}{c^2}$;

t_1 – длительность первого, второго, четвертого, пятого, шестого, седьмого, девятого и десятого этапов, c ;

t_2 – длительность третьего и восьмого этапов, c .

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

$$t_1 = \sqrt{\frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}; \quad (2)$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\max}^{(1)}} + \frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}} - 3 \cdot \sqrt{\frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}; \quad (3)$$

$$T_{\text{ц}} = 8t_1 + 2t_2; \quad (4)$$

$$W_{\max} = W_{\max}^{(1)} \cdot \left[\sqrt{\frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\max}^{(1)}} + \frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}} - \sqrt{\frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}} \right], \quad (5)$$

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

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

$$W = \frac{C_e}{C_M} \cdot (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) \cdot M_{\text{с0}} + \frac{R_{\text{я}}}{C_M^2} \left\{ M_{\text{с0}}^2 \cdot (8t_1 + 2t_2) + \right. \\ \left. + 2 \cdot (J_1 + J_2)^2 \cdot [w_{\max}^{(3)}]^2 \cdot \left(\frac{23}{15} t_1^5 + t_1^4 t_2 \right) - \right. \\ \left. - \frac{16}{3} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot [w_{\max}^{(3)}]^2 \cdot t_1^3 + 8 \cdot \frac{J_1^2 J_2^2}{C_y^2} \cdot [w_{\max}^{(3)}]^2 \cdot t_1 \right\}. \quad (6)$$

Оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом без ограничения по скорости справедлива при выполнении условия:

$$j_{гр1} \leq (j_{кон} - j_{нач}) \leq j_{гр2}, \quad (7)$$

где
$$j_{гр1} = 8 \cdot \frac{[w_{max}^{(1)}]^2}{w_{max}^{(3)}};$$

$$j_{гр2} = w_{доп} \cdot \left[\frac{w_{доп}}{w_{max}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{w_{max}^{(1)}}{w_{max}^{(3)}}} \right];$$

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

Если условие (7) не выполняется, то необходимо перемещение исполнительного органа механизма осуществлять по оптимальной по быстродействию диаграмме с ограничением по скорости.

На рисунке 2 представлена оптимальная по быстродействию диаграмма перемещения исполнительного органа электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом с ограничением по скорости, состоящая из одиннадцати этапов. На рисунке 2 приняты следующие обозначения:

- t_1 – длительность первого, второго, четвертого, пятого, седьмого, восьмого, десятого и одиннадцатого этапов $с$;
- t_2 – длительность третьего и девятого этапов, $с$;
- t_3 – длительность шестого этапа, $с$.

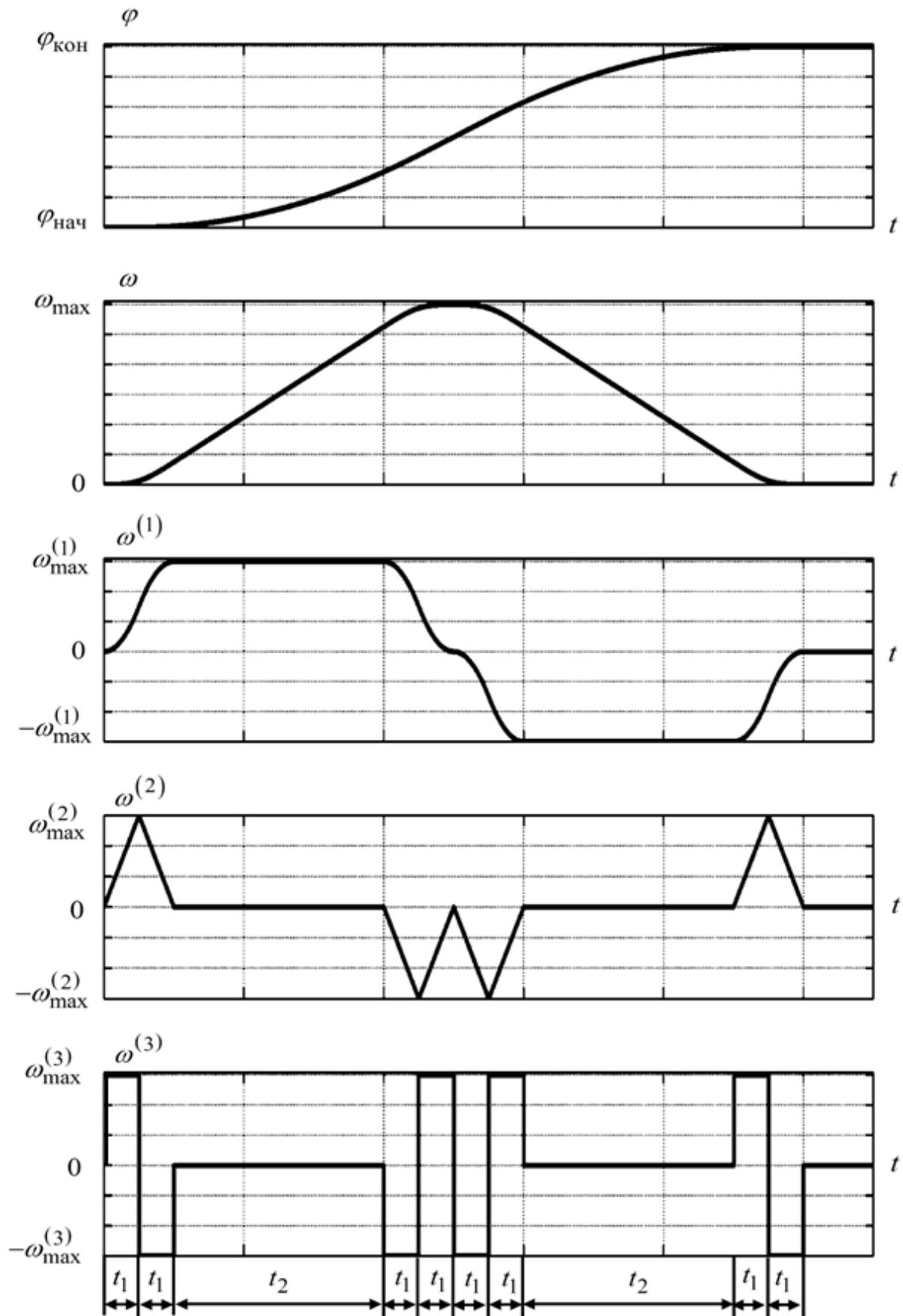


Рисунок 1

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

$$t_1 = \sqrt{\frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}; \quad (8)$$

$$t_2 = \frac{W_{\text{доп}}^{(1)}}{W_{\max}^{(1)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}; \quad (9)$$

$$t_3 = \frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\text{доп}}} - \frac{W_{\text{доп}}^{(1)}}{W_{\max}^{(1)}} - 2 \cdot \sqrt{\frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}; \quad (10)$$

$$T_{\text{ц}} = \frac{j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}}{W_{\text{доп}}} + \frac{W_{\text{доп}}^{(1)}}{W_{\max}^{(1)}} + 2 \cdot \sqrt{\frac{W_{\max}^{(1)}}{W_{\max}^{(3)}}}. \quad (11)$$

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

$$W = \frac{C_e}{C_m} \cdot (j_{\text{кон}} - j_{\text{нач}}) \cdot M_{c0} + \frac{R_{\text{я}}}{C_m^2} \left\{ M_{c0}^2 \cdot (8t_1 + 2t_2 + t_3) + \right. \\ \left. + 2 \cdot (J_1 + J_2)^2 \cdot [w_{\max}^{(3)}]^2 \cdot \left(\frac{23}{15} t_1^5 + t_1^4 t_2 \right) - \right. \\ \left. - \frac{16}{3} \cdot (J_1 + J_2) \cdot \frac{J_1 J_2}{C_y} \cdot [w_{\max}^{(3)}]^2 \cdot t_1^3 + 8 \cdot \frac{J_1^2 J_2^2}{C_y^2} \cdot [w_{\max}^{(3)}]^2 \cdot t_1 \right\}. \quad (12)$$

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

$$j_{гр2} \leq (j_{кон} - j_{нач}). \quad (13)$$

В зависимости от заданных величин перемещения, длительности цикла исполнительного органа механизма и длительности этапов t_1 , возможны два варианта реализации перемещения исполнительного органа электропривода. При этом должно выполняться условие

$$T_{ц} \geq 8t_1. \quad (14)$$

Вариант 1. Если выполняется условие

$$T_{ц} \geq 2 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{доп}}, \quad (15)$$

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

$$t_2 = \frac{1}{2}T_{ц} - 4t_1; \quad (16)$$

$$t_3 = 0; \quad (17)$$

$$w_{max} = 2 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{T_{ц}}; \quad (18)$$

$$w_{max}^{(1)} = 4 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{T_{ц} \cdot (T_{ц} - 4t_1)}; \quad (19)$$

$$w_{max}^{(2)} = \frac{w_{max}^{(1)}}{t_1}; \quad (20)$$

$$w_{max}^{(3)} = \frac{w_{max}^{(1)}}{t_1^2}. \quad (21)$$

Вариант 2. Если выполняется условие

$$T_{ц} \leq 2 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{доп}}, \quad (22)$$

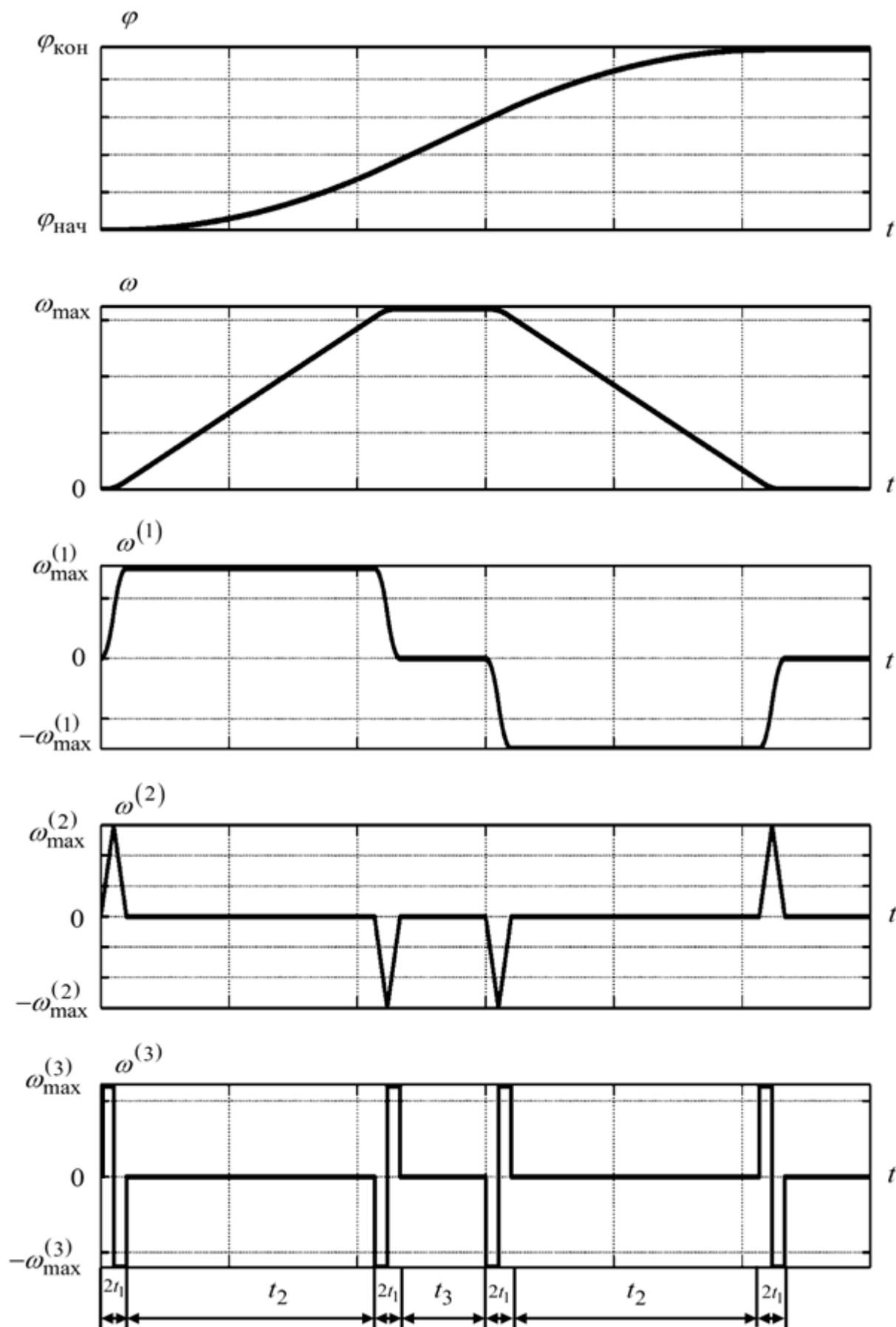


Рисунок 2

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

$$t_2 = T_{ц} - 4t_1 - \frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{доп}}; \quad (23)$$

$$t_3 = 2 \cdot \frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{доп}} - T_{ц}; \quad (24)$$

$$w_{max}^{(1)} = w_{доп} \cdot \left(T_{ц} - 2t_1 - \frac{j_{кон} - j_{нач}}{w_{доп}} \right)^{-1}; \quad (25)$$

$$w_{max}^{(2)} = \frac{w_{max}^{(1)}}{t_1}; \quad (26)$$

$$w_{max}^{(3)} = \frac{w_{max}^{(1)}}{t_1^2}. \quad (27)$$

Для проведения численного эксперимента выбран электропривод постоянного тока с постоянным моментом сопротивления и упругим

валопроводом, имеющий следующие параметры: $C_e = 1,25 \frac{B \cdot c}{рад}$;

$C_M = 1,25 B \cdot c$; $R_{я} = 5 Ом$; $J_1 = 0,025 кг \cdot м^2$; $J_2 = 0,025 кг \cdot м^2$;

$C_y = 5 \frac{H \cdot м \cdot c}{рад}$. Допустимые значения первой производной и третьей

производной угловых скоростей исполнительного органа механизма:

$w_{доп}^{(1)} = 150 \frac{рад}{с^2}$ и $w_{доп}^{(3)} = 60000 \frac{рад}{с^4}$. При расчетах постоянный по величине

момент сопротивления электропривода имел значение $M_{с0} = 2,5 H \cdot м$.

Для электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом, осуществляющего перемещение своего исполнительного органа в соответствии с оптимальной по

быстродействию диаграммой без ограничения по скорости, проведена серия численных экспериментов для определения зависимостей: длительности цикла перемещения исполнительного органа электропривода $T_{ц}$ от заданного перемещения $\Delta j = (j_{кон} - j_{нач})$; потребляемой якорной цепью электропривода электроэнергии W от заданного перемещения $\Delta j = (j_{кон} - j_{нач})$. При этом задание на перемещение Δj изменялось от $j_{гр1}$ до $j_{гр2}$.

Максимальное значение первой производной угловой скорости исполнительного органа принималось равным:

$$w_{max}^{(1)} = 150 \frac{рад}{с^2} \text{ (при этом } j_{гр1} = 3 \text{ рад и } j_{гр2} = 186\frac{2}{3} \text{ рад)};$$

$$w_{max}^{(1)} = 125 \frac{рад}{с^2} \text{ (при этом } j_{гр1} = 2,5 \text{ рад и } j_{гр2} = 220,8 \text{ рад)};$$

$$w_{max}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2} \text{ (при этом } j_{гр1} = 2 \text{ рад и } j_{гр2} = 272 \text{ рад)};$$

$$w_{max}^{(1)} = 75 \frac{рад}{с^2} \text{ (при этом } j_{гр1} = 1,5 \text{ рад и } j_{гр2} = 357\frac{1}{3} \text{ рад)};$$

$$w_{max}^{(1)} = 50 \frac{рад}{с^2} \text{ (при этом } j_{гр1} = 1 \text{ рад и } j_{гр2} = 528 \text{ рад)};$$

$$w_{max}^{(1)} = 40 \frac{рад}{с^2} \text{ (при этом } j_{гр1} = 0,8 \text{ рад и } j_{гр2} = 656 \text{ рад)}.$$

Для электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом, 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 еще одной 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 $w_{max}^{(1)} = 150 \frac{рад}{с^2}$ и $w_{max}^{(3)} = 60000 \frac{рад}{с^4}$; кривая 2 получена при $w_{max}^{(1)} = 125 \frac{рад}{с^2}$ и $w_{max}^{(3)} = 50000 \frac{рад}{с^4}$; кривая 3 получена при $w_{max}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2}$ и $w_{max}^{(3)} = 40000 \frac{рад}{с^4}$; кривая 4 получена при $w_{max}^{(1)} = 75 \frac{рад}{с^2}$ и $w_{max}^{(3)} = 30000 \frac{рад}{с^4}$; кривая 5 получена при $w_{max}^{(1)} = 50 \frac{рад}{с^2}$ и $w_{max}^{(3)} = 20000 \frac{рад}{с^4}$; кривая 6 получена при $w_{max}^{(1)} = 40 \frac{рад}{с^2}$ и $w_{max}^{(3)} = 16000 \frac{рад}{с^4}$.

На рисунке 4 на основании проведенного численного эксперимента построены зависимости потребляемой якорной цепью электропривода электроэнергии W от заданного перемещения $\Delta j = (j_{кон} - j_{нач})$. Кривая 1 получена при $w_{max}^{(1)} = 150 \frac{рад}{с^2}$; кривая 2 получена при $w_{max}^{(1)} = 125 \frac{рад}{с^2}$; кривая 3 получена при $w_{max}^{(1)} = 100 \frac{рад}{с^2}$; кривая 4 получена при $w_{max}^{(1)} = 75 \frac{рад}{с^2}$; кривая 5 получена при $w_{max}^{(1)} = 50 \frac{рад}{с^2}$; кривая 6 получена при $w_{max}^{(1)} = 40 \frac{рад}{с^2}$.

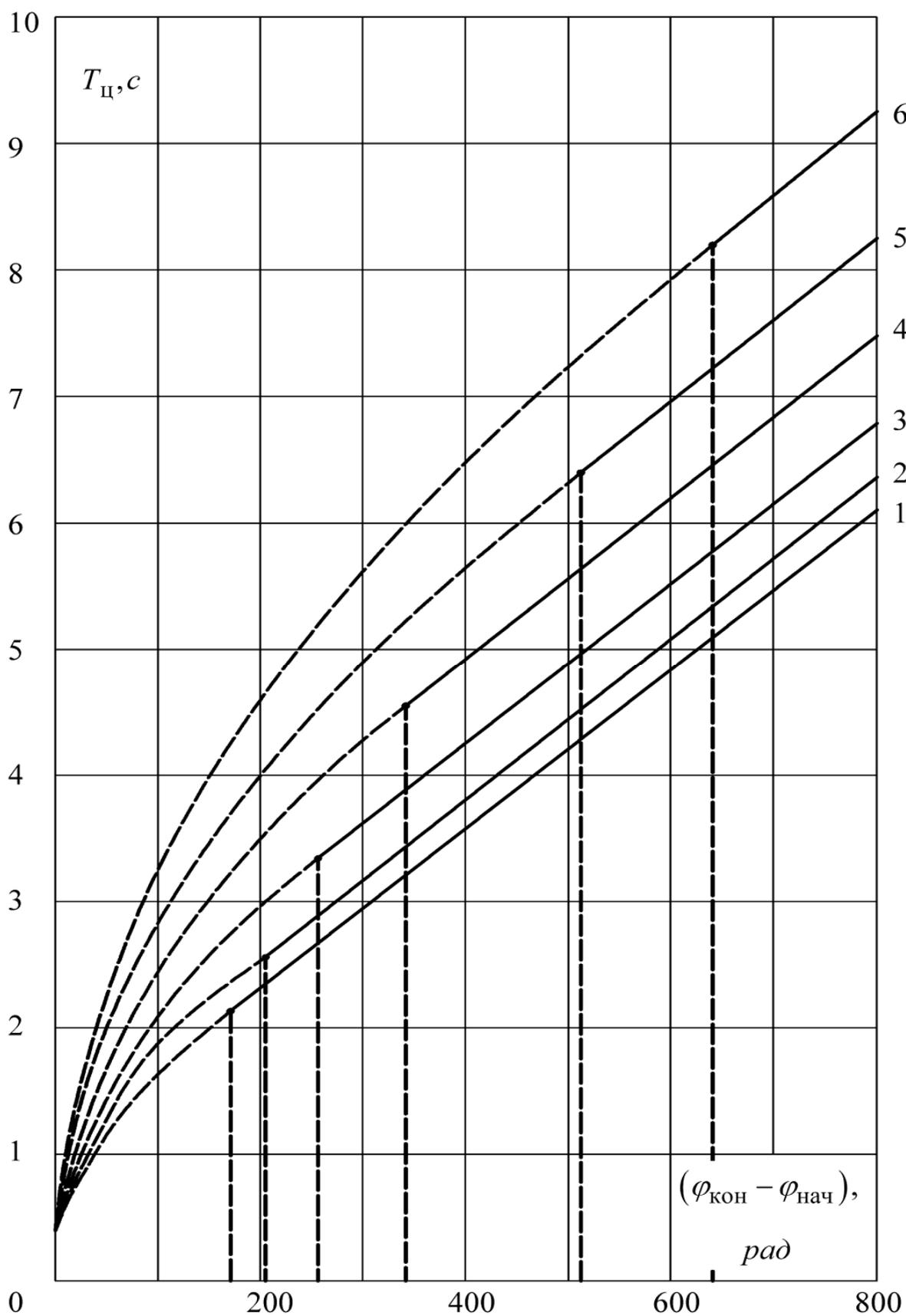


Рисунок 3

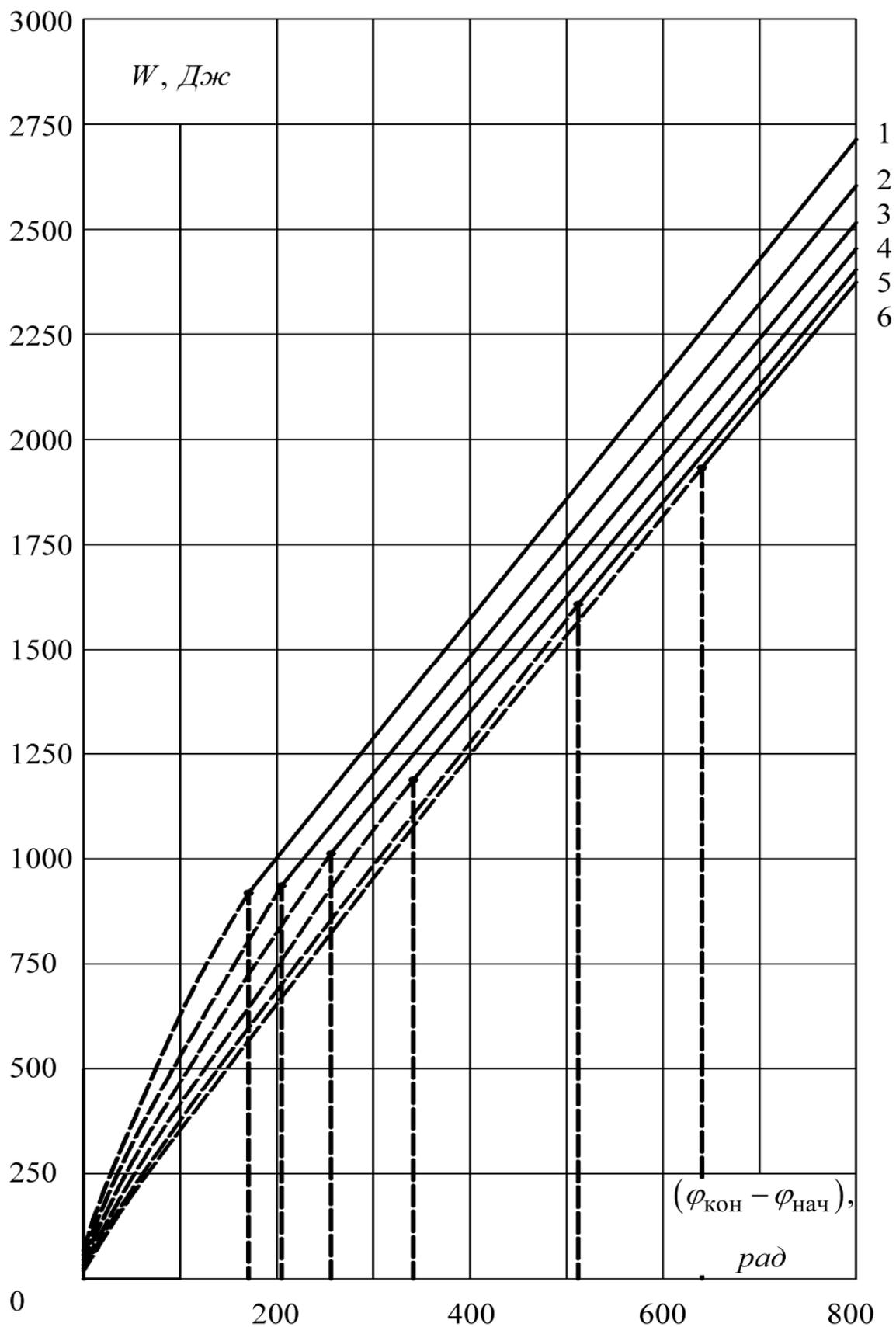


Рисунок 4

Выводы

Предложено рационально управлять позиционным электроприводом постоянного тока с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом – 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.

Разработан алгоритм, который позволяет определять для электропривода постоянного тока с постоянным моментом сопротивления и упругим валопроводом, совершающим заданное перемещение исполнительного органа за заданное время, вид конкретной диаграммы перемещения исполнительного органа электропривода и ее параметры.

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 и упругим валопроводом 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 2-е изд. доп. /Кубан. гос. технол. ун-т. -Краснодар: Изд. ФГБОУ ВПО «КубГТУ», 2013. – 302 с.

3. Ю.П. Добробаба, А.В. Кравченко. Разработка рационального управления позиционным электроприводом постоянного тока с постоянным моментом сопротивления. -Научный журнал КубГАУ №87(03), 2013. Ссылка на интернет-ресурс: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/49.pdf>.

4. Ю.П. Добробаба, А.В. Кравченко, Н.А. Волошенко. Разработка рационального управления позиционным электроприводом постоянного тока с моментом сопротивления, зависящим от скорости в виде полинома первой степени. -Научный журнал КубГАУ №89(05), 2013. Ссылка на интернет-ресурс: <http://ej.kubagro.ru/2013/05/pdf/33.pdf>.

References

1. Sokolov M.M. Avtomatizirovannyj jelektroprivod obshhepromyshlennyh mehanizmov. – М.: Jenergija, 1976. – 488 s.

2. Ju.P. Dobrobaba. Jelektricheskij privod. ucheb.posobie 2-e izd. dop. /Kuban. gos. tehnol. un-t. -Krasnodar: Izd. FGBOU VPO «KubGTU», 2013. – 302 s.

3. Ju.P. Dobrobaba, A.V. Kravchenko. Razrabotka racional'nogo upravlenija pozicionnym jelektroprivodom postojannogo toka s postojannym momentom soprotivle-nija. - Nauchnyj zhurnal KubGAU №87(03), 2013. Ssylka na internet-resurs: <http://ej.kubagro.ru/2013/03/pdf/49.pdf>.

4. Ju.P. Dobrobaba, A.V. Kravchenko, N.A. Voloshenko. Razrabotka racional'nogo upravlenija pozicionnym jelektroprivodom postojannogo toka s momentom soprotivlenija, zavisjashhim ot skorosti v vide polinoma pervoj stepeni. -Nauchnyj zhurnal KubGAU №89(05), 2013. Ssylka na internet-resurs: <http://ej.kubagro.ru/2013/05/pdf/33.pdf>.