

Ю.В. Губарь (канд.техн.наук, доц.)
Донецкий национальный технический университет
gubar@cs.dgtu.donetsk.ua

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОЗИЦИОННЫХ МЕХАНИЗМОВ ПО ДИНАМИЧЕСКИМ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Рассмотрены актуальные вопросы влияния интенсификации переходных процессов позиционных механизмов прокатного стана, работающих в пуско-тормозных режимах, на нагрев двигателя и быстродействие электропривода. В среде Matlab+Simulink проведено математическое моделирование позиционных систем с комбинированным управлением по задающему воздействию, подтверждающие их высокие динамические и энергетические показатели и целесообразность использования на практике.

позиционный электропривод, двигатель, прокатный стан, переходной процесс, нагрев

Введение

Увеличение цен на энергоносители повышают актуальность принятия решений, направленных на снижение непроизводительных затрат электроэнергии [1].

Позиционный механизм электропривода нажимных винтов прокатного стана работает в напряженном повторно – кратковременном режиме. Его задача заключается в переводе верхнего валка рабочего органа из одного фиксированного положения в другое по заданной программе. Производительность такой системы зависит от быстродействия привода в условиях, как правило, повышенного нагрева двигателя [2]. Поэтому оптимальным управлением является такое, при котором минимизируется время отработки заданного перемещения в условиях ограниченного нагрева двигателя. Ограничение на нагрев двигателя накладывается также стремлением повысить надежность работы привода [3].

Повысить производительность прокатного стана можно за счет сокращения времени пауз между пропусками [6]. Минимально необходимые паузы, лимитирующие работу прокатного стана, определяются главным образом временем работы нажимного устройства (за исключением пропусков с кантовкой слитка), которое в значительной мере зависит от характеристик переходных процессов. Последние, в свою очередь, определяются диаграммой тока якоря двигателя [2].

В связи с изложенным, научный и практический интерес представляет решение задачи обеспечения желаемого качества

переходных процессов в СРП в рамках традиционной структуры подчиненного регулирования (СПР) [4]. Целью данной работы является анализ и исследование повышения производительности позиционных механизмов прокатного стана и снижения тепловых потерь в приводном двигателе за счет интенсификации переходных процессов.

Анализ диаграммы тока якоря двигателя на нагрев и быстроедействие позиционной системы электропривода

Для решения поставленной задачи рассмотрим вопрос о связи между формой диаграммы тока якоря двигателя и производительностью позиционного привода.

Для математического анализа введем систему относительных величин [2]:

$$\tau = \frac{t}{B_M} - \text{время} \quad (B_M = \frac{J_{\Pi} \cdot \omega_M}{M_H} - \text{электромеханическая постоянная}$$

времени привода, с; J_{Π} - суммарный момент инерции привода, кг·м²; M_H - номинальный момент, Н·м);

$\gamma = \frac{\omega}{\omega_H}$ - угловая скорость вращения двигателя (ω_H - номинальная скорость, рад/с);

$\alpha = \frac{\varphi}{\varphi_H}$ - угол, обрабатываемый валом двигателя ($\varphi_H = B_M \cdot \omega_H$ - угловая постоянная привода, рад);

$$i = \frac{I}{I_H} - \text{ток якоря двигателя} (I_H - \text{номинальный ток, А});$$

$$q = \frac{Q}{Q_H} - \text{количество тепла, выделяемого в обмотке якоря}$$

$$(Q = R_{\text{я}} \cdot \int_0^t I^2 dt, Q_H = R_{\text{я}} \cdot I_H^2 \cdot B_M, \text{ Дж}; R_{\text{я}} - \text{суммарное активное}$$

сопротивление силовой цепи, Ом).

Предположим, что требуется обеспечить отработку заданного перемещения α_p по треугольному графику скорости за время τ_p при нулевом начальном и конечном значениях скорости ($\gamma(0) = \gamma(\tau_p) = 0$). В этом случае реальная диаграмма изменения тока якоря при реализации равноускоренного (равнозамедленного) движения имеет вид, показанный на рис.1,а. Будем полагать, что параметры системы выбраны такими, что перерегулирование по току невелико. Без большой погрешности приведенная диаграмма тока может быть аппроксимирована прямыми линиями, как это показано на рис.1,б.

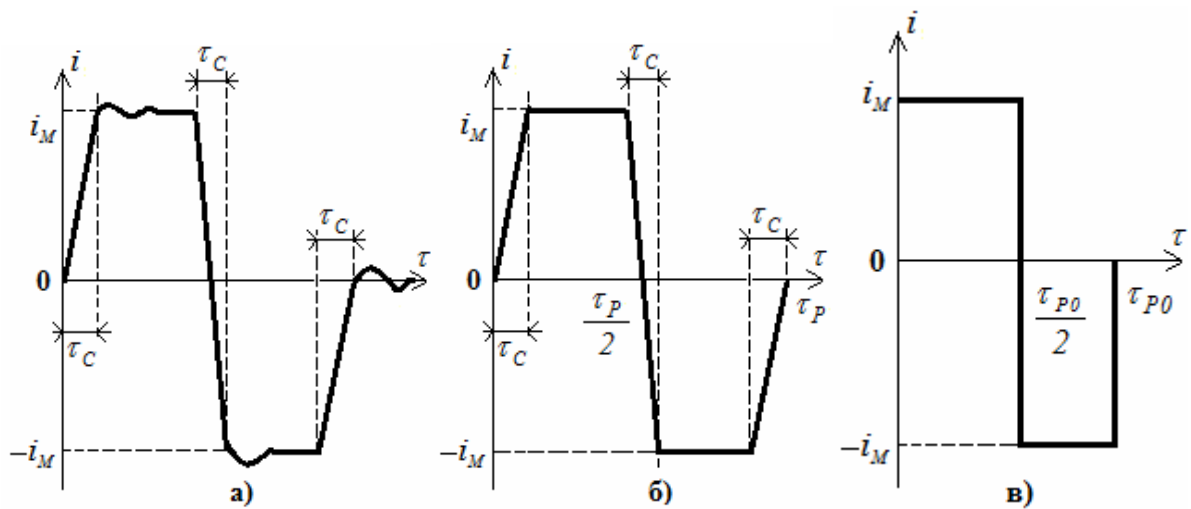


Рисунок 1 - Диаграммы тока якоря двигателя

Рассмотрим вопрос влияния времени τ_c первого согласования тока с установившимся значением на работу привода и целесообразность повышения интенсификации переходных процессов (уменьшения времени τ_c). Исследование выполним для случая, когда ток статической нагрузки i_c равен нулю. Этот случай оказывается достаточным, чтобы выявить искомые здесь основные закономерности.

Используя уравнения движения привода при $i_c = 0$

$$\frac{d\alpha}{d\tau} = \gamma, \quad \frac{d\gamma}{d\tau} = i, \quad (1)$$

для диаграммы тока рис.1,б находим выражение для определения величины заданного перемещения α_P при фиксированном значении тока (ускорения):

$$\alpha_P = \frac{i_M \tau_P^2}{4} \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_P}\right)^2 = \frac{i_M}{4} (\tau_P - \tau_c)^2. \quad (2)$$

Для технически оптимальной (желаемой) диаграммы тока ($\tau_c = 0$), которую условно примем в качестве эталона добротности (рис.1,в), имеем

$$\alpha_{P0} = \frac{i_M \tau_{P0}^2}{4}. \quad (3)$$

Из последних двух уравнений видно, что отработка двух одинаковых перемещений $\alpha_P = \alpha_{P0}$ возможна при условии

$$\tau_P = \tau_{P0} + \tau_C. \quad (4)$$

Полученная закономерность остается справедливой при любых значениях $\tau_C = \tau_P / 3$. При сравнении двух произвольных диаграмм с различными значениями τ_C (τ_{C1} и τ_{C2}) времена отработки заданного перемещения будут составлять

$$\tau_{P2} = \tau_{P0} + \tau_{C2} \text{ и } \tau_{P1} = \tau_{P0} + \tau_{C1}. \quad (5)$$

Тогда уменьшение времени $\Delta\tau_P$ отработки заданного перемещения за счет интенсификации переходных процессов равно разности времен первого согласования тока с установившимся значением

$$\Delta\tau_P = \tau_{P2} - \tau_{P1} = \tau_{C2} - \tau_{C1} \quad (6)$$

или в абсолютных значениях времени

$$\Delta t_P = t_{P2} - t_{P1} = t_{C2} - t_{C1}. \quad (7)$$

Таким образом, величина t_C может служить мерой быстродействия позиционного привода. Уменьшение времени t_C приводит к уменьшению времени отработки заданного перемещения при неизменном ускорении привода и может быть использовано для повышения производительности привода и стана в целом.

Далее рассмотрим вопрос влияния времени τ_C первого согласования тока с установившимся значением на нагрев двигателя. Исследование выполним для случая, когда ток статической нагрузки i_C равен нулю. Этот случай оказывается достаточным, чтобы выявить искомые здесь основные закономерности.

На рис.2 выделены шесть характерных участков изменения тока якоря двигателя $i(\tau)$, который при неизменном магнитном потоке пропорционален ускорению двигателя. Для каждого из участков определим законы изменения тока i , скорости γ и угла поворота вала двигателя α в относительном времени τ .

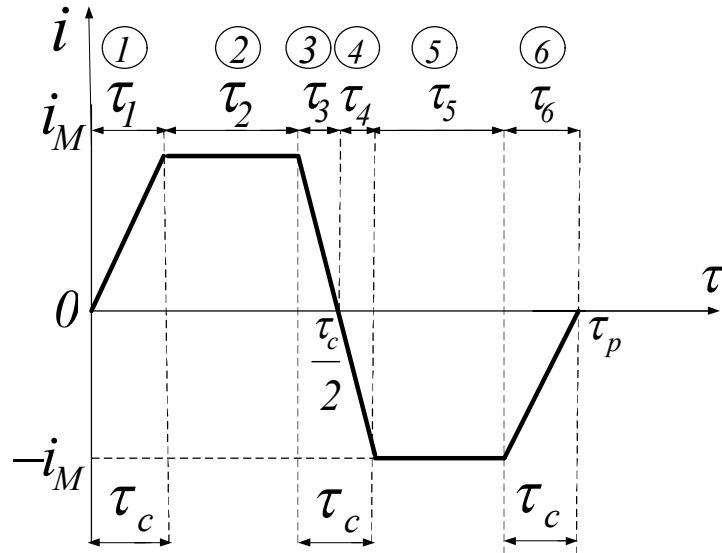


Рисунок 2 – Шесть участков изменения тока якоря двигателя

На первом участке:

$$i_1 = i_M \cdot \frac{\tau}{\tau_c}; \quad \gamma_1 = \int i d\tau = \frac{i_M \cdot \tau^2}{2\tau_c}; \quad \alpha_1 = \int \gamma d\tau = \frac{i_M \cdot \tau^3}{6\tau_c}. \quad (8)$$

$$\text{При } \tau = \tau_1 \rightarrow \gamma_{M1} = \frac{i_M \cdot \tau_c}{2}. \quad (9)$$

На втором участке:

$$i_2 = i_M; \quad \gamma_2 = \gamma_{M1} + \int i d\tau = \frac{i_M \cdot \tau_c}{2} + i_M \cdot \tau; \quad \alpha_2 = \int \gamma d\tau = \frac{i_M \cdot \tau_c \cdot \tau}{2} + \frac{i_M \cdot \tau^2}{2}. \quad (10)$$

$$\text{При } \tau = \tau_2 \rightarrow \gamma_{M2} = \frac{i_M \cdot \tau_c}{2} + i_M \cdot \tau_c. \quad (11)$$

На третьем участке:

$$i_3 = i_M \cdot \left(1 - \frac{\tau}{\tau_3}\right); \quad \gamma_3 = \gamma_{M2} + \int i d\tau = \frac{i_M \cdot \tau_c}{2} + i_M \cdot \tau_2 + i_{M1} \cdot \tau - \frac{i_M \cdot \tau^2}{2\tau_3}; \quad (12)$$

$$\alpha_3 = \int \gamma d\tau = \frac{i_M \cdot \tau_c \cdot \tau}{2} + i_M \cdot \tau_2 \cdot \tau + \frac{i_M \cdot \tau^2}{2} - \frac{i_M \cdot \tau^3}{6\tau_3}. \quad (13)$$

$$\text{При } \tau = \tau_3 \rightarrow \gamma_3 = 0. \quad (14)$$

Будем полагать, что разгон и торможение привода осуществляются с одинаковым по модулю ускорением (током якоря двигателя i_M). Тогда имеем:

$$\tau_3 = \tau_4, \quad \tau_2 = \tau_5, \quad \tau_1 = \tau_6; \quad \alpha_3 = \alpha_4, \quad \alpha_2 = \alpha_5, \quad \alpha_1 = \alpha_6. \quad (15)$$

Отработка заданного перемещения (угла поворота) α_p составит в этом случае величину

$$\alpha_p = 2 \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) = \frac{i_M \cdot (\tau_p)^2}{4} \cdot \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau_p}\right). \quad (16)$$

Воспользовавшись формулой [2]

$$q_P = \int_0^{\tau_P} i^2 d\tau \quad (17)$$

для количества тепла, выделяемого в обмотках якоря двигателя при обработке заданного перемещения α_P за фиксированное время τ_P , находим:

$$q_1 = \int_0^{\tau_1} (i_1)^2 d\tau = \int_0^{\tau_1} (i_M)^2 \cdot \frac{\tau^2}{(\tau_C)^2} d\tau = \frac{1}{3} \cdot (i_M)^2 \cdot \tau_C; \quad (18)$$

$$q_2 = \int_0^{\tau_2} (i_2)^2 d\tau = \int_0^{\tau_2} (i_M)^2 d\tau = (i_M)^2 \cdot \tau_2; \quad (19)$$

$$q_3 = \int_0^{\tau_3} (i_3)^2 d\tau = \int_0^{\tau_3} (i_M)^2 \cdot \left(1 - \frac{2\tau}{\tau_3} + \frac{\tau^2}{(\tau_3)^2}\right) d\tau = \frac{1}{3} (i_M)^2 \cdot \tau_3. \quad (20)$$

Обозначим $C = \frac{\tau_C}{\tau_P}$. Из диаграммы рис.2 находим:

$$\tau_1 = \tau_C = C \cdot \tau_P; \quad \tau_2 = \frac{\tau_P}{2} - \frac{3}{2} \cdot C \cdot \tau_P = \frac{\tau_P}{2} \cdot (1 - 3C); \quad \tau_3 = \frac{\tau_P}{2} \cdot C. \quad (21)$$

Общее выражение вычисления q_P на всех участках работы привода составит:

$$\begin{aligned} q_P &= 2(q_1 + q_2 + q_3) = 2(i_M)^2 \cdot \left(\frac{\tau_1}{3} + \tau_2 + \frac{\tau_3}{3}\right) = \frac{16(\alpha_P)^2}{(\tau_P)^3} \cdot \frac{1 - 2C}{(1 + C^2 - 2C)^2} = \\ &= \frac{16(\alpha_P)^2}{(\tau_P)^3} \cdot \frac{1 - 2\frac{\tau_C}{\tau_P}}{\left(1 - \frac{\tau_C}{\tau_P}\right)^4}. \end{aligned} \quad (22)$$

Для суждения об относительной добротности исследуемой диаграммы введем показатель добротности

$$\delta_q = \frac{q_P - q_{P0}}{q_{P0}} \cdot 100\%, \quad (23)$$

который характеризует превышение количества тепла, выделяемого в обмотке якоря при работе двигателя с токовой диаграммой рис.1,б, над количеством тепла, выделяемого в обмотке якоря двигателя с технически оптимальной диаграммой тока рис.1,в, для которой

$$q_{P0} = \frac{16\alpha_P^2}{\tau_P^3}. \quad (24)$$

График зависимости $\delta_q(\tau_C / \tau_P)$ представлен на рис.3. Из графика видно, что с уменьшением времени τ_C при фиксированном значении τ_P потери тепла в обмотке якоря двигателя, работающего с токовой диаграммой рис.1,б, уменьшаются.

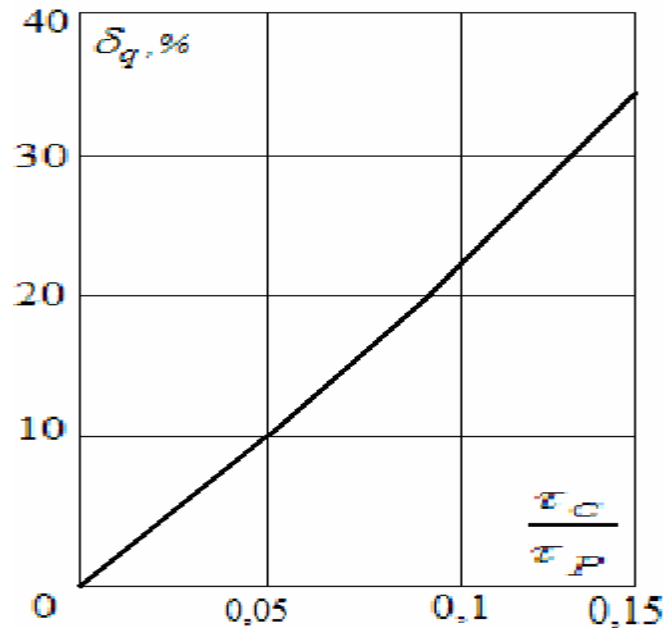


Рисунок 3 - График зависимости δ_q (τ_c / τ_P)

Для количественной оценки уменьшения потерь тепла в якоре двигателя учтем, что в типовых позиционных приводах подчиненного регулирования $t_c = (7,5 \div 29,5)T_\mu$, где T_μ - малая некомпенсируемая постоянная времени привода, с [5]. Примем $T_\mu = 0,005$ с. Время работы t_P привода нажимного устройства обжимных прокатных станков составляет обычно $1 \div 2$ с. Тогда отношение $t_c / t_P \approx 0,04 \div 0,15$. Уменьшение времени t_c в два раза при фиксированном значении времени работы привода позволяет уменьшить количество тепла, выделяемого в обмотке якоря двигателя, примерно на $4 \div 18$ %.

Анализ результатов исследования

Экспериментальные исследования рассмотренных систем проводились методом математического моделирования в среде Matlab с использованием пакета расширения Simulink [4]. В качестве примера на рис.4,а приведены графики переходных процессов в системе регулирования положения (СРП) при обработке заданного перемещения α_3 без участка установившегося движения, а на рис.4,б - начальный участок тока якоря двигателя. Значение времени t_c в СРП с КУ составляет $7,5T_\mu$, а в СРП с УО - $t_c = 14,5T_\mu$ (T_μ - малая некомпенсируемая постоянная времени привода). Модельные эксперименты показали, что за счет интенсификации переходных процессов тепловые потери в двигателе снижаются при обработке каждого перемещения.

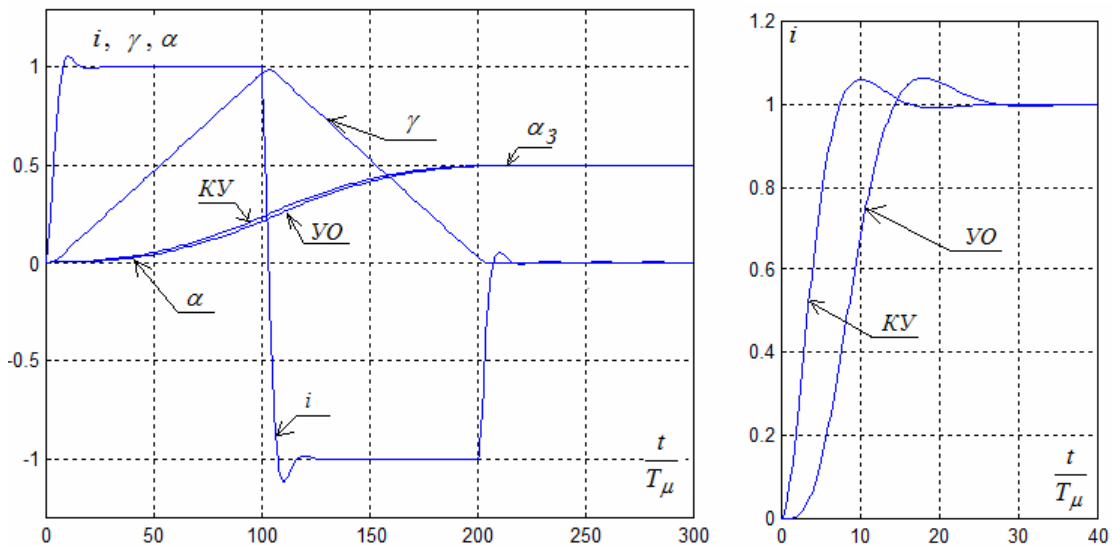


Рисунок 4 – Графики переходных процессов в СРП
(КУ – комбинированное управление; УО - управление по отклонению)

Выводы

1. Уменьшение времени t_c первого согласования тока с установившимся значением приводит к уменьшению времени t_p отработки заданного перемещения при неизменном ускорении привода и может быть использовано для повышения производительности позиционных механизмов и стана в целом.

2. При неизменном быстродействии привода (одинаковой величине t_p) уменьшение времени t_c способствует снижению количества тепла, выделяемого в обмотке якоря двигателя. За счет этого уменьшается нагрев двигателя и повышается надежность его работы.

Список литературы

1. Ильинский Н.Ф. Электропривод в современном мире / Н.Ф. Ильинский // Сб. тр. V Международной конференции по автоматизированному электроприводу. – С.-Петербург, 2007. – С.17-19.
2. Кожевников К.И. Диаграмма тока двигателя вспомогательных механизмов прокатных станов / К. И. Кожевников // Электричество. – 1956. - № 6. - С.15–21.
3. Петров Ю. П. Оптимальное управление электроприводом / Ю. П. Петров. - М.: Госэнергоиздат, 1961. – 187 с.
4. Коцегуб П.Х. Система позиционного электропривода с задатчиком положения / П.Х. Коцегуб, О.И. Толочко, Ю.В. Губарь, А.В. Светличный // Известия вузов. Электромеханика. - 1982. - № 3. – С.321–327.
5. Перельмутер В.М. Тиристорные электроприводы прокатных станов / В. М. Перельмутер. - М.: Металлургия, 1978. – 152 с.
6. Тягунов В. А. Режимы прокатки на реверсивных станах / В.А.Тягунов. - Свердловск: Metallurgizdat, 1954. – 136 с.

Ю. В. Губарь

Донецький національний технічний університет

Моделювання перехідних процесів і підвищення ефективності позиційних механізмів по динамічним і енергетичним показникам. Розглянуті актуальні питання впливу інтенсифікації перехідних процесів позиційних механізмів прокатного стану, які працюють у пуско-гальмових режимах, на нагрівання двигуна та швидкодію електропривода. У середовищі Matlab+Simulink проведено математичне моделювання позиційних систем з комбінованим керуванням, яке підтвердело їхні високі динамічні і енергетичні показники та доцільність використання на практиці.
позиційний електропривод, двигун, прокатний стан, перехідний процес, нагрів

Y.V.Gubar

Donetsk National Technical University

Simulation of Transients and Increasing of Effectivity of Positional Mechanisms According to Dynamic and Energetic Processes. The actual questions of the effect of the intensification of the rolling mill positional mechanisms' transients which operate in pre-braking mode are described. The mathematical modeling of positional systems with combined control on input effect is done in an environment Matlab + Simulink. Results confirm their high dynamic and energetic performance and usefulness in practice.
stepping actuator, motor, rolling mill, transition process, heating