

*В.В. Попов, А.С. Мных, кандидаты техн. наук,  
М.Ю. Пазюк, Ю.Г. Качан, д-ра техн. наук, А.Ю. Коростовская  
(Украина, Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия)*

## ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДУГОВЫМИ ПЕЧАМИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВОЙНОЙ ШКАЛЫ ВРЕМЕНИ

**Введение.** Известно [1], что процессы плавок в дуговых печах черной и цветной металлургии характеризуются значительной дисперсией удельных энергетических характеристик процессов. Эта особенность низкотемпературных плазменных процессов вызвана значительной трудностью управления [1, 2] и, соответственно, особенностями синтеза алгоритмов управления такими процессами [3].

**Постановка задачи.** Целью данной работы является разработка алгоритмов управления дуговыми процессами печей черной и цветной металлургии для улучшения их удельных энергетических показателей.

**Основная часть исследований.** Вопрос энергосбережения при протекании дуговых процессов указанных объектов возможно решить путем совершенствования алгоритмов управления, повышения эффективности использования ресурсов вычислительной техники. В результате исследований [3], авторами было установлено, что дуговые плазменные процессы печей черной и цветной металлургии имеют две основные составляющие: определяющиеся протеканием физико-химических процессов в расплаве полезного продукта (медленные процессы) и изменением проводимости расплава (быстрые процессы). В автоматизируемом технологическом процессе управления электрическим режимом дуговой печи выделяются различные по показателям инерционности (т.е. разнотемповые) составляющие субпроцессы. Рассмотрим эти составляющие с точки зрения теории двушкальных систем управления [4–6]. Система управления дуговым процессом в терминах двушкальных систем (ДШС) изображена на рис. 1.

Модель дугового процесса представим в виде модели дискретного процесса в пространстве состояний

$$x[s+1] = A \cdot x[s] + B \cdot u[s] + C \cdot f[s] \quad (1)$$

В  $n$ -мерном векторе состояний  $x[s]$  выделяются блоки  $x_1[s]$  (медленная составляющая) и  $x_2[s]$  (быстрая составляющая) размерности  $n_1$  и  $n_2$  соответственно. Эти блоки имеют существенные различия в инерционности. В уравнении (1)  $u[s]$  –  $r$ -мерный вектор управляющих воздействий, которые действуют одновременно на оба субвектора  $x_1[s]^T$  и  $x_2[s]^T$ ,  $f[s]$  –  $m$ -мерный вектор возмущающих воздействий;  $s$  – такты дискретного времени.

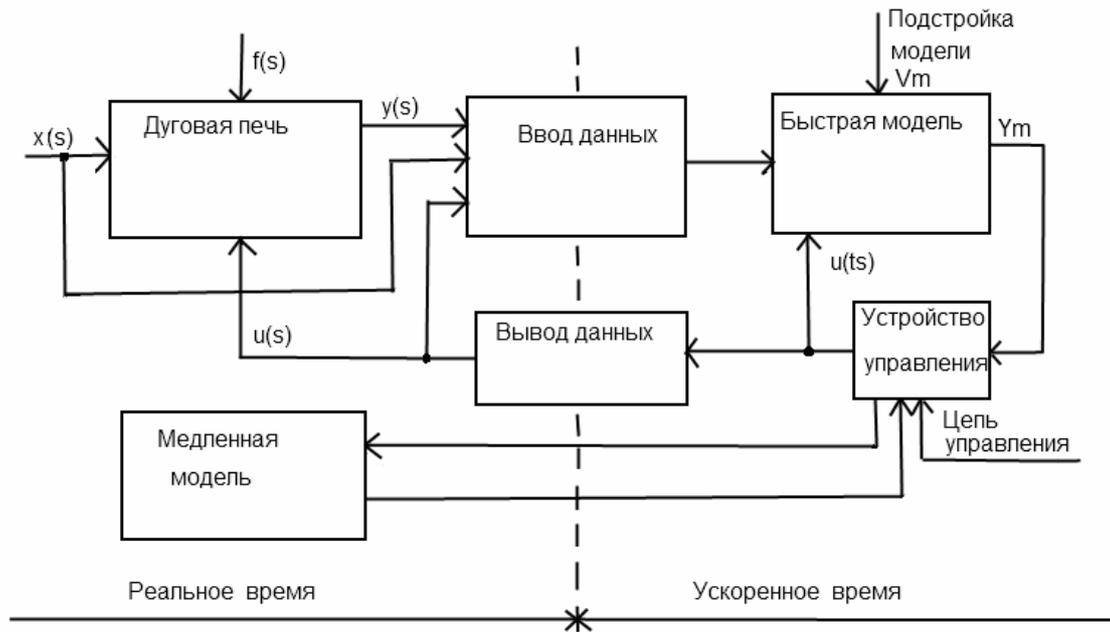


Рис. 1. Двухкальная система управления электродуговой печью

На рис. 1 используются следующие обозначения:

- $x(s)$  – контролируемые возмущения (параметры электрического режима, загрузка шихты, ввод характеристик шихты);
- $y(s)$  – выходные параметры (температура расплава, химический состав расплава);
- $u(s)$  – управляющие воздействия (переключение ступеней печного трансформатора, управление приводом электродов, подача информации оператору о вскипании расплава или о степени готовности расплава);
- $f(s)$  – неконтролируемые воздействия (обвал шихты в печи, внеплановое отключение);
- $y_m$  – вектор выходных величин модели (отклонение параметров электрического от прогнозных значений);
- $v_m$  – вектор настроек модели (паспортные параметры печного агрегата);
- $u(ts)$  – вектор прогнозных значений управляющих воздействий для коррекции модели.

Для описания медленной и быстрой составляющих введем два различных интервала дискретизации непрерывного времени:

$$dt = m * \Delta t, \quad m \ll 1, \quad (2)$$

где  $\delta t$  – дискретный интервал «быстрой» модели;  $\mu$  – масштабный коэффициент;  $\Delta t$  – дискретный интервал «медленной» модели.

На шкале «медленного» времени установим дискретность  $\Delta t$ , и такты  $s = 0, 1, \dots, n$  будут отсчитываться с этой дискретностью. На шкале «быстрого» времени будет установлена дискретность в соответствии с условием (2). Между тактами  $(s-1)$  и  $s$  введем шкалу «быстрого» времени, такты которой  $\tau = 1, \dots,$

$\Delta t/\delta t$  отсчитываются с дискретностью  $\delta t$ . В шкале «медленного» времени заменим «быструю» составляющую статической моделью, не содержащей инерционности с целью снижения размерности до  $n_1 < n$ .

Расчет динамики «быстрой» составляющей выполняется в предположении, что между  $s-1$ -м и  $s$ -м тактами «медленная» составляющая не изменяется и соответствует значению  $x_1[s-1]$ , а размерность управления «быстрым» процессом снижается до  $n_2 < n$  [4].

Для рассмотрения субпроцессов ДШС дуговой печи был выбран процесс производства нормального электрокорунда. Для анализа был использован метод определения химического состава расплава по определяющему компоненту в зависимости от вектора контролируемых параметров электрического режима печи [3]. В результате были получены корреляционные зависимости содержания двуокиси титана  $TiO_2$  в расплаве электрокорунда от параметров электрического режима печи по ходу плавки. Анализ динамики изменения концентрации двуокиси титана (рис. 2) показал, что для эффективного контроля протекания процесса не обходимо, чтобы интервал  $\Delta t = 1$  мин. Расчет показателей «медленной» модели осуществляет устройство управления (рис. 1). Процесс плавки продолжается до достижения концентрации  $TiO_2 = 2,4\%$ . В этот момент происходит выпуск расплава электрокорунда.

«Быстрый» субпроцесс рассмотрим в соответствии с работой [3]. Основная гармоника тока в дуговой печи определяется выражением [1]

$$I_e = \frac{1}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}} [U_m \sin(\omega t - j) - U_\delta \sin(\omega t - f - j)] , \quad (3)$$

где  $\varphi$  – фазовый угол сдвига между основными гармониками тока и напряжения;  $f$  – фазовый угол сдвига между напряжением сети и напряжением дуги (угол зажигания дуги);  $U_m$  – амплитуда фазного напряжения.

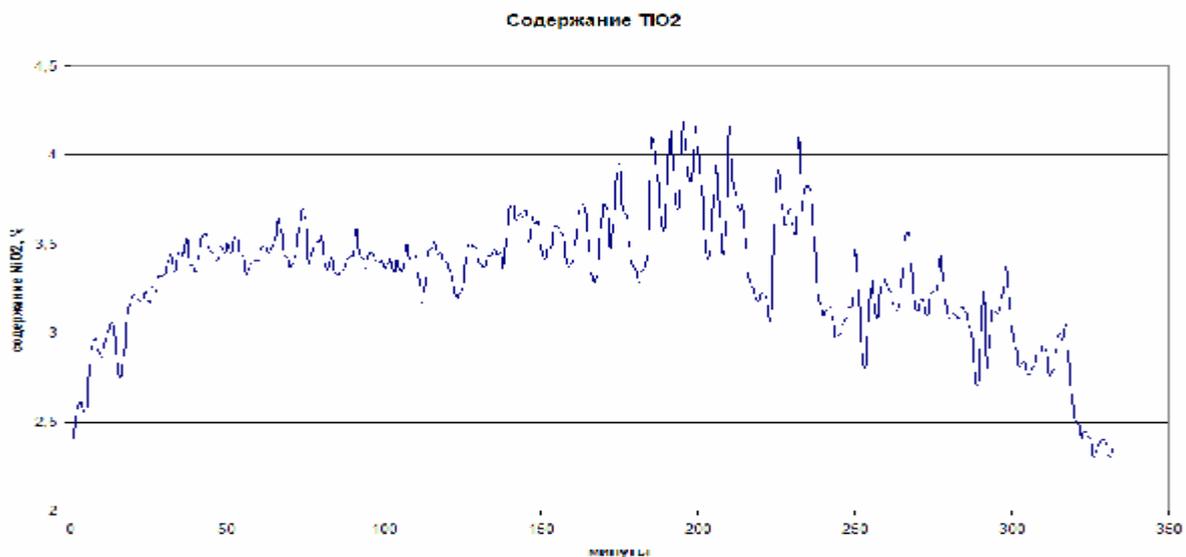


Рис. 2. Динамика изменения концентрации двуокиси титана

Этот угол определяется параметрами  $r$  и  $L$  печной установки, т.е.

$$j_1 = \operatorname{arctg} \frac{wL}{r},$$

где  $r$  и  $L$  – соответственно активное и реактивное сопротивление печного агрегата.

Управление «быстрым» субпроцессом осуществляется с учетом следующего критерия  $J$  [8, 9]:

$$J = \sum (f_{\text{расч}} - f_{\text{прогн}})^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где  $f_{\text{расч}}$  – определяемое на основе параметров электрического режима значение угла зажигания дуги.

$$f_{\text{расч}} = \operatorname{arctg} g - \arcsin \left[ \frac{2}{3} b \sqrt{1 - g^2} \frac{(1 - e^{-2p/3g})(1 + e^{-p/3g})}{1 + e^{-p/g}} \right]. \quad (5)$$

Здесь  $g = \frac{wL}{r}$ ;  $b = \frac{U_\delta}{U_m}$ ;  $U_\delta$  – амплитуда напряжения дуги,

$$U_\delta = \sqrt{U_m^2 - (I_e \cdot wL)^2} - I_e \cdot r. \quad (6)$$

В выражении (4)  $f_{\text{прогн}}$  определяется по формуле (5) при значении согласно работе [1]:

$$b_{\text{прогн}} = 1,5 \cdot g / \left\{ \left[ (1 + g^2) \frac{(1 - e^{-2p/3g})(1 + e^{-p/3g})}{1 + e^{-p/g}} + 1 \right]^2 + g^2 \right\}^{0,5}, \quad (7)$$

соответствующему минимальному удельному расходу электроэнергии.

На рис. 3 и 4 приведены примеры протекания «быстрого» субпроцесса контроля угла зажигания дуги и результаты плавки 57-2 и 63-2. Плавка 57-2 протекает с минимальным расхождением между углами  $f_{\text{прогн}}$  и  $f_{\text{расч}}$ , удельный расход электроэнергии – 1981 кВт·ч/т. Плавка 63-2 протекает со значительным расхождением между углами  $f_{\text{прогн}}$  и  $f_{\text{расч}}$ , удельный расход электроэнергии – 2237 кВт·ч/т.

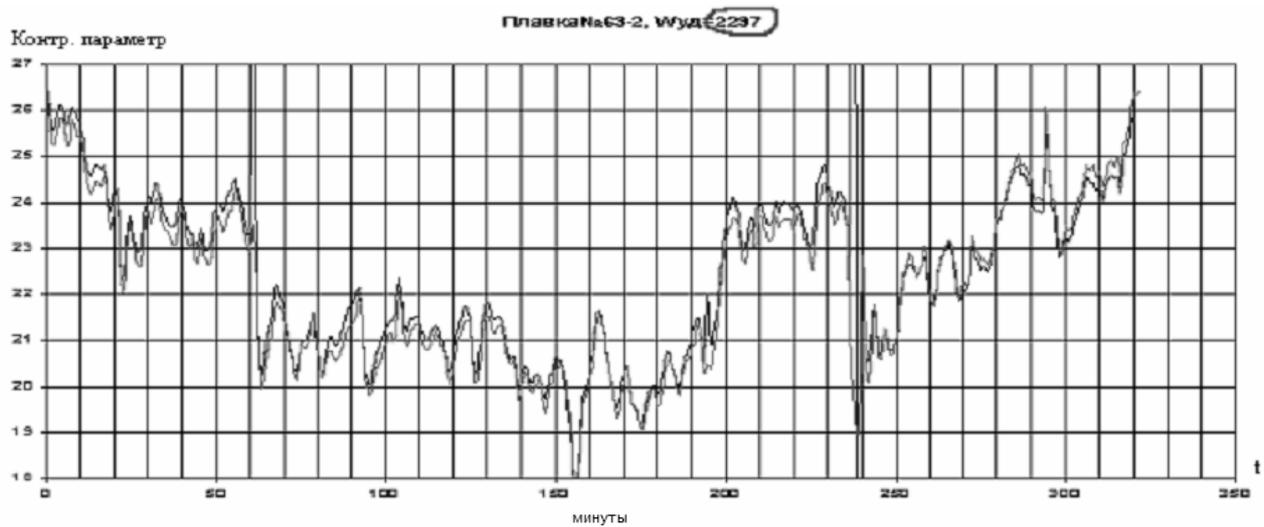


Рис. 3. Работа «быстрого» субпроцесса

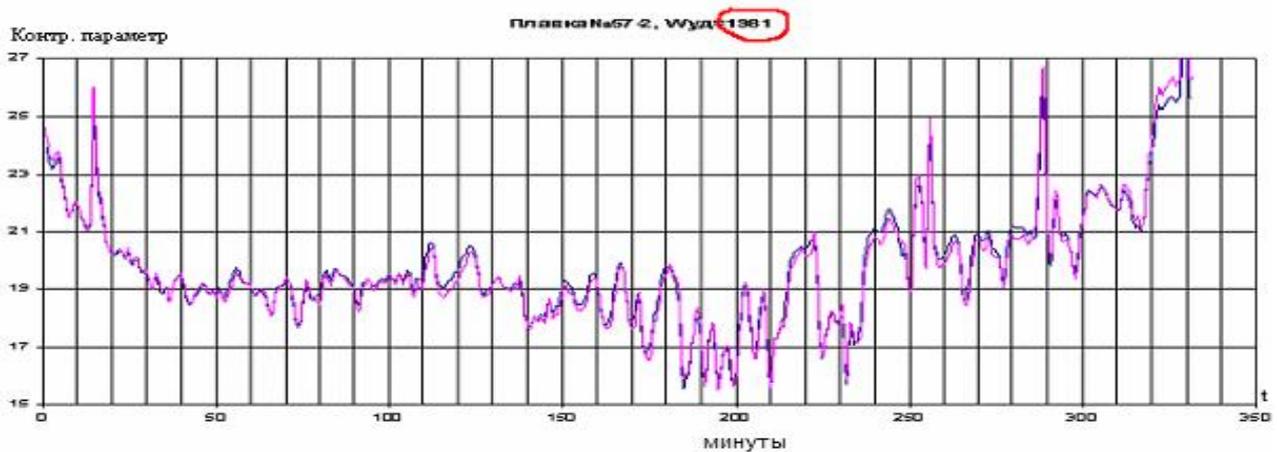


Рис. 4. Работа «быстрого» субпроцесса

При расчете управляющих воздействий в «быстром» субпроцессе экспериментально установлено, что величина  $\delta t = 1$  с (для ферросплавных печей) и  $\delta t = 0,2$  с (для сталеплавильных печей). «Быстрая» модель расчета угла зажигания дуги (рис.1) и устройство управления работают в режиме периодического решения задачи управления в «быстром» масштабе времени. Найденный, с учетом будущего поведения дуговой печи, угол зажигания дуги (в соответствии с уравнением (4)), передается в блок вывода для управления приводом электродов [10].

Следует отметить, что ДШС способны работать с заведомо неточными моделями. Это позволяет применять модели не выше второго порядка для объектов высокого порядка.

## Выводы

Предложен алгоритм управления дуговыми печами черной и цветной металлургии с использованием метода двушкальных систем управления. Показано, что использование приведенного метода позволяет значительно снизить удельный расход электроэнергии в дуговых металлургических печах.

## Список литературы

1. Ефроймович Ю.Е. Электрические режимы дуговых сталеплавильных печей. – М.: Изд-во черной и цветной металлургии, 1956. – 139 с.
2. Перельман И.И. Оперативная идентификация объектов управления. – М.: Энергия, 1982. – 272 с.
3. Попов В.В., Мных А.С. Результаты испытаний имитационной модели системы терминального управления рудотермическими печами // Тез. докл. – Междунар. науч.-техн. конф. «Университетская наука – 2007» – Мариуполь, 2007.
4. Крушель Е.Г., Степаненко О.В. Синтез и моделирование цифровых управляющих систем с двойной шкалой времени. – М.: Машиностроение, 1996. – 96 с.
5. Анфилатов В.С., Емельянов А.А., Кукушкин А.А. Системный анализ в управлении. – М.: Финансы и статистика. – 2002. – 386 с.
6. Александровский Н.М., Егоров С.В., Кузин Р.Е. Адаптивные системы автоматического управления сложными технологическими процессами. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
7. Мних А.С., Качан Ю.Г., Попов В.В. Визначення зони термінальної множини в задачі управління процесом вироблення нормального електрокорунду // Наук. вісн. Нац. гірн. ун-ту. – 2008. – №4. – 13–18.
8. Патент на корисну модель №21812 Україна. Спосіб контролю плавки в електродуговій печі / В.В. Попов // Відкриття винаходу. – 2007. – №4.
9. Патент на корисну модель №23682 Україна. Пристрій для контролю плавки в електродуговій печі / В.В. Попов // Відкриття винаходу. – 2007. – №8.
10. Мных А.С., Попов В.В., Пазюк М.Ю. Реализация энергосберегающей автоматизированной системы контроля и управления электрическим режимом процесса получения нормального электрокорунда на базе Трейс Моуд 5. // Тр. ЗГИА. Сер. Металлургия. – 2007. – Вып. 16. – С. 148–151.