

С.В. ЕНДИЯРОВ,  
С.Ю. ПЕТРУШЕНКО

**Использование нейронной сети для  
поиска оптимальной стратегии  
управления**

УДК 004.89, 519.2, 519.85

Уральский  
государственный горный  
университет, г. Екате-  
ринбург

*Для эффективного управления процессом агломерации железных руд необходимо производить поиск управляющих воздействий по средствам, которых возможно стабилизировать качественные показатели агломерата. Для этого в статье рассматривается алгоритм, позволяющий на основе прогнозной модели содержания закиси железа в агломерате, построенной на основе нечеткой нейронной сети, находить оптимальные управляющие воздействия с целью стабилизации качественных показателей агломерата.*

Многолетняя практика показала, что окускование пылеватых руд и концентратов путем спекания и получения офлюсованного агломерата обеспечило значительное снижение удельного расхода кокса на выплавку чугуна и увеличение производительности доменных печей. Это произошло благодаря тому, что по качеству офлюсованный агломерат не уступает кусковой руде. Сложность проблемы производства высококачественного агломерата заключается в том, что условия для получения тех или иных свойств агломерата часто оказываются противоположными. Кроме того, стремление достичь максимальной производительности агломерационных машин также часто не соответствует условиям получения агломерата высокого качества [1]. Процесс производства агломерата протекает в условиях возмущающих воздействий: изменения химико-минералогического и зернового состава компонентов спекаемой шихты, условий дозирования, транспортирования, смешения и увлажнения шихты, а также укладки шихты на агломерационную

машину. Наличие рециклов, длительного времени запаздывания между опробованиями приводит к тому, что управление, основанное на опыте и знаниях персонала, не позволяет достигнуть эффективной работы комплекса производства агломерата.

Вследствие существенного запаздывания информации о химическом составе компонентов шихты рационально использовать прогнозирование основных качественных показателей агломерата для оперативной выработки управляющих воздействий.

Полагаем, что модель нечетко-нейронной сети для прогноза качественных показателей агломерата была построена на основе данных процесса. На основе данной модели будем осуществлять поиск оптимальных управляющих воздействий.

Предположим, что нечетко-нейронная сеть, построенная на основе нечеткой базы знаний, осуществляет отображение вида:

$$\hat{Z} = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(X^T) \quad (1)$$

где  $X^T$  – есть вектор входных переменных, а  $f(\square)$  – некоторая нелинейная функция (нечеткая база знаний), построенная на основе экспериментальных данных о входах  $X^T$  и выходах  $Z$ . Полагаем, что при количестве наблюдений  $N \leq \infty$ , модель (1) адекватно отражает функционирование объекта, поэтому эта модель может быть использована для поиска управляющих воздействий.

Первым этапом является решение задачи нелинейной оптимизации вида:

$$F(\Omega) = (f(X^T) - Z)^2 = (\hat{Z} - Z)^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $Z$  – заданное значение, а  $\Omega = [X^T \ Z]$  – вектор всех входных параметров функции  $F(\square)$ . Вектор переменных  $X^T$  можно записать следующим образом:

$$X^T = [x_j, x_{j+1}, \dots, x_g | \check{x}_{g+1}, \dots, \check{x}_n] \quad (3)$$

где  $\check{x}_{g+1}, \dots, \check{x}_n$  – переменные подлежащие выбору. При этом вводятся следующие ограничения:

$$\begin{aligned} \check{x}_1^{\min} &\leq \check{x}_1 \leq \check{x}_1^{\max} \\ &\dots \\ \check{x}_n^{\min} &\leq \check{x}_n \leq \check{x}_n^{\max} \end{aligned} \quad (4)$$

Результатом решения данной задачи будет вектор  $\dot{X}^T$ :

$$\dot{X}^T = [x_j, x_{j+1}, \dots, x_g | \dot{\check{x}}_{g+1}, \dots, \dot{\check{x}}_n] \quad (5)$$

Предположим, что вектор  $\dot{X}^T$  содержит переменные, которые не могут быть непосредственно изменены, тогда необходимо решать вторую оптимизационную задачу с целью поиска оптимальных управляющих воздействий.

При этом связь между  $X^T$  и вектором управляющих воздействий  $H^T = [h_1, \dots, h_p]$  считается известной:

$$x_j = f^j(x_1, \dots, x_n, h_1, \dots, h_p) = f^j(X^T, H^T) \quad (6)$$

Тогда необходимо решить следующую задачу:

$$F(\Omega) = \sum_{j=1}^m \frac{(\dot{x}_j - x_j)^2}{\sigma_j^2} = \sum_{j=1}^m \frac{(\dot{x}_j - f^j(X^T, H^T))^2}{\sigma_j^2} \rightarrow \min \quad (7)$$

Вектор управляющих воздействий  $H^T$  можно записать следующим образом:

$$H^T = [h_j, \dots, h_g | \check{h}_{g+1}, \dots, \check{h}_p] \quad (8)$$

где  $\check{h}_{g+1}, \dots, \check{h}_p$  – переменные подлежащие выбору.

При этом вводятся следующие ограничения на управляющие воздействия подлежащие выбору:

$$\begin{aligned} \check{h}_j &\geq \delta h_j \\ |\check{h}_j - h_j^T| &\geq \delta h_j \end{aligned} \quad (9)$$

где  $h_j^T$  – текущее значение  $j$  управляющего воздействия, а  $\delta h_j$  – минимально возможное по величине управляющее воздействие, обусловленное возможностями оборудования.

Проиллюстрируем предложенную методику на примере нечеткой базы знаний построенной для прогнозирования содержания FeO агломерата. Для этого случая выражение (2) примет вид:

$$F(\Omega) = (f(C^{\text{III}}, FeO^{\text{III}}, FeO_{t-\tau}^A, M^{\text{III}}) - FeO_3^A)^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

где  $C^{\text{III}}, FeO^{\text{III}}, M^{\text{III}}$  – содержание углерода, FeO шихты и основность шихты, а  $FeO_{t-\tau}^A$  – химический анализ агломерата.

Вектор переменных  $X^T$  можно записать следующим образом:

$$X^T = [FeO_{t-\tau}^A | \check{C}^{\text{III}}, \check{M}^{\text{III}}, \check{FeO}^{\text{III}}] \quad (11)$$

Тогда ограничения на переменные можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} C_{\text{III}}^{\min} &\leq \check{C}^{\text{III}} \leq C_{\text{III}}^{\max} \\ M_{\text{III}}^{\min} &\leq \check{M}^{\text{III}} \leq M_{\text{III}}^{\max} \\ FeO_{\text{III}}^{\min} &\leq \check{FeO}^{\text{III}} \leq FeO_{\text{III}}^{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

Соответствующие значения для верхних и нижних границ могут быть получены на основе знаний об объекте управления или же при помощи статистического анализа.

Тогда задача (7) запишется следующим образом:

$$F(\Omega) = \frac{1}{\sigma_C^2} (\check{C}^{\text{III}} - f^{C^{\text{III}}}(X^T, H^T))^2 + \frac{1}{\sigma_M^2} (\check{M}^{\text{III}} - f^{M^{\text{III}}}(X^T, H^T))^2 + \frac{1}{\sigma_{FeO}^2} (\check{FeO}^{\text{III}} - f^{FeO^{\text{III}}}(X^T, H^T))^2 \rightarrow \min \quad (13)$$

Функции  $f^{C^{\text{III}}}$ ,  $f^{FeO^{\text{III}}}$  имеют следующий вид:

$$f^{C^{\text{III}}} = \frac{\sum_{j=1}^g C_j^{\text{III}} Q_j}{\sum_{j=1}^k Q_j} \quad (14)$$

$$f^{FeO^{\text{III}}} = \frac{\sum_{j=1}^f FeO_j^{\text{III}} Q_j}{\sum_{j=1}^k Q_j}$$

А функция  $f^{M^{\text{III}}}$  вычисляется по формуле:

$$f^{M^{\text{III}}} = \frac{\sum_{i=1}^K Q_j^i \cdot \left( \frac{1 - W_j^i}{100} \right) \cdot \frac{CaO_j^i}{100}}{\sum_{i=1}^K Q_j^i \cdot \left( \frac{1 - W_j^i}{100} \right) \cdot \frac{SiO_2^i}{100}} \quad (15)$$

где  $i = 1, \dots, N$  – порядковый номер компонента шихты (включая все возвратные продукты);  $Q_j^i$  – весовые расходы компонентов шихты, т/ч;  $W_j^i$  – влажность в  $i$ -м компоненте шихты, %;  $CaO_j^i$  – содержание  $CaO$  в  $i$ -м компоненте шихты, %;  $SiO_2^i$  – содержание  $SiO_2$  в  $i$ -м компоненте шихты, %.

При этом вектор  $H^T$  может быть представлен следующим образом:

$$H^T = [Q_B | \check{Q}_P, \check{Q}_K, \check{Q}_\Phi] \quad (16)$$

На управляющие воздействия вводятся следующие ограничения:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_P &\geq \delta Q_P, \dot{Q}_K &\geq \delta Q_K, \dot{Q}_\Phi &\geq \delta Q_\Phi \\ \left| \dot{Q}_P - Q_P^T \right| &\geq \delta Q_P, \left| \dot{Q}_K - Q_K^T \right| &\geq \delta Q_K, \left| \dot{Q}_\Phi - Q_\Phi^T \right| &\geq \delta Q_\Phi \end{aligned} \quad (17)$$

где  $\delta Q_j$  – минимально возможная величина, на которую возможно изменить расход  $j$  компонента.

Представленный алгоритм был включен в виде модуля в экспертную систему диагностики процесса агломерации железных руд. На рис. 1 представлена вкладка программы, позволяющая расчи-

тивать управляющие воздействия на основе прогнозной модели FeO.

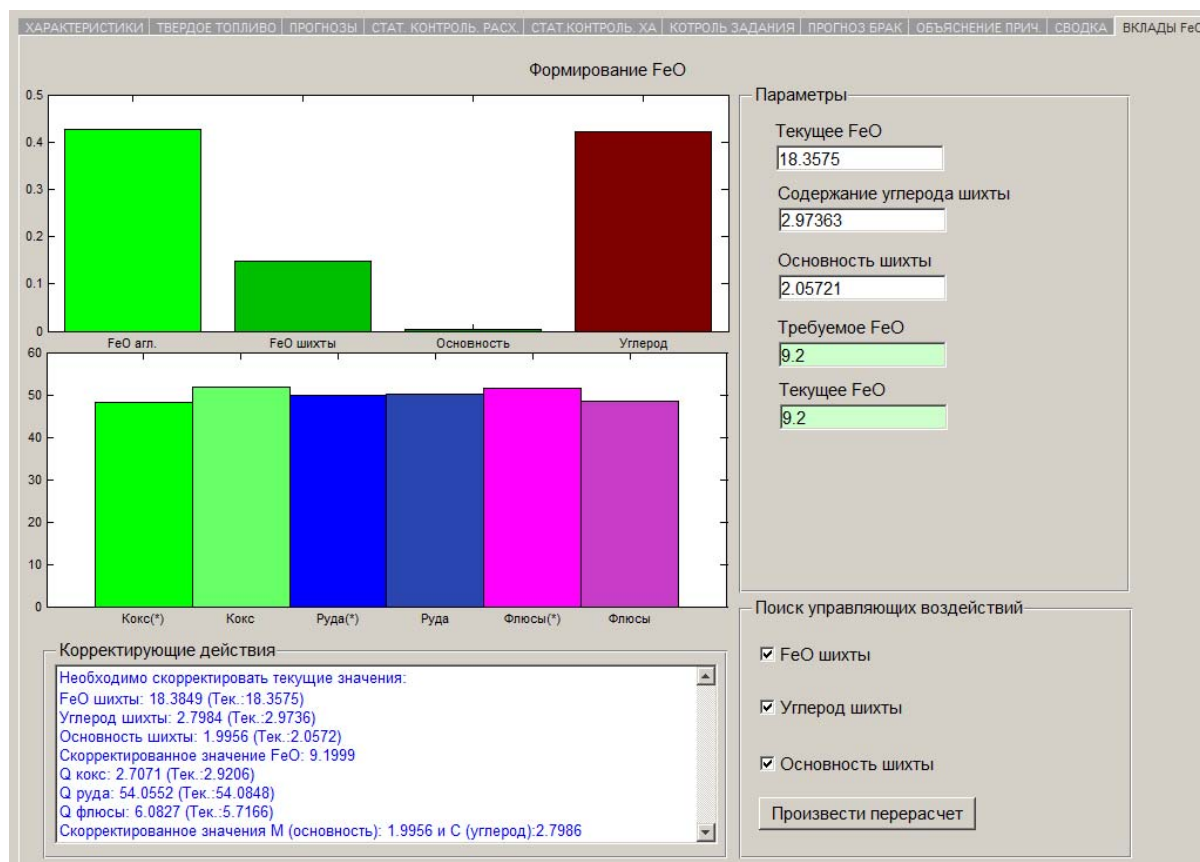


Рис.1. Форма расчета оптимальных управляющих воздействий на примере содержания FeO в агломерате

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет производить поиск оптимальных управляющих воздействий на основе нечеткой-нейронной сети для увеличения эффективности управления процессом агломерации железных руд.

## Литература

1. *Ендияров С.В., Петрушенко С.Ю.* Разработка оптимальной системы управления и диагностики сложного технологического комплекса (на примере процесса агломерации железных руд) // Алгоритмы, методы и системы обработки данных. 2012. № 19. С. 40-53.

E-MAIL: ENDEYAROV@OLYMPUS.RU

E-MAIL: VETRODUB@GMAIL.COM