

Список літератури

1. **Кожев, Х.Х.** Способы управления качеством руд при подземной добыче / **Х.Х. Кожев, Г.Н. Хугаева** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. – №4. – С. 210–214.
2. Основы аналитической химии. В 2 кн. - Кн. 2. Методы химического анализа: Учеб. для вузов / **Ю.А. Золотов** и др.]. Под редакцией академика Ю.А. Золотова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 494 с.
3. Аналитическая химия. Проблемы и подходы. В 2-х т. **Р. Кельнер, Ж. М. Мерме, М. Отто, Г. М. Видмер.** Перевод под редакцией академика Ю. А. Золотова. – М.: Мир, 2004. Т.1. – 600 с.
4. **Харитонов Ю.Я.** Аналитическая химия. Аналитика. В 2-х кн. / **Ю.Я. Харитонов** – М.: Высшая школа, 2001. - Кн.1. – 615 с.
5. **Кожев Х.Х.** Способы управления качеством руд при подземной добыче / **Х.Х. Кожев, Г.Н. Хугаева** // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2010. – №4. – С. 210–214.
6. **Марюта А.Н.** Контроль качества минерального сырья / **А.Н. Марюта, П.К., Младецкий, П.А. Новицкий.** – Київ : Техніка, 1976. – 220 с.
7. Пат. №121880 Україна, G01V 3/28. Пристрій для магнітного каротажу геофізичних свердловин / [**А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, В.В. Дрига, Д.Ю. Мірошник та ін.**]; заявл.07.04.17; опубл. 26.12.2017; Бюл. №24.
8. **Дрыга В.В.** Непрерывный контроль качества магнетитовых руд наленточных конвейерах в условиях горно-обогатительных комбинатов / **В.В. Дрыга** /Дисс. к.т.н., Кривой Рог, 2013. – 233 с.
9. **Гриценко А.Н.** Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах / **А.А. Азарян, А.А. Трачук, А.Н. Гриценко, Д.В. Швец** // Центрально-український науковий вісник. Технічні науки, 2019. - №1. – С. 138-145.
10. **Gritsenko A.** Research of opportunities for increasing control accuracy of femag content in blastholes// **A. Azaryan, A. Trachuk, D. Shvets, A. Gritsenko**// 14-th international conference “Science and society”: Hamilton, Canada, 20 september 2019 // Materials conference Hamilton – 2019 - pp. 4-9.

Рукопис поано до редакції 17.03.22

УДК 004.451.25: [622.788:621.867]

В.Й. ЛОБОВ, Л.І. ЄФІМЕНКО, М.П. ТИХАНСЬКИЙ, кандидати техн. наук, доц.,
А.М. ТИХАНСЬКА, асистент, Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ КЕРУВАННЯ ТЕРМІЧНИМ ОБРОБЛЕННЯМ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОТУНІВ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Мета. Метою цієї роботи є підвищення якості термічного оброблення залізорудних котунів та ефективності роботи виробництва за рахунок розробки нових більш точних способів управління регламентними параметрами технологічних зон, враховуючи вплив на них сусідніх зон.

Методи дослідження. В роботі використані методи знаходження оптимальних рішень на основі математичного моделювання, методи системного аналізу, теорії оптимальних рішень, а також методи досліджень розроблені в теорії автоматичного керування; методи обробки випадкових процесів і математичної статистики, аналіз літературних і патентних джерел, наукове узагальнення раніше виконаних досліджень.

Наукова новизна. Пропонуються нові більш точні способи керування термічним обробленням залізорудних котунів за допомогою нейронної мережі. На основі аналізу існуючих способів управління процесом термічної обробки залізорудних котунів на машині конвеєрного типу обґрунтовано необхідність розробки нових більш точних способів управління регламентними параметрами технологічних зон, враховуючи вплив на них сусідніх зон.

Досліджено можливість підтримки регламентних параметрів технологічних зон з використанням технологій штучних нейронних мереж. При цьому керування відбувається за рахунок визначеної у роботі структури штучної нейронної мережі для технологічної зони, яка враховує взаємозв'язок з сусідніми зонами, фізико-хімічні властивості котунів і швидкість переміщення візків конвеєрної стрічки протягом технологічної зони.

Практична значимість. Виконано комп'ютерне моделювання технологічної першої зони сушіння котунів, яка взаємопов'язана з другою зоною сушіння і зоною охолодження, що дозволило створити модель системи, яка забезпечила стабілізацію температури верхнього шару котунів у першій зоні сушіння на базі нейромережевої адаптації параметрів температури теплоносія газоповітряного потоку.

Запропоновано принципи побудови автоматизованої системи та алгоритми керування термічним обробленням залізорудних котунів за допомогою нейронної мережі, що відрізняються тим, що пропонуються нові більш точні способи управління регламентними параметрами технологічних зон, з врахуванням впливу на них сусідніх зон.

Результати. Керування термічним обробленням залізорудних котунів за допомогою нейронної мережі дозволяє враховувати збурюючі впливи зумовлені регламентними параметрами технологічних зон та підтримувати показники якості управління в заданих межах.

Ключові слова: залізорудні котуни, машина конвеєрного типу, технологічна зона, процес сушіння, нейронна мережа.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У сучасних випалювальних машинах конвеєрного (ВМКТ) типу ОК-306, ОК-1-324/336, LURGI-278А та інших передбачені наступні технологічні зони (ТЗ): сушіння (ЗС), попереднього нагрівання (ЗПН), випалювання (ЗВ), рекуперації (ЗР) та охолодження (ЗО). В залежності від типу ВМКТ, вони мають різну кількість ТЗ і потребують для кожної зони різні регламентні параметри, забезпечуючи якісне оброблення котунів у цих зонах [1, 2].

Більшість існуючих способів і методів автоматизованого керування процесом термічного оброблення котунів на ВМКТ розглядають як незалежне керування окремими технологічними зонами або агрегатами, або локальними процесами. При цьому не враховують одну з головних особливостей технологічних зон - їх взаємозв'язок між собою. Це не дозволяє комплексно врахувати для кожної ТЗ чітку і повну виробничу інформацію. Одночасно, не враховуються більшість зворотних зв'язків (ЗЗ) між технологічними зонами, що приводить до постійних, переважно неконтрольованих коливань якісних та кількісних показників котунів, що обробляються на сусідніх взаємопов'язаних ТЗ. Зазначене вимагає постійного втручання у хід технологічного процесу з метою переналаштування режимних параметрів кожної технологічної зони, тому усунення таких недоліків вимагає подальшого дослідження системних зв'язків і вдосконалення методу узгодженого керування технологічними зонами ВМКТ із застосуванням сучасних підходів на базі штучних нейронних мереж (НМ).

Аналіз досліджень та публікацій. Створенню та модернізації систем керування процесом термічного оброблення котунів на ВМКТ присвячено багато науково-дослідних робіт зарубіжних та вітчизняних вчених [3-5]. При керуванні цим процесом використовуються такі критерії як стабілізація гранулометричного складу сирих котунів при сталій або максимальній продуктивності ВМКТ [6], стабілізація продуктивності агрегату [7], мінімізація витрат енергоспоживання [8], стабілізації ГПП у кожній технологічній зоні [9], та впродовж ВМКТ [10]. Проте дослідники при проведенні досліджень не враховують, що ТЗ, в силу конструктивних особливостей ВМКТ, не є повністю ізольованими і здійснюють взаємний вплив на температурні режими сусідніх технологічних зон, в яких протікають ці процеси. Це приводить до невисокої точності та невідповідності регламентним параметрам ТЗ і, як наслідок виготовлення некондиційних готових котунів.

Іншою альтернативою є способи керування процесом оброблення котунів на ВМКТ шляхом автоматичної стабілізації параметрів температури ГПП у конкретній ТЗ і впровадження у виробництво локальних систем [11-13]. Основними недоліками цих способів керування є потреба враховувати фізико-хімічні параметри котунів, що вже оброблені у попередніх зонах, висота шару котунів на візках КС і швидкість їх переміщення впродовж ТЗ. При таких способах керування виникає суттєва похибка при вимірюваннях, і тому складно забезпечити регламентний температурний режим впродовж усіх ТЗ машини та мінімізувати витрати енергоносіїв.

Метою цієї роботи є підвищення ефективності роботи виробництва за рахунок розробки системи керування, яка враховує фізико-хімічні параметри котунів, що вже оброблені у попередніх технологічних зонах, висота шару котунів на візках КС і швидкість їх переміщення впродовж ТЗ.

Постановка задачі. Існуючим способам керування процесом оброблення котунів на ВМКТ притаманні суттєві недоліки, які полягають в тому, що для забезпечення регламентних параметрів технологічного процесу в ТЗ не враховуються вплив цих параметрів від сусідніх ТЗ і швидкість переміщення візків КС впродовж технологічної зони. Отже існує необхідність розробки нових високоточних способів керування процесом оброблення котунів на ВМКТ. Значення регламентних параметрів технологічної зони таких, як рівень вологи і висоти шару котунів на візках КС, температура теплоносія ГПП, що приходить із попередньої ТЗ, швидкість переміщення візків КС змінюються в значних діапазонах і суттєво впливають на температуру верхнього шару котунів, вологість і висоту шару котунів на виході із ТЗ. Насамперед, вказані регламентні параметри технологічної зони в повному обсязі на виробництві неможливо визначити засобами, що вимірюють, і використати для проведення кореляційного аналізу і подальшого знаходження взаємозв'язків між конкретними ТЗ. Встановити залежності між цими параметрами достатньою важко при математичному опису процесу керування обробленням котунів на ВМКТ.

Проте, розвиток інформаційних технологій дозволяє суттєво підвищити точність визначення регламентних параметрів ТЗ шляхом застосування керування ТП у технологічній зоні штучної нейронної мережі [14, 15].

Викладення матеріалу та результати. Основою автоматизації процесу керування термічним обробленням котунів на ВМКТ є застосування НМ у кожній технологічній зоні. Нейронна мережа виконує автоматизований збір, обробку вимірних характеристик для кожного блоку управління ТЗ і видає на основі прогнозування вхідних даних висновок про її стан. Як показали результати моделювання різних типів НМ, для автоматизації термічного процесу оброблення котунів найбільш зручною є застосування НМ типу Feed-forward distributed time delay (пряма розподілена затримка). Управління ТЗ із прогнозом використовує принцип мінливого обрію. Нейромережева модель керованого технологічного процесу передбачає реакцію управління ТЗ на певному інтервалі часу в майбутньому. Прогнози використовуються програмою чисельної оптимізації для того, щоб обчислити керуючий сигнал, який мінімізує наступний критерій якості управління [14].

Для дослідження взаємозв'язку між взаємопов'язаними ТЗ на ВМКТ у програмі «Simulink» середовища Matlab, використовуючи графічний інтерфейс, створено власну НМ, наприклад, для зони сушіння ЗСІ, так як ВМКТ має дві зони сушіння (ЗСІ і ЗСІІ) з протилежним напрямком подачі теплоносія газоповітряного потоку (ГПП). Це необхідно для забезпечення регламентних параметрів сушіння у шарі котунів на візках конвеєрної стрічки (КС). У ЗСІ теплоносієм газоповітряного потоку із температурою 300-350° подається димососом із зони охолодження ВМКТ і, проходячи через шар котунів, нагріває і підсушує його знизу, а потім викидається в димову трубу. Іншим димососом у ЗСІІ подається теплоносієм газоповітряного потоку із температурою 250÷350 °С із колектора відпрацьованих газів ЗВ. Вторинний теплоносієм із зони охолодження ВМКТ через колектор прямого перетікання з температурою на рівні 700÷800 °С подається у ЗСІІ, а відпрацьовані гази скидаються в димову трубу. Регулюючи подачу і відсмоктування теплоносія ГПП через шар котунів підтримують у ЗСІІ розрідження на рівні 10-50 даПа, а горн ЗСІ працює під розрідження 30÷100 Па.

Для створення НМ на вхід подаємо масиви вхідних даних: $\bar{X} = [\psi_1, H_1, T_{p1}, V_{kv}, \beta]$, а потім вихідних - $\bar{Y} = [T_{sh1}, \psi_2, H_2]$, отриманих із виробничих експериментів. У масивах позначено: ψ_1 - значення вологи котунів на візках КС, %; H_1 - рівень висоти шару сирих котунів на візках КС, мм; T_{p1} - температура теплоносія ГПП, що приходить із ЗОІІ, °С; V_{kv} - швидкість переміщення візків КС, м/с; β - основність сирих котунів; T_{sh1} - температура верхнього шару котунів, що виходять із ТЗ, °С; ψ_2 - вологість котунів на виході із ТЗ, %; H_2 - висота шару котунів на виході із ТЗ, мм.

При визначенні вимог до входів, необхідних для роботи схеми автоматизації ЗСІ, заснованої на НМ, проаналізовані та оброблені експериментальні данні, що отримані із скріншотів працюючих у промислових умовах ВМКТ. Набір вхідних даних, отриманий при дослідженні технологічної зони (вектор стану зони), відображає мінімум, за яким можна визначити її стан. Дані являють собою послідовність числових значень-координат перехідної характеристики (у векторній формі), знятих через певні, рівні проміжки часу в обмеженому діапазоні.

При створенні нейронної мережі Network / Data Manager у командному вікні MATLAB вводимо команду `>> nntool` і задаємо послідовність входів і цілей у робочій області GUI-інтерфейсу, використовуючи вікно Create New Data. Після створення нової НМ для ЗСІ визначено діапазони вхідних параметрів і встановлено кількість нейронів (Number of neurons) першого шару (Layer 1) рівним двом, а решту при створенні мережі залишимо за замовчуванням. Після цього виконано ініціалізацію мережі за допомогою закладки Initialize. Це дозволило відкриття діалогової панелі Network: ЗСІ.

На основі введених даних виконано тренування НМ, яка підлаштована так, що конкретні дані на вході призводять до отримання певних цільових даних на виходах. Після завантаження функції `nntstart`, відкриття діалогової панелі Welcome to Neural networkStart, вибрано пристрої введення-виведення і підгонки кривої - Fitting fpp. У вікні Select Data встановлені вхідні та вихідні дані (vxidі vuxid), що присутні в НМ та зразки, що встановлені у стовбці. У інших вікнах програми встановлюємо: відсотки зразків, які використовуються: для навчання (Training), пере-

вірки (Validation) і тестування (Testing), кількість прихованих нейронів (Number of Hidden Neurons), алгоритм навчання, наприклад, Levenberg - Marquardt (Левенберг-Марквард).

Результат навчання НМ прирізній кількості прихованих нейронів (10, 30 і 50) представлено у файлі Neural Network Training (nntraintool). При цьому 100 % даних розподілено так: на навчання 70 %, перевірку і тестування по 15 %. Результати навчання НМ наведено на рис.1, де якість навчання НМ на обраній навчальній послідовності відображається відповідними графіками. Видно, що до кінця процесу навчання помилка стає дуже малою. Neural Network підтримує різні алгоритми навчання, в тому числі кілька методів градієнтного спуску і сполучених градієнтів, метод Левенберга - Марквардта і пружний алгоритм зворотного поширення (RProp). Графіки після обробки результатів для аналізу якості мережі, що включають середньоквадратичну помилку на валідаційні набори даних для послідовних епох навчання (рис. 1) відповідно для 10, 30 і 50 прихованих нейронів.

Найменша кількість трьох епох досягається при наявності 30 прихованих нейронів. Навчальний стан із навчання нейронної мережі (сюжет) представлено на рис. 1*г,д,е* показує, що найкращі показники відповідають НМ при 30 прихованих нейронах. Слід зазначити, що в даному випадку точність апроксимації заданої функції вийшла не дуже високою - максимальна абсолютна похибка становить 0.055, відносна - 5.5%, у чому можна переконаватися, переглянувши значення помилок (ZCI_errors) або виходів (ZCI_outputs) мережі.

Зауважимо, що точність апроксимації тут можна було б підвищити, конструюючи мережу з великим числом нейронів, але при цьому необхідна і більш велика навчальна вибірка. Гістограми похибки, що представлені на рис. 2*а,б,в* показали, що найменша похибка для етапів навчання, валідації та тестування досягається при 30 прихованих нейронах.

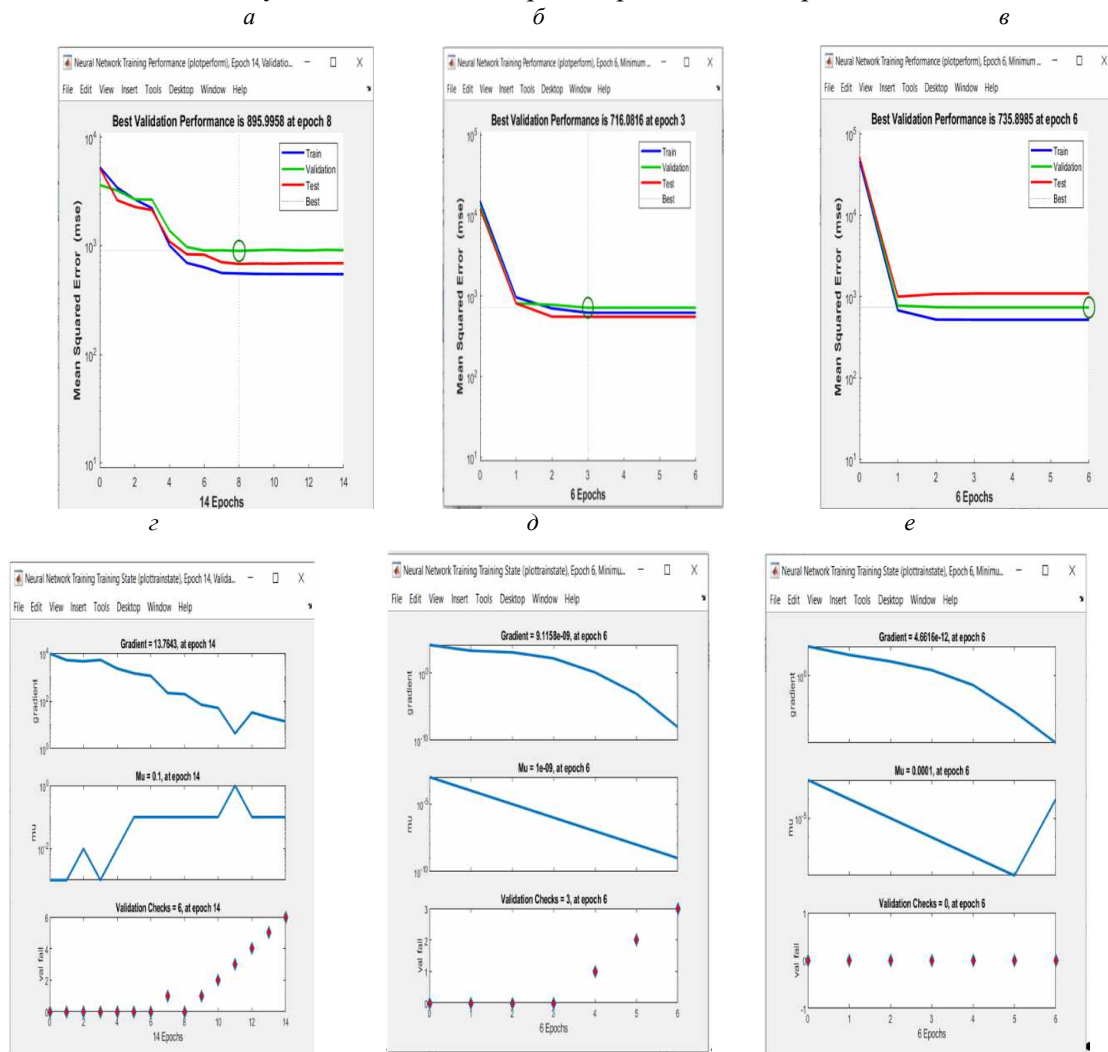


Рис. 1. Результати навчання: *а,б,в* – зміна помилки мережі в процесі навчання; *г,д,е* - навчальний стан із навчання нейронної мережі (сюжет); *а,г* - для 10; *б,д* - 30; *в,е* - для 50 прихованих нейронів

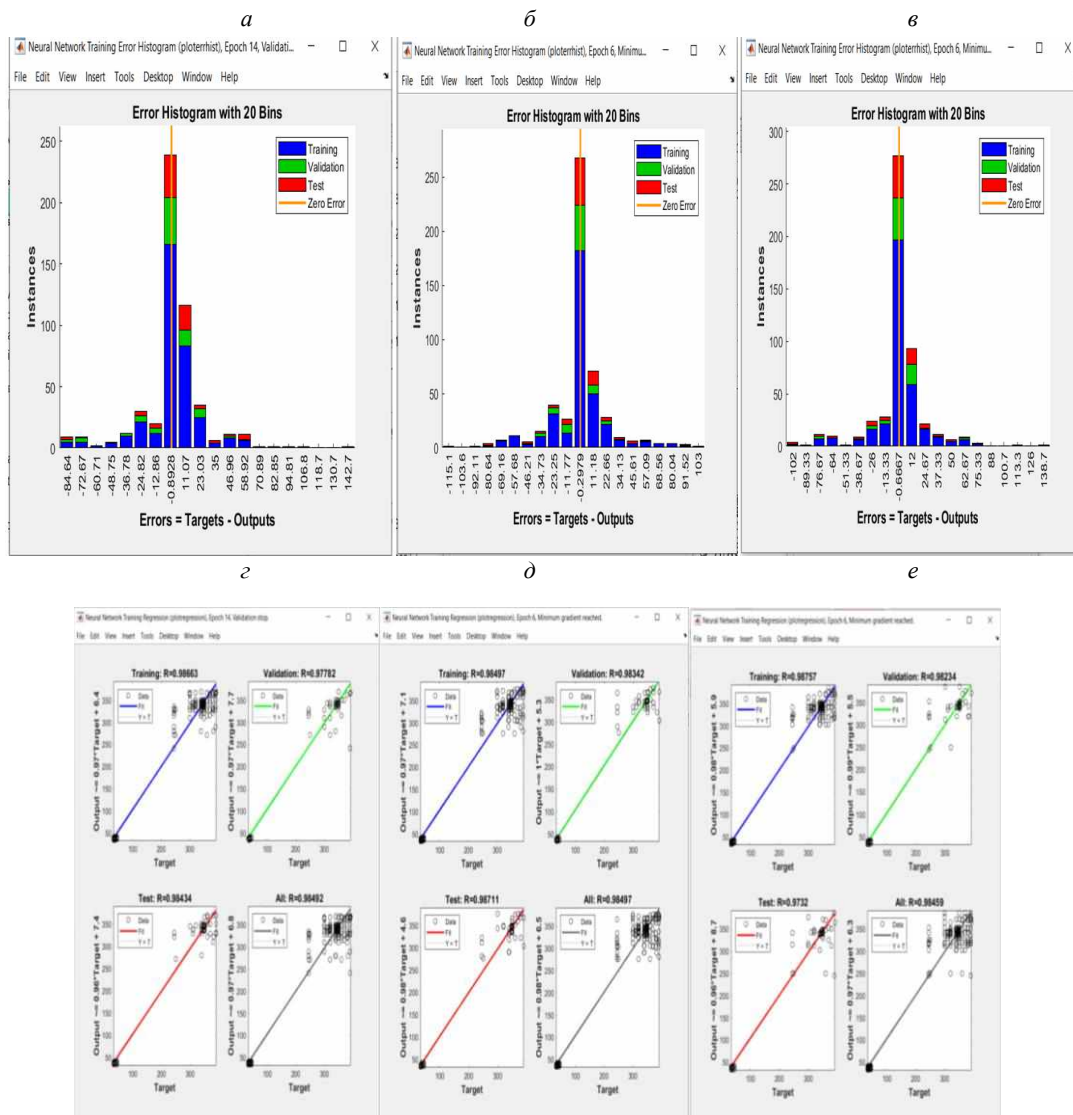


Рис. 2. Вікна результатів навчання: *a, б, в* - найкраща ефективність валідації; *z, д, е* - лінійної регресії між виходом НС і цілями при прихованих нейронах: *a, z* - 10; *б, д* - 30; *в, е* - 50

Висновки та напрямок подальших досліджень. Результати проведених досліджень показують, що на основі НМ, може бути виконана автоматизація процесу керування термічним оброблення котунів на ВМКТ, забезпечуючи стабілізацію температур верхнього шару котунів і теплоносіїв ГПП у кожній ТЗ із високими статичними і динамічними характеристиками. НМ дозволяє створити модель кожної ТЗ ВМКТ, точно відтворити її динаміку, не вимагаючи додаткових знань про її структуру і параметри.

Як показали результати досліджень, впровадження нейроконтролера у порівнянні з регулятором, реалізованого на нечіткій логіці, дозволить скоротити витрати, підвищити точність при обробці котунів, зменшити витрати енергоносіїв і збільшити продуктивність ВМКТ.

Приведено порівняльні дослідження декількох варіантів нейронної мережі прямого поширення з різними входними та вихідними шарами і кількістю нейронів. Розроблена нейромережева адаптація параметрів для ЗСІ дозволяє стабілізувати температуру верхнього шару котунів під час їх обробки шляхом навчання параметрів термічного процесу.

Оптимальним значенням параметрів нейроконтролера є кількість шарів і нейронів. Розроблена НМ для ЗСІ має 3 шари з 10 нейронами в першому шарі, 3 нейрони в другому шарі та 3 нейрони у вихідному шарі.

Список літератури

1. Основы теории процессов при обжиге железорудных окатышей : научная монография / [Б.П. Юрьев, Л.Б. Брук, Н.А. Спириин и др.]; под ред. М во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагил. технол. Ин т (фил.). Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. - 310 с.

2. Технологическая инструкция по обжигу железорудных окатышей на обжиговой машине ОК-1-324/336. Система качества. ДСТУ ISO 9001-2001.СТП ЦГОК -11, 2010. - 19 с.
3. Автоматизовані системи керування процесами термічної обробки котунів на конвеєрній випалюваній машині: монографія / **В.Й. Лобов, Л.І. Єфіменко, М.П. Тиханський, С.А. Рубан.** Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. - 250 с.
4. **Мных А.С.** К вопросу синтеза тепловой модели термообработки железорудных окатышей // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 7. - С. 36-42.
5. **М. Barati** Dynamic simulation of pellet induration process in straight-grate system / International journal of mineral processing. 2008. № 89. P. 30-39.
6. **Bobkov V.I., Borisov V.V., Dli M.I., Meshalkin V.P.** (2015) Modeling the calcination of phosphorite pellets in a dense bed. Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2, 176-182.
7. **Пирматов Д.С.** Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине / Сборник трудов всероссийской конференции: Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ - 2010. Воронеж, 2010. - С. 88-89.
8. **Lobov V.I., Kotliar M.O.** (2015) Temperature distribution model of the iron ore pellets layer inside the combustion chamber of the belt kiln burning zone. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2, P. 109-117.
9. **Кривонос В.А., Пирматов Д.С.** Математическая модель процесса обжига окатышей по зонам обжиговой машины для оптимизации режима. / Вестник Воронежского государственного технического университета, 2010. №5. С. 128-132.

Рукопис подано до редакції 23.04.22

УДК 622.012: 658.5: 622.68

В.А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет

ОБГРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ ВДОСКОНАЛЕННЯ ПОРОШКОВОГО АНАЛІЗАТОРА ПРОБ

Мета. Стаття спрямована на аналіз рівня точності вимірів порошкового аналізатора проб та надійності його роботи для визначення напрямків його вдосконалення.

Методика досліджень. Об'єктом досліджень є порошковий аналізатор проб (ПАП), що розроблений колективом проблемно-галузевої лабораторії Криворізького національного університету та призначений для точного і швидкого визначення вмісту корисного компоненту (заліза загального) у підготовлених пробах. В статті виконано аналіз статистичних даних значень відхилень вмісту корисного компоненту ПАП від хімічного аналізу. В якості дослідницького зразку проаналізовано роботу порошкового аналізатора проб, що застосовується на РЗФ Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Розглянуто основні фактори, що впливають на точність вимірів вмісту корисного компоненту, їх класифіковано, наведено відповідні графічні матеріали, що відображують різні показники похибки. На основі графоаналітичних досліджень та методів математичної статистики отримано дані щодо похибок вимірів та обгрунтовано основні напрямки вдосконалення порошкового аналізатора проб.

Наукова новизна полягає в обгрунтуванні перспективних напрямків вдосконалення порошкових аналізаторів проб з метою підвищення точності вимірів вмісту корисного компоненту та надійності роботи.

Практичне значення. Вдосконалення порошкових аналізаторів проб дозволить підвищити точність вимірів та надійність їх роботи, що безумовно позитивно вплине на процес контролю та управління якістю залізорудної сировини, а у подальшому – зміцнить конкурентоздатність гірничих підприємств.

Результати дослідження. Дослідженнями встановлено, що відхилення вмісту корисного компоненту оперативних показників порошкових аналізаторів проб від хімічного аналізу було викликано в основному людським фактором на різних етапах застосування цих приладів – від підготовки проб, налаштування та калібрування, до процесу виміру та реєстрації даних. Лише у окремих випадках збільшення похибки вимірів більше, ніж паспортний показник, було спричинено некоректною роботою апаратної бази пристрою. Визначено напрямки та методи вдосконалення порошкових аналізаторів проб.

Ключові слова: порошковий аналізатор проб, залізорудна сировина, фактори, що впливають на точність вимірів.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-139-146

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На початку XXI сторіччя суттєво зросла роль методів оперативного контролю якості залізозмісної сировини та продуктів її переробки [1]. Це відбулося внаслідок підвищення вимог до якості руди та концентрату як одного з головних чинників конкурентоспроможності гірничих підприємств України [2].