

УДК 681.5:621.313.323

В.П. ХОРОЛЬСЬКИЙ, Д.В.ХОРОЛЬСЬКИЙ, К.Г. ТИТОРЕНКО  
Криворізький національний університет**АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ  
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯМ ЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ  
ПІДПРИЄМСТВА ГІРНИЧО - МЕТАЛУРГІЙНОГО КОМПЛЕКСУ**

*В статті досліджено принципи побудови системи автоматизованого управління електроспоживанням збагачувальної фабрики підприємства гірничо-металургійного комплексу у періоді обмежень потужності енергосистеми. Доведено, що зменшення питомих енергозатрат на виробництво однієї тони концентрату може бути досягнуто узгодженим управлінням траєкторіями виробництва концентрату і електроспоживання збагачувальної фабрики у періоді «пік», «напівпік» та «ніч», шляхом оптимального завантаження кульових млинів і вибору на основі інформації датчиків геометрії внутрішньомлинного завантаження уставок адаптивних регуляторів збудників синхронних двигунів.*

*Ключові слова: електроспоживання, кульові млини, збудники, синхронні двигуни, адаптація, інтелектуальні системи.*

V.P.KHOROLSKYI, D.V.KHOROLSKYI, K.G.TITORENKO  
Kryvyi Rih National University**AUTOMATED CONTROL SYSTEM POWER CONSUMPTION ENRICHMENT  
PLANTS ENTERPRISE MINING - METALLURGICAL COMPLEX**

*In the article the principles of automated control system power consumption concentrator mining and metallurgical complex in times of limited power grid. Proved that the reduction of specific energy consumption for production of one ton of concentrate can be achieved consistent management trajectories concentrate production and power consumption concentrator during the "peak", "half-" and "Night" by optimal load ball mills and choice based on information sensor geometry internally mill boot settings of the adaptive regulators pathogens synchronous motors.*

*Keywords: power, ball mills, activators, synchronous motors, adaptation, intelligent systems.*

**Вступ**

Основним завданням підприємств гірничо-металургійного комплексу України на стратегічному періоді до 2020 року є підвищення конкурентоспроможності продукції до вимог світового ринку концентратів і обкотишів та зменшення питомих енергозатрат на 25-35% від рівня 2013 року. Пріоритетом наукових досліджень на цьому п'ятирічному періоді стане розробка алгоритмів керування енергоємними процесами здрібнення, класифікації, магнітної сепарації і впровадження інтелектуальних систем управління електропостачанням збагачувальних фабрик, які повинні забезпечувати виробництво заданих технологічних параметрів якості концентратів у періоді обмежень потужності енергосистеми [1].

Високі параметри енергозатрат на виробництво однієї тонни продукції підприємств ГМК стимулюють енергоменеджмент до корпоративної реструктуризації процесів обліку та оптимізації споживання електрики, газу, води, пару, дизельного-палива, оливи, куль та інших матеріалів для зменшення собівартості продукції до рівня європейських стандартів [2]. Таким чином, актуальним є зниження енергетичних витрат на ці процеси шляхом розробки автоматизованих систем управління електроспоживанням рудозбагачувальних фабрик (РЗФ), узгоджених з оптимізацією технологічних процесів виробництва концентрату.

З позиції управління електроспоживанням РЗФ ці процеси віднесені до складних динамічних: з нестационарними параметрами і нелінійними залежностями; ті які мають різні режими роботи та залежать як від професійності оперативно-диспетчерського персоналу, енергодиспетчерів, так і технологічних характеристик руд, що надходять на здрібнення [3].

Оптимальне управління електропостачанням і енергоменеджмент підприємств вимагає відповідної апріорної і апостеріорної інформації за допомогою автоматизованих систем контролю об'єктів електроспоживання (АСКОВЕ), SCADA- систем, ефективних засобів нечіткого оцінювання й ідентифікації [4]. Для чого, на наш погляд найбільш перспективними є використання інтелектуальних методів (експертних систем з штучним інтелектом, нейронних мереж, систем з нечіткою логікою мереж Петрі, що здатні до навчання і оцінки нечіткого стану як енергосистеми так і енергоємного технологічного процесу та є універсальними й ефективними апроксиматорами [3].

Крім того квазістационарність й стохастичність керованих процесів електроспоживання РЗФ підприємств ГМК потребує узгодженого управління збагачувальною фабрикою у темпі з одержанням інформації про збурення в системі електропостачання.

Таким чином, задача обґрунтування принципів інтелектуального управління процесами електроспоживання РЗФ, які забезпечують працездатність енергоємних технологічних апаратів – кульових млинів, класификаторів, магнітних сепараторів, гідроциклонів, дешламаторів в умовах обмежень енергопотужності і збуреного середовища є актуальною.

### Аналіз досліджень та публікацій

Над науковою проблемою розробки автоматизованих систем електропостачання збагачувальних фабрик з оптимізацією технологічних режимів роботи працювали Б.М. Авілов-Корнаухов [5], В.І. Корнієнко [6], С.В. Кочура [7], І.В. Новицький [8], В.П. Хорольський [9], у наукових працях яких доведено, що ефективність процесів електрозбереження в багатьох випадках залежать від удосконалення конструкцій і автоматизації енергоємних технологічних комплексів магніто-збагачувальних фабрик. Разом з тим ефективність електрозбереження залежить від принципів автоматизації електропостачання, вміння проєктантів спроектувати ці системи інваріантними до збурень технологічних процесів в періоди обмежень потужності енергосистеми, віялових відключень електропостачання об'єктів електрогосподарства підприємств ГМК [1].

Тому потрібно розробити такі автоматизовані системи управління електроспоживання збагачувальних фабрик, які б відрізнялися від існуючих енерго-інжиніринговими рішеннями, щодо проєктування енергоефективних систем з інтелектуальними механізмами пошуку кращого режиму електропостачання з мінімізацією втрат продукції в періоди обмежень потужності енергосистеми та віялових відключень. При цьому розроблені енергозберігаючі способи автоматизованого управління процесами здрібнення, класифікації і магнітної сепарації три стадійного збагачення враховують: зміни властивостей руди, що надходить на першу стадію збагачення; оцінюють геометрію завантаження кульових млинів, щільність пульпи в зливні класифікатора; виконують прогнозування активної та реактивної потужностей першої, другої, третьої стадії збагачення. Отже у нашому випадку виконується оптимізація процесів електропостачання РЗФ.

**Метою статті** є розв'язання актуальної наукової задачі автоматизованого управління траєкторією електроспоживання збагачувальної фабрики підприємства у періоди обмежень енергосистеми за рахунок розробки системи інтелектуального керування і прогнозування активної і реактивної потужностей, контролю геометрії внутрішньомлинного завантаження, збурень вхідних характеристик залізної руди, що надходить на збагачення і виробництво концентрату заданої якості та продуктивності.

### Викладання матеріалу та результати

Корпоративні підприємства ПАТ «ПівніГЗК», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПАТ «ІнГЗК», ПАТ «ПівдГЗК», ПАТ «ЦГЗК» з навантаженням від 200 до 1000 МВт відносяться до великих споживачів електрики. Більшість технологічних виробництв електропостачання цих підприємств згідно ПУЕ відносяться до I, II категорій електроприймачів [4].

На збагачувальних фабриках ПАТ гірничо-металургійного комплексу відповідно ПУЕ працюють електроустановки напругою вище 1000 В і до 1000 В, і електроустановки постійного струму до 1500 В. На кожній із 10-20 технологічних секцій РЗФ працюють чотири кульових млина кожний з електроприводом від синхронного двигуна потужністю 2500 кВт, два класифікатори з асинхронними двигунами потужністю до 40 кВт, десятки магнітних сепараторів з асинхронними двигунами до 10 кВт, гідро циклони з насосами з електроприводом до 500 кВт (асинхронні двигуни), шламові насоси з електроприводом потужністю 600 кВт, живники конвеєри з двигунами постійного струму, конвеєри збирачі з приводом потужністю до 600кВт, двигуни вентиляторів, кранів тощо. Збагачувальна фабрика потужністю до 10 млн т. концентрату на рік складається з 20 технологічних секцій, а отже потужність встановлених на збагачувальній фабриці електричних машин (двигунів)  $P_{де} = 12\text{МВт} * 20 = 240\text{МВт}$  і більше.

В цілому електричне господарство (ЕГ) збагачувальної фабрики та траєкторію електроспоживання можливо описати системою залежностей виду:

$$EG = \{P_{max} * K_{поп} * T * D * P_{сеп} * A_{п} * A_{еп}\}, \quad (1)$$

де  $P_{max}$  – півгодинний максимум навантаження збагачувальної фабрики;  $K_{поп}$  – коефіцієнт попиту;  $T$  – річне число годин використання максимального навантаження  $T_{max}$  (год);  $D$  – кількість встановлених електродвигунів (шт);  $P_{сеп}$  – двигунів, в умовних електродвигунів, кВт;  $A_{п}$  – електроозброєність праці (МВт·год/люд);  $A_{еп}$  – продуктивність праці електротехнічного персоналу (МВт·год/люд).

На рисунках 1а, 1б наведені схеми автоматизованої системи управління електроспоживання першої (а) та другої і третьої (б) стадій збагачення РЗФ підприємства ГМК. Система електроспоживання технологічної секції збагачувальної фабрики адаптована до нестационарних технологічних режимів роботи обладнання і характеризується інваріантністю до типів руд, які надходять на збагачення [1,3]. Траєкторії електроспоживання збагачувальних фабрик в момент  $T_i$  відповідає своя траєкторія виробництва концентрату з масовою часткою заліза  $\beta_{Feконц} = \{65,8\% + 66,5\%\}$  і параметрами: продуктивності фабрики  $Q_{0,056}^{\Phi}$  по готовому класу -0,056 мм розкритого зерна магнетиту; продуктивність збагачувальної фабрики по вхідній (сирій) руді  $Q_{вх}(t)$  т/год; продуктивність кульових млинів (т/год)  $Q_{1с}^{кмл1}$ ,  $Q_{1с}^{кмл2}$ ,  $Q_{2с}^{кмл3}$ ,  $Q_{3с}^{кмл4}$  – першої, другої і третьої стадій збагачення; продуктивність фабрики по концентрату  $Q_{конц}^{\Phi}$ ; масова частка твердого в зливні класифікатора %  $\rho_{вл}$ ; витрати води, що надходять до млинів першої стадії збагачення  $W_{вх}^{кмл1}$ ,  $W_{вх}^{кмл2}$  і в класифікатори першої стадії збагачення  $W_{вх}^{кмл1}$ ,  $W_{вх}^{кмл2}$ ;

масова частка вмісту твердого в зливах гідроциклонів  $\varnothing 710\text{мм}$  другої і третьої стадії збагачення %  $\rho_2^F, \rho_3^F$ ; масова частка класу - 0,056 мм в зливні гідроциклонів другої і третьої стадії збагачення  $\beta_2^F, \beta_3^F$ ; масова частка заліза у промпродуктах третьої стадії збагачення %  $\beta_{Fe}^3$ ; масова частка магнітного заліза в хвостах першої, другої, третьої стадії збагачення відповідно  $\alpha_{XB}^1, \alpha_{XB}^2, \alpha_{XB}^3$ ; геометрія внутрішньомлинного завантаження кульових млинів першої, другої, третій стадії відповідно  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ .

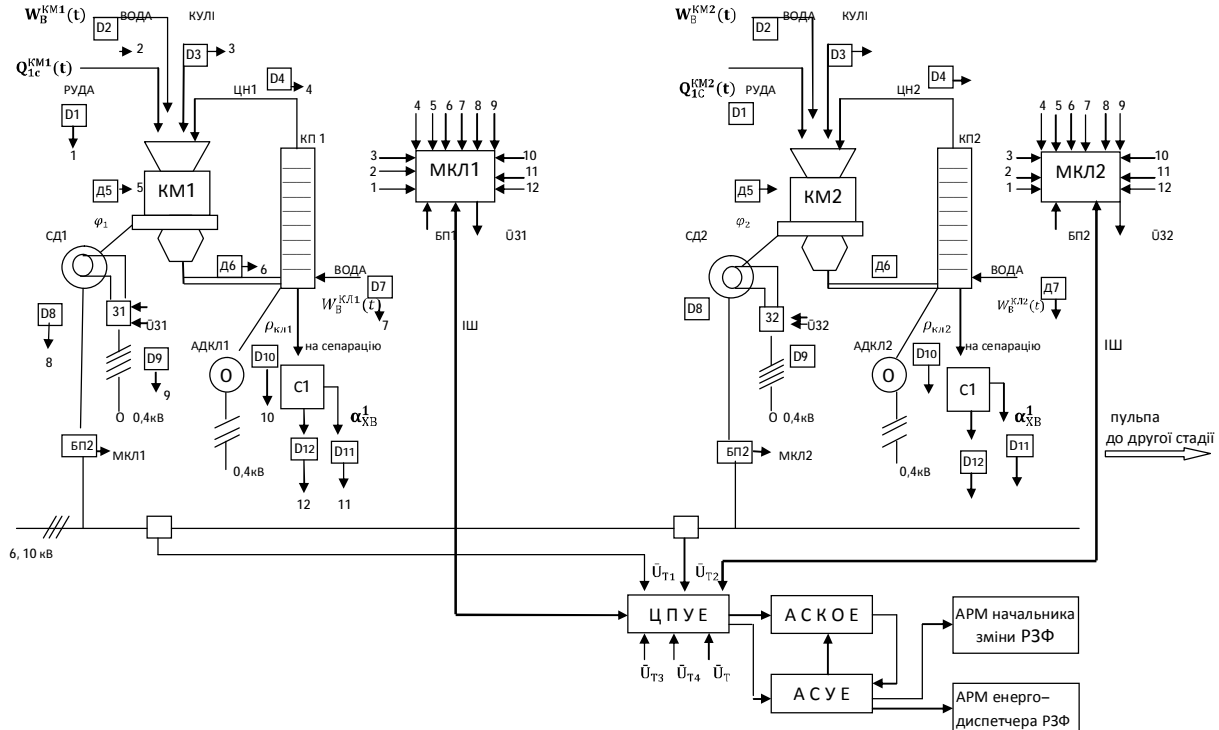


Рис. 1, а. Автоматизована система управління електроспоживанням першої стадії збагачення РЗФ

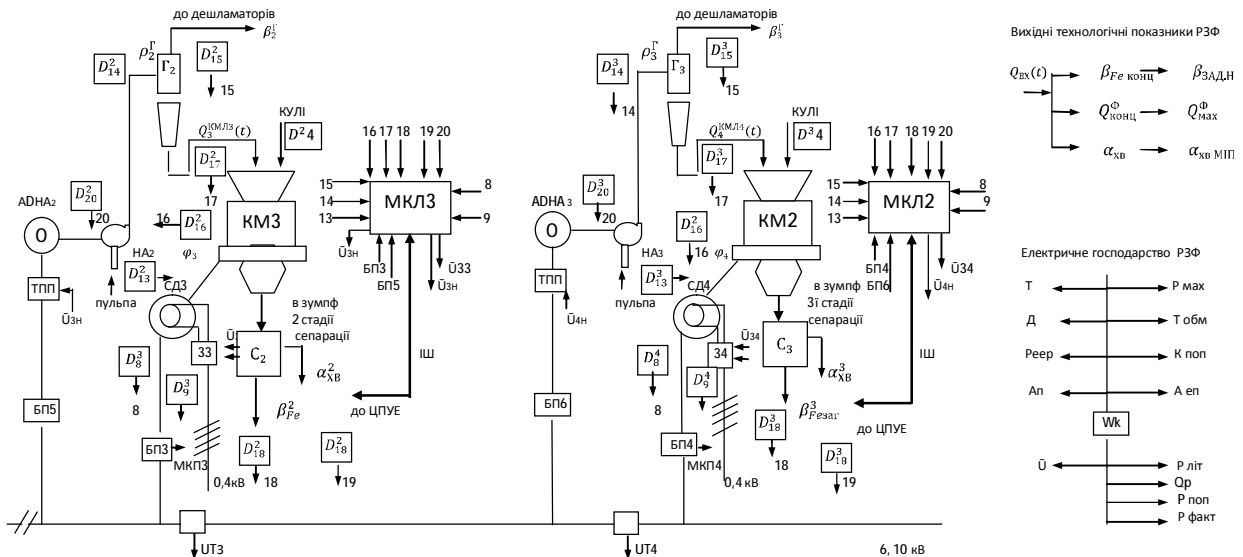


Рис. 1, б. Автоматизована система управління електропостачанням другої і третьої стадії збагачення РЗФ

Вплив коливання якісних властивостей характеристик руди на активну потужність електроприводу класифікаторів і магнітних сепараторів дослідженні проф. С.В. Кочурою [7] та дозволяють опосередковано оцінити витрати електроенергії на виробництво запланованих  $Q_{-0,056}^{\Phi}, Q_{\text{конц}}^{\Phi}, \beta_{Fe}^{\text{конц}}, \alpha_{XB}$ . При зміні текстурних характеристик сирової руди змінюються і параметри питомих витрат електрики на розкриття зерна заліза до класу -0,056мм [10]. Тоді розрахункові витрати електрики будемо оцінювати по формулі:

$$W_K = Q_{\text{конц}}^{\Phi} * K_{\text{ср}} * (\beta_{-0,056}^K - \beta_{-0,056}^{\text{ср}}) * e^{\Phi_{\text{пит}}} \quad (2)$$

де  $K_{\text{ср}}$  – коефіцієнт, який залежить від відсотку вмісту важко збагачувальних (різновидів) сирової руди,

(с.р.) що надходить на збагачення;  $(\beta_{-0,056}^K - \beta_{-0,056}^{SP}) = \Delta_{-0,056}$  - приріст готового класу -0,056мм в концентраті в процесах подрібнення, класифікації і збагачення;  $e_{\text{пит}}^{\Phi}$  – питомі витрати електрики на виробництво однієї тонни концентрату зі заданими параметрами  $\beta_{\text{РФ конц}}$ ,  $\alpha_{\text{кв}}$ , і вологи  $W_{\text{зад}} < 10\%$ .

Якщо енергосистема встановила підприємству ліміт електрики в період обмежень потужності, тоді

$$\max \left[ \sum_{i=1}^n \int_0^{t_i+30} P(t) dt \right] \leq \sum_{i=1}^n P_{\text{лім}} = K_{\text{поп}} \cdot P_{\text{ном}} \quad (3)$$

$$t_0 < t \leq t_t - 30$$

де  $P(t)$  – активна максимальна потужність фабрики в період обмеження потужності електросистеми,  $P_{\text{лім}}$  – розрахункова лімітна потужність;  $P_{\text{ном}}$  – номінальна потужність;  $n$  – кількість технологічних секцій РЗФ.

$$\text{Розрахована реактивна та повна потужності дорівнюють } Q_p = P_{\text{лім}} \cdot \tan \varphi, S_p = \sqrt{P_{\text{лім}}^2 + Q_p^2}$$

Значення  $W_k, P(t), P_{\text{лім}}, Q_p, S_p$  в кожний із періодів прогнозування  $t_1, t_2, t_3$  будуть відповідати експертні значення  $Q_{\text{конц}}^{\Phi}, Q_{-0,056}^{\Phi}$  і поточні значення технологічних параметрів  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, Q_{1c}^{\text{кмл1}}, Q_{1c}^{\text{кмл2}}, Q_{2c}^{\text{кмл3}}, Q_{3c}^{\text{кмл4}}, \rho_{\text{квл}}, W_{\text{вк}}^{\text{кмл1}}, W_{\text{вк}}^{\text{кмл2}}, W_{\text{вк}}^{\text{кмл1}}, W_{\text{вк}}^{\text{кмл2}}, \rho_r^2, \rho_r^3, \beta_r^2(-0,056), \beta_r^3(-0,056), \alpha_{\text{кв}}^2, \alpha_{\text{кв}}^3$ .

Перераховані вище параметри будемо вважати приблизними множинами, для оцінки яких у подальшому використаємо штучні нейронні мережі (ШНМ) [3, 10], по інформації датчиків  $D_1, D_2, D_3, \dots, D_{20}$ . В автоматизованій системі управління електроспоживанням (АСУЕ) нейронні мережі будуть використанні також в задачах обробки інформації, ідентифікації нелінійних систем, прогнозування, фільтрації, адаптованого управління, розпізнавання образів та діагностики.

В АСУЕ виконується автоматизований контроль параметрів витрат електрики по кожній із 20 технологічних секцій. За допомогою системи АСКОЕ шляхом побудови бази даних (БД) бази знань (БЗ) виду:  $БЗ_P, БЗ_Q, БЗ_U, \dots$  і бази правил  $БП_P, БП_Q, БП_U$  побудовані прогноуюча нейромережева модель і управлінська нейромережева модель відповідно:  $P$  – активної потужності;  $Q$  – реактивної потужності;  $U$  – напруги.

Отже, в АСУЕ виконується моніторинг траєкторії електроспоживання РЗФ  $T_E^{\Phi}$  по кожній із двадцяти технологічних секцій.

$$\bar{T}_E^{\Phi} = \{\bar{T}_{E_1}^1, \bar{T}_{E_2}^2, \bar{T}_{E_3}^3, \dots, \bar{T}_{E_{20}}^{20}\}, \quad (4)$$

якій буде відповідати траєкторія  $\bar{T}_{\beta_{\text{РФ}}}^{\Phi} = \{\bar{T}_{\beta_{\text{РФ}K1}}^1, \bar{T}_{\beta_{\text{РФ}K2}}^2, \bar{T}_{\beta_{\text{РФ}K3}}^3, \dots, \bar{T}_{\beta_{\text{РФ}K20}}^{20}\}$ , виробництва заданої якості концентрату, а також траєкторія втрати продукції у випадку аварій в системі енергопостачання зменшення ліміту  $P_{\text{лім}}$ , віялових відключень  $\bar{T}_{\Delta Q_{\text{конц}}}^{\Phi} = \{\bar{T}_{\Delta Q_{\text{конц}1}}^1, \bar{T}_{\Delta Q_{\text{конц}2}}^2, \bar{T}_{\Delta Q_{\text{конц}3}}^3, \dots, \bar{T}_{\Delta Q_{\text{конц}20}}^{20}\}$ .

Наведеним вище технологічним траєкторіям будуть відповідати технологічні, фінансові, економічні ризики – втрати прибутку у випадку виникнення проблемних, аномальних, аварійних і після аварійних виробничих ситуацій, які означені змінами текстурних характеристик руди, що надходить на збагачення, станом технологічного обладнання та електрообладнання і відповідно станом електропостачання РЗФ. Таким чином, нормальній ситуації  $\{S_E^H\}$  буде відповідати своя траєкторія електроспоживання  $\{\bar{T}_E^{\Phi}\}$ , траєкторія виробництва заданої якості концентрату  $\{\bar{T}_{\beta_{\text{РФ}}}^{\Phi}\}$ , траєкторія мінімізації втрати продукції  $\{\bar{T}_{\Delta Q_{\text{конц}}}^{\Phi}\}$  і мінімальні ризики не виконання планових показників щодо зниження прибутку  $\bar{P}_{\Phi}^H \rightarrow \bar{P}_{\Phi}^H \text{ зад. зн.}$

У випадку проблемних, аномальних, аварійних і після аварійних ситуацій в енергосистемі АСУЕ повинна видати рекомендації оперативному персоналу (АРМ начальнику зміни РЗФ, АРМ енергодиспетчера РЗФ), щодо прийняття рішень, виведення електроспоживання на траєкторію  $\{\bar{T}_E^{\Phi}\}$  шляхом оптимізації параметрів:  $P_1(t), P_2(t), \dots, Q_{1P}(t), Q_{2P}(t), Q_{3P}(t), \dots, Q_{1\text{вк}}(t), Q_{2\text{вк}}(t), \dots, Q_{1\text{конц}}^{\Phi}, Q_{2\text{конц}}^{\Phi}$  по інформації датчиків як електричних так і технологічних змінних. Крім цього ряд параметрів, що визначають, наприклад, текстурні характеристики сирової руди, параметри геометрії внутрішньомлинного завантаження кульових млинів  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ , параметри розкриття магнетиту до класу -0,056 мм. ( масової частки заліза в промпродукті третьої стадії збагачення), параметри  $\beta_{\text{РФ}}^3, \alpha_{\text{кв}}^1, \alpha_{\text{кв}}^2, \alpha_{\text{кв}}^3$ , будемо оцінювати за допомогою штучної п'ятишарової нейронної мережі, яка навчається за допомогою процедури зворотного розповсюдження [10].

Для прогнозування реактивного навантаження  $Q_P(t)$  РЗФ нами використана тришарова ШНМ, у вхідному шарі якої знаходяться 4 нейрони, в середньому 3, а у вихідному 1 нейрон, тобто зі структурою 4-3-

1. Для прогнозування активних навантажень  $P_1(t), P_2(t), \dots$  в роботі використана архітектура 5-3-1 нейромережі. ШНМ за допомогою алгоритму зворотного розповсюдження [1]. Управлінська нейромережева модель управління електроспоживанням побудована у вигляді радіально базисної мережі. Така модель має два шари оброблення інформації з  $n$ -входами і  $m$ -виходами та виконує нелінійне перетворення виду:

$$Y_j = F_j(x) = w_{j0} + \sum_{i=1}^n w_{ij} \varphi_i(x) = w_{ij}^T \varphi(x), \quad (5)$$

де  $Y_j$  -  $j$ -й вихідний сигнал мережі ( $j = 1, 2, \dots, m$ ),  $F_j(x)$  – нелінійне відображення вхідного вектору сигналу з датчиків  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  у  $j$ -й вихід;  $w_{ij}$  – налагоджені синаптичні вагові параметри;  $\varphi_i(x)$  – радіально-базисні функції, які представляють собою парзенівські ядра [10], виду  $w_j = (w_{j0}, w_{j1}, \dots, w_{jn})^T$ ,  $\varphi(x) = (1, \varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x))^T$ .

З метою виключення технологічного перевищення активної потужності підприємством  $P_{ном}(t)$  в період  $T_{обн}$  і відповідно активної потужності  $P_{обн}$  встановленого енергосистемою, через фіксовані проміжки часу  $t_1, t_2, t_3, \dots$ . Виконується контроль значення цієї потужності системою АСКОЕ енергоменеджменту підприємств ГМК [2].

Кількісною мірою оцінки якості виконання прогнозу електричних навантажень прийнято максимальне значення відносної середньоквадратичної похибки:

$$\delta_{max} = \max \cdot \frac{P_i - P_{прі}}{P t^*} \quad (6)$$

$$t^* \in [t, t + t^*]$$

де  $P_i$  і  $P_{прі}$ ,  $P t^*$  – дійсні і прогнозні значення навантажень. Для забезпечення економічно вигідних режимів функціонування збагачувального виробництва енергосистема встановлює обмеження на рівень реактивної потужності споживачів електроенергії: максимальне і мінімальне значення реактивної потужності. Ці обмеження звичайно диференціюються в часі доби ( $\epsilon$  функціями поточного часу). Напруга на затискачах електроприймачів СД КМ  $U_{T_1}, U_{T_2}, U_{T_3}, U_{T_4}$  при цьому не повинна виходити за допустимі межі: максимальне і мінімальне значення, які встановлені нормативними документами (коливання напруги на електроприймачах допустимо в межах  $\pm 5\%$  або від  $-5\%$  до  $+10\%$  від номінальної напруги) [4].

Підтримання напруги в межах установлених норм дозволяє мінімізувати втрати активної потужності в асинхронних двигунах (АД) класифікаторів, сепараторів і насосних агрегатів гідроциклонів, тобто зменшити додаткове споживання ними реактивної потужності. Це суттєво, так як при підвищенні напруги на 1% реактивна потужність, яку споживає АД, збільшується на 3% [4].

Ось чому в системі управління гідро циклон-кульовий млин другої і третьої стадій збагачення в роботі [9] запропоновано використовувати ТПЧ для управління АД насосними агрегатами типу 8ГР-8 гідроциклонів другої та третьої стадій потужністю (150-500)кВт. Такий підхід дозволяє підвищити ефективність керування стадіями по виходу класу  $-0,0056$ мм шляхом вибору раціональних параметрів  $\varphi_3, \varphi_4, Q_{2c}^{КМЛ3}, Q_{3c}^{КМЛ4}, \beta_2^1, \beta_3^1, \beta_{F_{2322}}^3, \alpha_{ХВ}^2, \alpha_{ХВ}^3$  та відповідно використати СД кульових млинів першої другої і третьої стадій для генерування реактивної потужності  $Q_{2P}(t), Q_{3P}(t)$ . Ці функції в АСУЕ виконують мікроконтролери МКЛ 1,2,3,4, інформація з яких через інформаційну шину (ІШ) надходить до центрального нейропроцесора управління електроспоживанням (ЦПУЕ) і відповідно систем АСКОЕ і АСУЕ, АРМ-начальника зміни й енергодиспетчера РЗФ.

У нашому випадку це дворівнева система управління, в якій інформація з датчиків Д1-Д12 першої стадії збагачення й завантаження кульових млинів КМЛ1, КМЛ2, з датчиків  $D_{13}^2 - D_{20}^2$  другої стадії збагачення з кульовим млином КМЛ3, з датчиків  $D_{13}^3 - D_{20}^3$  третьої стадії збагачення з кульовим млином КМЛ4, електроприлади технологічних апаратів, виконуючі механізми утворюють контролерний (нижній) рівень управління технологічним процесом і електроспоживання технологічних секцій РЗФ.

Датчики  $D_{13}^1 - D_{20}^3$  надають інформацію МКЛ, які виконують наступні функції:

- збору і оброблення інформації про параметри  $Q_{1c}^{КМЛ1}(t), W_{ВХ}^{КМЛ1}, \varphi_1, \dots, \varphi_2, \alpha_{ХВ}$  технологічного процесу;
- управління електроспоживанням СД КМЛ, АД НА, виконавчими механізмами живильників завантаження кульових млинів КМЛ1, КМЛ2, витрати води у кульові млини першої стадії, класифікатори КЛ1, КЛ2, рівня пульпи в зумпфах тощо;
- рішення задач автоматичного логічного керування стадіями визначення типів руди, перевантаження (аварійних режимів) млинів першої стадії тощо.

Усі контролери МКЛ нижнього рівня повинні функціонувати у режимі жорсткого реального часу, контролюючи керовані параметри  $\bar{U}_{31}, \bar{U}_{32}, \bar{U}_{33}$  та  $\bar{U}_{3H}, \bar{U}_{4H}$ .

Інформація з локальних контролерів нижнього рівня по інформаційній шині (ІШ) надходить до ЦПУЕ, який виконує наступні функції:

- обробку даних включаючи їх синхронізацію;
- підтримання єдиного часу в системі;



- синхронізацію роботи стадій збагачення;
- обмін інформацією між локальними МКЛ контролерами і верхнім рівнем;
- робота у автономному режимі при виникненні аварійних ситуацій в системі електроспоживання.

Верхній рівень управління електроспоживанням РЗФ і виробництва концентрату з АСКОЕ і АСУЕ утворює диспетчерський пункт і представляє АРМ – начальника зміни і АРМ – енергодиспетчера.

Основною диспетчерського пункту є мнемо-схема (відео стеля), на якій у вигляді полос, контурів та символів зображуються не тільки елементи системи електроспоживання РЗФ, технологічного процесу збагачення, але і їх взаємозв'язки та комунікації у динаміці. Все це створює умовну картину (схеми) енергетичного і технологічного процесу РЗФ. Крім цього АСУЕ РЗФ через інформаційні канали зв'язку MES і ERP утворюють інтелектуальну систему управління електроспоживанням ПАТ [1].

Нейропроцесор ЦПУЕ виконує розпізнавання параметрів  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ , оцінює  $\bar{U}_{T1}, \bar{U}_{T2}, \bar{U}_{T3}, \bar{U}_{T4}$  та визначає екстремум функції ЕК (економічного критерію) вигоди від генерування реактивної потужності синхронними двигунами електроприводів кульових млинів фабрики.

$$EK = EP_Q - EPP_{m_t} = C_Q - C_{P_{m_t}} = f(\alpha_{opt}) \quad (7)$$

де  $EP_Q$  - економічний показник виробництва (споживання) реактивної потужності;  $EPP_{m_t}$  - економічний показник витрат активної потужності;  $C_Q$  - величина (ціна) сплати за генеровану потужність за час  $t$ ;  $C_{P_{m_t}}$  - величина сплати за витрачену на це активну потужність. Чинник ЕК функціонального також залежить від  $\alpha_{opt}$  - оптимального кута, який відповідає оптимальному режиму сплати за спожиту активну потужність, що витрачається на генерацію реактивної потужності на затискачах синхронних двигунів КМЛ1, КМЛ2, КМЛ3, КМЛ4. Тобто умовою отримання такого режиму буде прогнозування ЦПУЕ по технологічним параметрам стану електроспоживання кожною стадією  $P_1, P_2, P_3, P_4, Q_{P_1}, Q_{P_2}, Q_{P_3}, Q_{P_4}$  при  $\bar{U}_{T1}, \bar{U}_{T2}, \dots, \bar{U}_{T4} = const$  і  $e_{пит}^{\Phi} \rightarrow e_{пит\text{взд}}^{\Phi}$ . За допомогою навчених НМ ЦПУЕ по параметрам:

$$\{\varphi_1, Q_{1c}^{KML1}(t), \rho_{KML1}, \zeta_{H1}\} \rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД1}$$

$$\{\varphi_2, Q_{1c}^{KML2}(t), \rho_{KML2}, \zeta_{H2}\} \rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД2}$$

$$\{\varphi_3, \rho_3^f, Q_{3c}^{KML3}(t), \beta_{F3}^2\} \rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД3}$$

$$\{\varphi_4, \rho_4^f, Q_{4c}^{KML4}(t), \beta_{F4}^2\} \rightarrow \text{оцінює } \alpha_{opt} \text{ СД4.}$$

Оптимальні уставки збудників СД кульових млинів визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{31}[n+1] &= \bar{U}_{31}[n] + K1(\bar{U}_{Bmax} - \bar{U}_{B0}) e^{-\frac{t}{\tau_{B1}}} \\ \bar{U}_{32}[n+1] &= \bar{U}_{32}[n] + K2(\bar{U}_{Bmax} - \bar{U}_{B0}) e^{-\frac{t}{\tau_{B2}}} \\ \bar{U}_{33}[n+1] &= \bar{U}_{33}[n] + K3(\bar{U}_{Bmax} - \bar{U}_{B0}) e^{-\frac{t}{\tau_{B3}}} \\ \bar{U}_{34}[n+1] &= \bar{U}_{34}[n] + K4(\bar{U}_{Bmax} - \bar{U}_{B0}) e^{-\frac{t}{\tau_{B4}}}, \end{aligned} \quad (8)$$

де  $\bar{U}_{Bmax}$  - максимальна напруга, яка підведена до обмотки збудника;  $\bar{U}_{31}, \bar{U}_{32}, \dots$  - напруга збудника у номінальному режимі;  $\tau_{B1}, \tau_{B2}, \tau_{B3}, \tau_{B4}$  - постійні часу збудників СД кульових млинів;  $K1, K2, K3, K4$ , - коефіцієнти, які залежать від ступені заповнення кульових млинів  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ .

Адаптивні системи управління збудниками синхронних двигунів кульових млинів побудовані за допомогою алгоритмів імпульсного безпощукового керування [3].

ЦПУЕ, одержуючи прогнозні значення  $P_1(t), P_2(t), P_3(t), P_4(t)$ , оцінює траєкторію електропостачання РЗФ в моменти часу доби «ніч», «напівпік» й «пік» і у випадку відхилення  $P_{факт}$  від  $P_{лім}$  останній відпрацьовує підпрограму «збитки». Для цього в пам'ять ЦП внесена таблиця пріоритетів електроспоживачів РЗФ, диференційованих за категоріями «збитки», щодо виробництва концентрату  $Q_{конц}^{\Phi}$ . При цьому ЦП відпрацьовує наступне правило:

«Якщо  $P_{факт} \gg P_{лім-пік}$  а  $\beta_{F_{конц-пік}} \rightarrow \beta_{взд}, Q_{конц}^{\Phi}$  і  $T_{\Delta Q_{конц-пік}}^{\Phi}$  відповідає заданому значенню, то необхідно відключити СД кульових млинів першої стадії збагачення на період  $t_{лім-пік}$  - час періоду обмеженні потужності електроспоживання енергосистемою підприємства ПАТ «ДТЕК ДНПРООБЛЕНЕРГО».

У нашому випадку одночасно потужність РЗФ енергоспоживання буде зменшена на 100 МВт, але АСУЕ-АСУ технологічних апаратів другої, третьої стадій збагачення будуть відпрацьовувати траєкторію виробництва концентрату, забезпечуючи виконання планових показників виробництва продукції. Для періоду «напівпік» розроблено наступне правило:

«Якщо  $P_{факт} \gg P_{лім-напівпік}$  а  $\beta_{F_{конц-напівпік}} \rightarrow \beta_{взд}, Q_{конц}^{\Phi}$  і  $T_{\Delta Q_{конц-напівпік}}^{\Phi}$  відповідає

заданому значенню, то необхідно відключити лише один СД кульового млина КМЛІ кожної із 20-ти секцій РЗФ.»

У цьому випадку одночасно енерго потужність РЗФ буде зменшена на 50 МВт, але АСУЕ-АСУ технологічних апаратів першої, другої та третьої стадії збагачення будуть відпрацьовувати задані планові показники виробництва продукції для періоду «напівпік».

Для періоду «ніч» розроблено наступне правило:

«Якщо  $P_{\text{факт}} = P_{\text{лім-ніч}}$  а  $\beta_{P_{\text{в конц-ніч}}} \rightarrow \beta_{\text{зад}}, Q_{\text{конц}}^{\Phi}$  і  $T_{\Delta Q_{\text{конц-ніч}}}^{\Phi}$  відповідає заданому значенню, то необхідно максимізувати виробництво концентрату, шляхом постійного моніторингу чинників  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  та  $\alpha_{\text{хв}}$ »

У цьому випадку АСКОЕ-АСУЕ відпрацьовують задані значення траєкторії електроспоживання РЗФ  $T_{\text{в}}^{\Phi}$ , максимізуючи чинники  $Q_{\text{конц}}^{\Phi}$  і мінімізуючи  $\alpha_{\text{хв міні}}$  і відповідно  $\epsilon_{\text{питт зад}}^{\Phi} \rightarrow \epsilon_{\text{питт міні}}^{\Phi}$ , а отже  $\alpha_{\text{опт}}^{\Phi}$  СД1,  $\alpha_{\text{опт}}^{\Phi}$  СД2,  $\alpha_{\text{опт}}^{\Phi}$  СД3,  $\alpha_{\text{опт}}^{\Phi}$  СД4 та відповідно мінімальні витрати електрики  $W_k$ .

### Висновки

Розроблено автоматизовану систему управління електроспоживанням рудозбагачувальної фабрики підприємство гірничо-металургійного комплексу в періоди обмежень енергосистемою потужностей по активному і реактивному навантаженню, система дозволяє зменшити втрати виробництва продукції (концентрату) в періоди «пік», «напівпік» та максимізувати продуктивність фабрики в період «ніч», виконавши «точно у термін» замовлення фабрики огрудкування підприємства.

### Література

1. Хорольський В.П. Багаторівнева інтелектуальна система оптимізації електроспоживанням гірничо-збагачувальних підприємств / В.П. Хорольський, Д.В. Хорольський, К.Г.Тіторенко // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2015. – №2. – С.188–198.
2. Хорольський В.П. Інвестиційний механізм регіональної політики енергозбереження на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України / В.П. Хорольський, Д.В.Хорольський // Економіка: проблеми теорії та проблеми; Зб. Наук праць. Дніпропетровськ: ДНУ. – 2005. – Вип.200, том 4. – С.911–925.
3. Хорольський В.П. Інтегроване інтелектуальне управління технологічними процесами в економічних системах корпоративних підприємств гірничо-металургійного комплексу: монографія / В.П. Хорольський. – Дніпропетровськ: «Січ», 2008. – 448с.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник для студентов высших учебных заведений / Б.И. Кудрин. – М.: Интернет Инжиниринг, 2007. – 672с.
5. Авилов-Карнаухов Б.Н. Метод определения экономических режимов потребления электроэнергии на рудообогатительных фабриках / Б.Н. Авилов-Карнаухов, Г.Г. Зибровский // Промышленная электроника. – 1979. – №4. – С. 3–4.
6. Корнієнко В.І. Автоматизовані системи оптимального керування процесами крупного дроблення та самоздрібнювання руд: автореф. дис. докт. тех. наук / В.І. Корнієнко; ДВНЗ «НГУ». – Дніпропетровськ, 2010. – 35с.
7. Кочура Е.В. Развитие научных основ автоматизации процессов магнитного обогащения руд с целью энергосбережения: дис. докт. техн. наук / Е.В. Кочура. – Днепропетровск, 1996. – 331с.
8. Новицкий И.В. Автоматическая оптимизация процесса самоизмельчения руд в барабанных мельниках: дис. докт. техн. наук / И.В. Новицкий. – Днепропетровск, 1993. – 360с.
9. Хорольський В.П. Адаптивні системи многоуровневого управління технологічними процесами переробки руд: дис. докт. техн. наук / В.П. Хорольський; ЛГУ: – Ленинград, 1989. – 412 с.
10. Методы современной теории автоматического управления / Под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2004. – 784 с.

Рецензія/Peer review : 8.9.2015 р. Надрукована/Printed : 1.11.2015 р.

Рецензент: д.т.н. С.О.Жуков