

УДК 621.311.4.031

О.М. СІНЧУК, А.І. КУПІН, доктори техн. наук, професори, І.О. СІНЧУК,
М.Л. БАРАНОВСЬКА, кандидати техн. наук, доценти, К.І. БУДНІКОВ, аспірант
Криворізький національний університет

ДО РОЗРОБКИ АЛГОРИТМУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИМ КОМПЛЕКСОМ З РОЗДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЮ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ

Мета. Розробка логістики формування економіки «дорожньої карти» підвищення електроенергоефективності видобутку залізорудної сировини гірничорудними підприємствами шляхом застосування автоматизованих керованих електроенергетичних комплексів на основі систем електропостачання з розподіленою генерацією електричної енергії.

Методи дослідження. В науковій статті використовуються аналітичні та експериментальні методи досліджень: аналітичні методи включають теорію ймовірності та математичну статистику, математичне моделювання; експериментальні методи – теорію планування та проведення експерименту.

Наукова новизна. Розробка автоматизованої системи керування (АСК) енергопотоків залізорудних шахт, яка керує (розподіляє) потоки електричної енергії між споживачами в годинах доби не порушуючи технології функціонування підприємства (варіант «споживач-регулятор» електричної енергії) та визначає й регулює режим живлення споживачів в відповідні періоди часу (варіант «споживач-генератор» електричної енергії).

Практична значимість. В собівартості видобутку залізорудної сировини енергетична складова сягає 30 % та має тенденцію до постійного зростання. Тому актуальними питаннями є шляхи підвищення енергоефективності роботи залізорудних шахт як складової гірничо-металургійної галузі України.

Результати. Дослідження авторів дозволило розробити логістику формування економіки «дорожньої карти» підвищення електроенергоефективності видобутку залізорудної сировини шахти шляхом застосування автоматизованих керованих електроенергетичних комплексів на основі систем електропостачання з розподіленою генерацією електричної енергії. Розглянуто питання реалізації автоматизованого керування електричною мережею з можливістю розподіленої генерації електричної енергії.

Використання двоставкового тарифу без застосування нечітких автоматизованих систем керування веде до збільшення добових витрат на спожиту електричну енергію при одноканальному регулюванні (водовідведення) та двоканальному керуванні (рудопотік та водовідведення) на 12,88 % та 7,1 % відповідно. Застосування нечітких регуляторів дозволяє компенсувати ці втрати. Застосування автоматизованої системи керування з нечітким триканальним регулюванням (рудопотік, водовідведення та вентиляція) дозволяє скоротити витрати на спожиту електричну енергію на 4,45 % (за даними шахти «Родіна», м. Кривий Ріг).

Моделювання роботи нечіткої автоматизованої системи керування в режимах додаткової гідроакumuлюючої генерації електричної енергії показало потенційні можливості для зниження загального енергоспоживання на 15-35% (за двоставковим тарифом) в умовах залізорудних шахт.

Ключові слова: залізорудна шахта, електроенергетичний комплекс, автоматизована система керування, багатоканальне керування, гідроакumuлюючі генерації

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-118-126

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Базовим сегментом макро- та мікроекономіки України є продукція гірничо-металургійного виробництва. В свою чергу в цьому галузевому комплексі домінуючою є продукція гірничорудних підприємств – залізорудна сировина (ЗРС).

З ряду, як природних, так і штучних, факторів собівартість видобутку ЗРС на вітчизняних гірничорудних підприємствах постійно зростає. Основною причиною такого «зростання» є збільшення глибин видобутку та зростання цін на енергетику [1, 2].

Аналіз свідчить [3], що у загальному комплексі складових собівартості видобутку ЗРС вітчизняними гірничорудними підприємствами на даний період часу енергетичний сегмент в середньому сягає біля 30%, з тенденцією до постійного зростання. Таким чином, економіка електроенергетики гірничорудних підприємств – основа стану економіки даних підприємств взагалі і без реального рішення проблеми підвищення енергоефективності видобутку ЗРС не може бути позитиву в функціонуванні всієї галузі промисловості.

Аналіз досліджень і публікацій. Процес підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств являє собою непросту для практичної реалізації проблему. Головним моментом у загальній структурі складності рішення є унеможливлення отримання узагальненого комплекс-

ного управлінського рішення – єдиного для комплексу всіх споживачів з врахуванням повної множини технологічних і технічних факторів гірничого виробництва.

Проте, в будь-якому сучасному трактуванні спрямованості вирішення проблеми підвищення енергоефективності гірничих підприємств, базовим-стартовим варіантом, на котрий повинні будуватись всі інші надбудови, повинні бути структури електричних мереж з розподіленою генерацією електричної енергії (ЕЕ) [4].

Водночас значимо, що реструктуризація систем електропостачання з однієї схеми – централізованої на іншу – з розподіленою генерацією, це ще не вирішення проблеми підвищення енергоефективності гірничих підприємств. Як свідчать дослідження [5-7], для досягнення мети потрібно в структурі електричних мереж з розподіленою генерацією ЕЕ даних видів підприємств забезпечити обґрунтоване, з техніко-економічної точки зору, функціонування автоматизованої системи керування (АСК) розподілом потоків ЕЕ між енергоємними споживачами в годинах доби з визначенням в ці періоди варіантів видів джерел живлення: централізовані (від енергосистеми) або ж власні – автономні. Для розбудови алгоритму функціонування АСК в такому варіанті необхідна комплексна оцінка технологічних параметрів та визначення рівня їх впливу на цей процес з погляду на економічний енергоспрямований кінцевий варіант. Це формує логістику досліджень: отримання реальних параметрів функціонування комплексів: «енергопостачання – енергоспоживання» з метою розробки алгоритму роботи АСК згідно встановлених енергоорієнтованих режимів їх роботи.

Реалізація такого проєкту в умовах діючих гірничих підприємств – задача непроста, оскільки, окрім ряду організаційних перешкод на цьому шляху, додатковим важелем в проблемності розбудови технології функціонування АСК виступають фактори, що впливають на рівні споживання ЕЕ комплексом споживачів і котрі не є постійними, а в більшості своїй – непрогнозовані у межах своїх змін. Тобто, у превентивному варіанті логіка розбудови комплексу АСК «електропостачання - енергоспоживання гірничорудних підприємств» повинна орієнтуватися на системи з штучно-інтелектуальною логікою керування.

Питання керованості електроенергетичних комплексів гірничих підприємств та прийняття управлінських рішень з акцентом на економічну складову цього процесу стимулює напрямок наукового пошуку, залучаючи до цього науковців різного фаху багатьох держав світу [8, 9].

Все це дозволяє стверджувати, що спрямованість досліджень актуальна. Між тим, як у вітчизняних, так і в ряді інших доступних авторам публікаціях, відсутні або недостатньо висвітлені посилання з оцінки реального стану споживання ЕЕ та рівень впливу на цей процес конкретики технології об'єкта енергоспоживання, для якого вівся пошук. Цей факт в значній мірі унеможливорює оцінювання рівня доцільності та, що головне, ступінь реальної ефективності запропонованих рішень з кінцевим варіантом підвищення енергоефективності гірничих підприємств.

Таким чином, можна стверджувати, що адекватного рішення щодо формування «дорожньої карти» підвищення ефективності функціонування споживачів ЕЕ залізорудних підприємств не існує. При цьому, як би це не виглядало тривіально, але запропоновані в [10] цікаві за своєю суттю цілком технічні рішення априорі не дадуть очікуваного позитиву в практиці роботи гірничих підприємств.

Постановка задачі. Мета дослідження полягає у розробці логістики формування економіки «дорожньої карти» підвищення електроенергоефективності видобутку залізорудної сировини гірничорудними підприємствами шляхом застосування інтелектуально керованих електроенергетичних комплексів на основі систем електропостачання з розподіленою генерацією електричної енергії.

Розглядається питання реалізації інтелектуального керування електричною мережею з можливістю розподіленої генерації ЕЕ в умовах підприємств з підземним видобутком залізорудної сировини. Актуальність питання, постановка завдання та окремі алгоритмічно-програмні рішення розглядалися в роботах [1-5].

Викладення матеріалу та результати. Актуальність питання, постановка завдання та окремі алгоритмічно-програмні рішення в напрямку вирішення локальних задач з аналізованої проблеми розглядалися в тому числі і авторами в ряді робіт [3, 5-7, 11-15]. В даному дослідженні формально мова йде про економічну доцільність доповнення (зміну) формату структури функціонування електроприймачів з варіанту «споживач-регулятор» в варіант «споживач-регулятор-генератор електричної енергії».

З точки зору формалізації завдань керування таким об'єктом, як розподілена енергетична мережа гірничого підприємства, цей процес можна представити у вигляді структурної схеми (рис. 1).

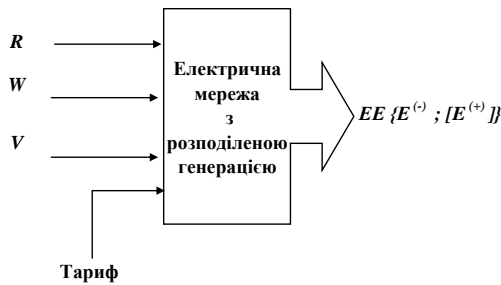


Рис. 1. Структура керування процесом електропостачання-електроспоживання для умов залізорудної шахти (R – видобуток руди; W – витрати води при водовідведенні; V – витрати повітря в режимі вентиляції; $E^{(-)}$ – генерація ЕЕ, $E^{(+)}$ – витрати ЕЕ)

При цьому зазначимо, що в форматі структури АСК електроспоживання можуть і повинні бути присутніми відповідні підсистеми: керування водовідведенням, вентиляцією, видобутку ЗРС [3, 5].

Водночас важливим повинно бути, щоб АСК не тільки керувала (розподіляла) потоками ЕЕ між споживачами в годинах доби, не порушуючи технології функціонування підприємства – варіант «споживач-регулятор» ЕЕ, а й визначала та регулювала режими живлення споживачів в відповідні періоди часу – варіант «споживач-генератор» ЕЕ.

З огляду раціональності виробничої діяльності гірничих підприємств (наприклад, залізорудних шахт або ГЗК) необхідно мінімізувати витрачання ЕЕ з огляду забезпечення енергоефективності (в т.ч. за рахунок власної генерації $E^{(+)}$). З іншого боку, треба забезпечити обов'язковість виконання контрольних завдань з видобутку ЗРС. Враховуючі всі ці фактори у якості критеріїв ефективності роботи інтелектуальної системи керування (АСК), має сенс обрати

$$\left\{ \begin{array}{l} E^{(-)} \Rightarrow \text{Min} \\ E^{(+)} \Rightarrow \text{Max} \\ \bar{R} = \sum_{i=1}^{24} R_i \geq R^* \end{array} \right. \quad (1)$$

де \bar{R} – середньодобовий видобуток руди; R_i – видобуток руди за одну відповідну годину доби ($i=1\dots 24$); R^* – певне оптимальне значення середньодобового видобутку руди.

Розглянемо можливості побудови узагальненого алгоритму АСК електроенергопотоками для двох актуальних випадків: 1 – вибіркового тарифу з обмеженнями на добове енергоспоживання на підставі угод або 2 – змінний тариф (наприклад, погодинно/24).

Виходячи із вищезазначених завдань інтелектуального керування енергоспоживанням в умовах гірничодобувних підприємств, авторами було розроблено та апробовано відповідний алгоритм (рис. 2) [3].

Блок №1 інформує про початок роботи АСК.

У блоці №2 здійснюється актуалізація чинної нормативно-правової бази України у сфері споживання та постачання електроенергії. Також тут здійснюється введення первинної інформації (поточних параметрів) відповідно до існуючих критеріїв керування та постановки завдання (1)-(10).

Умовний блок №3 перевіряє, чи є на підприємстві чинна угода (договір) з енергогенеруючою компанією на постачання ЕЕ. Якщо така угода є, то дія алгоритму продовжується з наступного блока (№4). В протилежному випадку (угоди немає) подальші розрахунки можна буде здійснювати на загальних підставах або ініціювати укладання в подальшому такої угоди (тобто, блок №5.1, Кат = {«А»} та далі блок №6).

Аналогічно умовний блок №4 перевіряє, чи є на підприємстві чинна угода (договір) з енерготранспортуючою компанією на транспортування ЕЕ. Якщо така угода є, то дія алгоритму продовжується з наступного блока (№5.2). В протилежному випадку (угоди немає) дія цього алгоритму припиняється, та подальші розрахунки можна буде здійснювати на загальних підставах або ініціювати укладання в подальшому такої угоди.

Блоки №5.1-5.2 дозволяють обрати категорію промислового споживача (зараз це категорії «А» або «Б») (тобто, Кат = {«А», «Б»}).

У блоці №6 передбачається можливість для підприємства обрати (замовити у енергогенеруючої компанії) необхідний тариф на добу (T_d) та запланований обсяг споживання ЕЕ. Замовле-

ний обсяг бажано витримати максимально точно, бо недовиконання чи навпаки – перевиконання замовленого обсягу може бути пов'язано з потенційними економічними втратами підприємства.

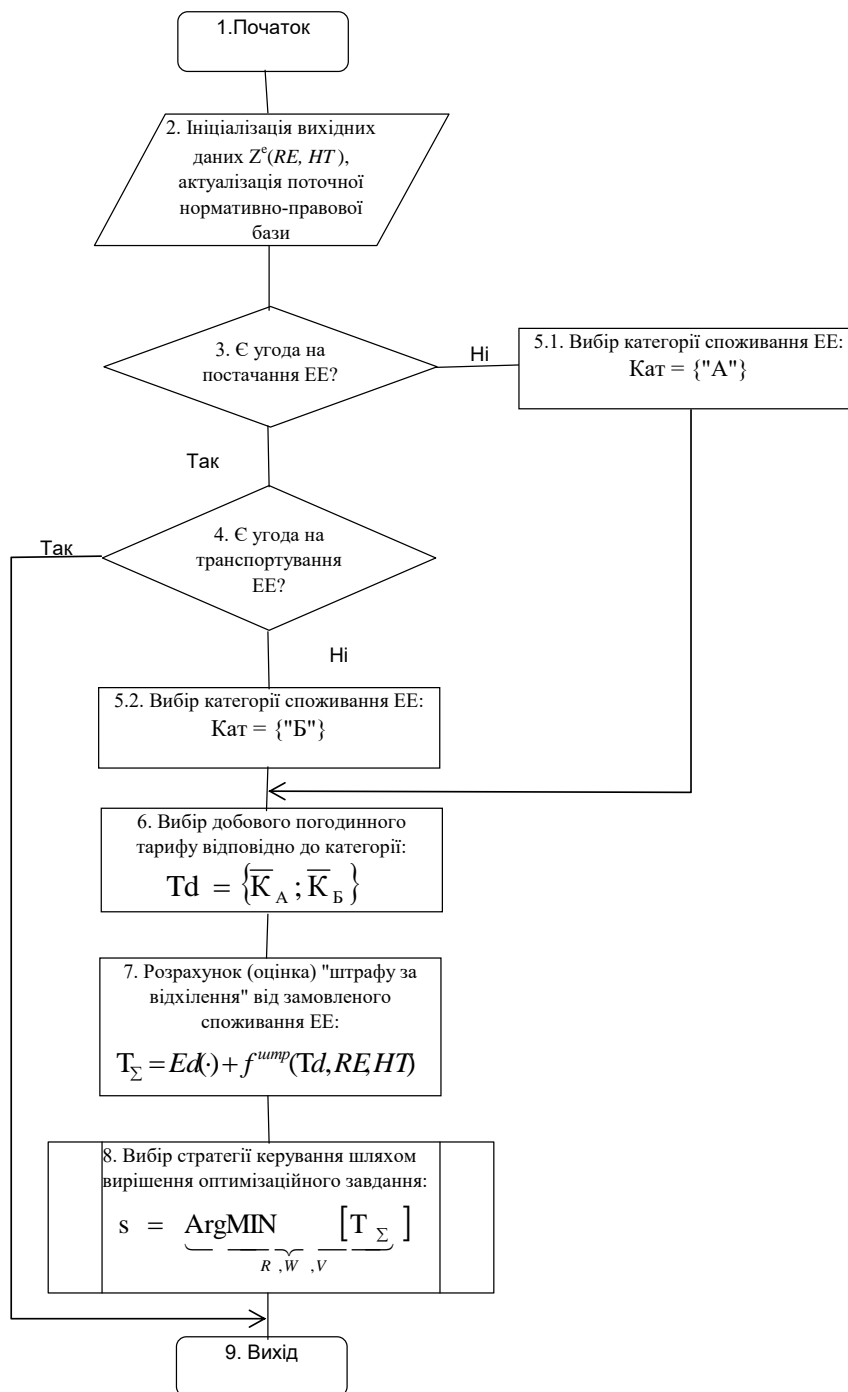


Рис. 2. Загальний алгоритм роботи автоматизованої системи керування електроенергопотоками залізорудної шахти

З урахуванням вимог виконання заявленого енергоспоживання у блоці №7 формується комплексний оціночний показник (T_{Σ}), що враховує фактичне споживання ЕЕ та спеціальну функцію «штрафу». Корисною властивістю останньої є те, що значення штрафу має наближатися до 0 («штрафу» немає, або він мінімальний), якщо зазначених відхилень немає. У протилежному випадку (позитивне або негативне відхилення) функція починає різко зростати («штраф» максимізується). Приклад, функції є [3]

$$f^{ump} = r \sum_{i=1}^{NS} \left[\frac{|\bar{T}_i - T_i^{don.}| + (\bar{T}_i - T_i^{don.})}{2} \right]^2, \quad (2)$$

де \bar{T}_i – середньодобове значення i -го тарифу; $T_i^{don.}$ – обмеження на відхилення у споживанні ЕЕ при застосуванні i -го тарифу в системі; NS – кількість встановлених тарифних інтервалів; r – коефіцієнт штрафу (ціле число, що обирається емпірично).

$$I = [E_d(R, W, V) + f^{ump}(T_d, E^{(-)}, E^{(+)})] \rightarrow MIN, \quad (3)$$

де I – результуюча функція мети; $E_d = (E^{(-)} + E^{(+)})$ – оцінка фактичного балансу (споживання, генерація) ЕЕ у системі, що оцінюється за критерієм (1); T_d – тариф діючий.

Блок №8 фактично призначений для вибору оптимальної стратегії (s) керування енергоспоживанням через вирішення оптимізаційної задачі з певними параметрами векторів станів (рис. 1). Фактичним рішенням з урахуванням базових алгоритмів (рис. 3-4) будуть такі параметри рудопотоків, водовідведення та вентиляції (R, W, V) , за яких досягається мінімальне значення цільового функціоналу типу (3):

$$s = \underbrace{\text{ArgMIN}}_{R, W, V} [I], \quad (4)$$

де s – це номер оптимальної стратегії керування відповідно до алгоритму.

Завершальний блок №9 алгоритму фактично зупиняє роботу відповідного розрахунку та дозволяє в подальшому реалізувати більш складні інтелектуальні підходи до керування енергоспоживанням:

$$Z^e = F(RE, HT) \Rightarrow \min, \quad (5)$$

де Z^e – загальні витрати підприємства за спожиту електроенергію (ЕЕ, погодинно, подобово), грн.; RE – споживання ЕЕ (погодинно, подобово), кВт; HT – часовий (0-24) тариф на ЕЕ, грн./кВт; $F(\bullet)$ – деяка визначена функціональна залежність.

Значення витрати електроенергії в системі в цілому або в окремих переділах з локального критерію цільової функції (3), таким чином, можна представити у вигляді:

$$RE = f(R, W, V), \quad (6)$$

де $f(\bullet)$ – деяка функція або апроксимація.

На рис. 3 наведено авторський приклад багатоканального нечіткого регулятора для інтелектуальної АСК енергопостачанням. У якості базового обраний 2-зонний тариф типу «Ніч/Пік». Виходячи з цього, будь-який одно- або двоканальний регулятор буде відповідним окремим випадком від цього (наприклад, як було продемонстровано в [11, 12]).

В залежності від вхідних значень R, W, V (як потенційних керуючих впливів в інтелектуальній АСК) та обраного тарифу шляхом нечіткого логічного висновку визначається фактичне енергоспоживання ЕЕ $\{E^{(-)}\}$. Причому, у разі наявності додаткової власної енергетичної генерації $\{E^{(+)}\}$, це буде також враховано у підсумковому енергетичному балансі підприємства протягом доби.

В структурній схемі (рис. 3) прийнято такі умовні позначення: $OK_{ij} \in \mathfrak{R}$ – j -й канал керування i -го ТП (наприклад, видобуток руди, водовідлив, вентиляція тощо); $i=1, \dots, N_s$; N_s – кількість ТП; $j=1, \dots, k_i$; k_i – кількість каналів керування i -го ТП; HP_{ij} – нечіткий регулятор OK_{ij} ; $V_{ij} \in \mathfrak{R}$ – вектор збурюючі впливів для OK_{ij} ; $Y_{ij} \in \mathfrak{R}$ – вектор вихідних характеристик OK_{ij} ; $U_{ij} \in \mathfrak{R}$ – вектор керуючих впливів OK_{ij} ; X_{ij} – вектор інформаційних параметрів про стан OK_{ij} ; $Y_{ij}^3 \in \mathfrak{R}$ – вектор завдань (уставок) OU_{ij} ; TP_i^* – комплекс всіх локальних ТП; $V_i^* \in \mathfrak{R}$ – вектор головних збурюючі впливів TP_i^* ; $Y_i^* \in \mathfrak{R}$ – вектор вихідних характеристик TP_i^* ; X_i^* – вектор інформаційних параметрів про поточних станів комплексу TP_i^* ; $Y_i^{*3} \in \mathfrak{R}$ – вектор завдань (уставок) для вихідних характеристик TP_i^* ; PR_i^* – прогноуюча математична модель (регресор) для i -го ТП.

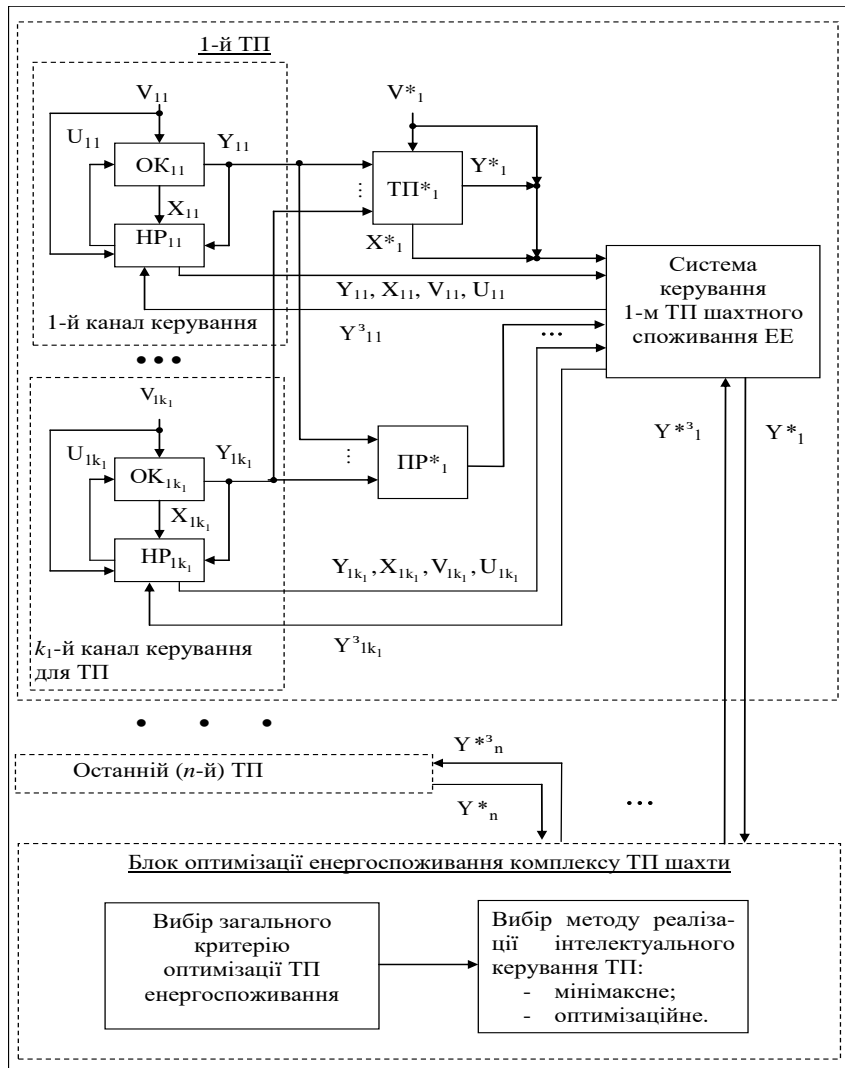


Рис. 3. Структурна схема розподіленої багатоканальної нечіткої АСК процесами електроенергоспоживання в умовах залізрудних шахт

Моделювання роботи системи автоматизованого керування електричною мережею з розподіленою генерацією. В роботі було здійснено алгоритмічно-програмну реалізацію різноманітних інтелектуальних нечітких регуляторів, а в подальшому їх апробація шляхом комп'ютерного моделювання на реальних даних підприємств з підземним видобутком руди у Кривбасі (ш. «Родіна», ш. «Октябрська», ш. «Гвардійська» тощо). Окремі результати таких випробувань наведено у роботах авторів [3, 5-7, 15].

Для моделювання роботи АСК шахтного енергоспоживання використано середовище модуля *Fuzzy Logic Toolbox* (FLT) із відомого програмного математичного пакету прикладних програм MATLAB. Для цього скористаємося стандартною методикою нечіткого моделювання, описаною в [14, 15]. Базові принципи здійснення моделювання подібних систем та доведення їх адекватності докладно розглянуті в роботах [11-15].

Моделювання одноканального керування. На рис. 4 показано результати моделювання роботи нечіткої одноканальної АСК енергоспоживання на основі одного керуючого впливу – добового водовідведення, розподіленого у часі. В ході моделювання використовувалися вихідні дані з діючих залізрудних шахт. Інші підходи до інтелектуального керування в умовах подібних підприємств (в т.ч., з альтернативними тарифами та/або каналами керування) продемонстровано в дослідженнях [28-30].

Аналіз результатів моделювання (рис. 4) та проведених аналітичних розрахунків показує, що використання двозонного тарифу веде до збільшення витрат на спожиту електроенергію на 12,88% (без АСК). Застосування АСК з Fuzzy-регулятором (FLC) на основі мінімаксних критеріїв типу (1)-(2) в умовах шахти «Родіна» (м. Кривий Ріг) дозволяє збільшити добове відкачу-

вання води на 11,9%. При цьому добове споживання електроенергії аналогічно зростає на 11,9 %, а витрати на використання електроенергії з урахуванням двозонного тарифу зменшуватимуться на 4,31 % (за рахунок раціональнішого перерозподілу за тимчасовими зонами).

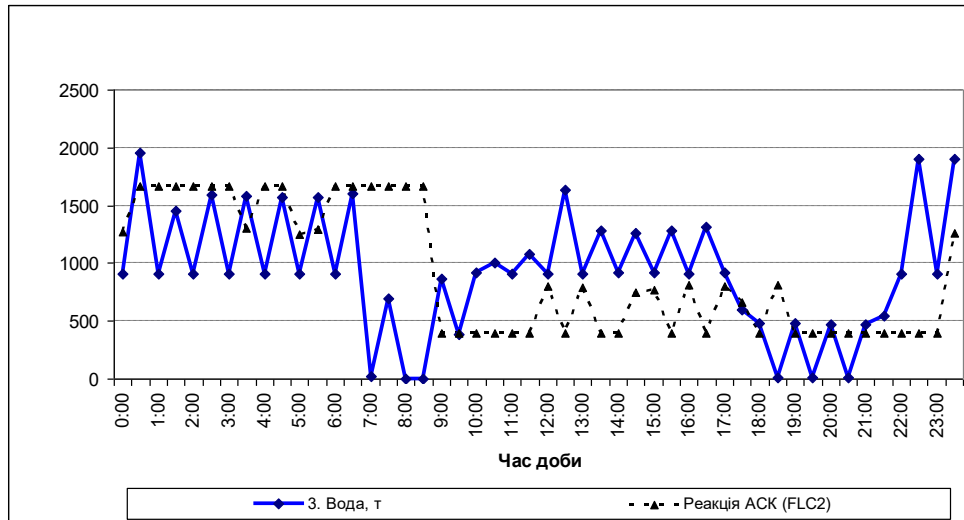


Рис. 4. Залежності з водовідведення на шахті «Родіна» (м. Кривий Ріг) як єдиного каналу керування та прогнозу відкачування води за умови мінімізації енергоспоживання

Модельовання багатоканального керування. Реалізація багатоканального керування в середовищі MATLAB з використанням структури багатоканальної нечіткої АСК (рис. 3) на підставі вихідних реальних виробничих даних показує результати аналогічні попередньому випадку (рис. 5). Зокрема, по каналах «Руда/Вода» модельна реалізація мінімаксного регулювання на основі критерію (3) показано в [13].

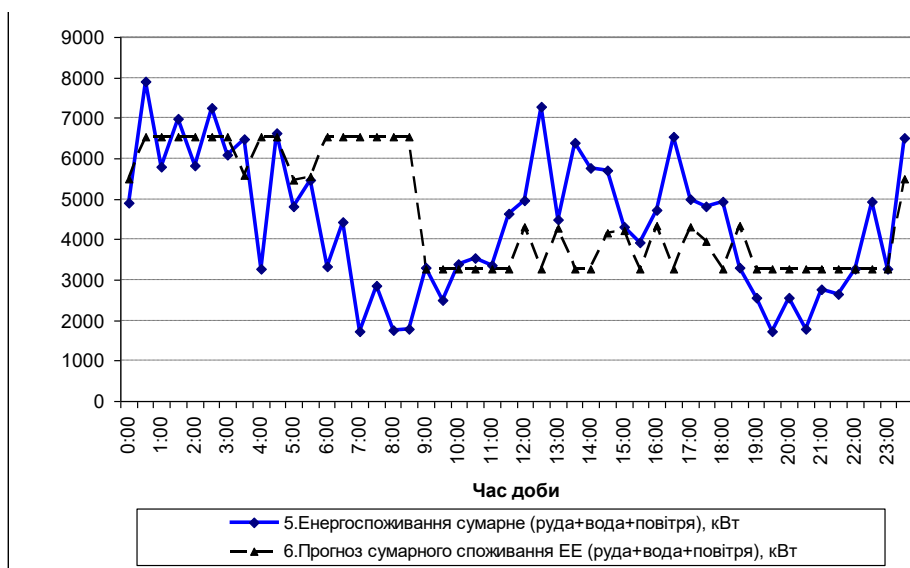


Рис. 5. Результати триканального керування («Руда-Вода-Повітря») сумарним споживанням електричної енергії в умовах шахти «Родіна» (м. Кривий Ріг) в умовах погодинного двоставкового тарифу

Результати аналізу інших розрахункових значень показують, що за умов двоставкового тарифу добові витрати зростають на 7,1% проти альтернатив [11]. Використання мінімаксного регулювання (мінімізація енергоспоживання з максимізацією добового водовідведення) каналом «Вода» призведе до зростання добового споживання приблизно на 6,97%. Однак, як було показано [12], повністю компенсується збільшенням добового видобутку сировини (приблизно +508 т/добу) [3].

Результати аналізу отриманих залежностей показують, що, на відміну від одно- та двоканального регулювання в умовах застосування двозонного тарифу за споживану ЕЕ, використання мінімаксного регулювання призведе до прогнозованого зростання добового споживання

ЕЕ приблизно на 4,45 %. Однак, як було показано у розрахунках [11-15], це повністю компенсується збільшенням загальної ефективності. Одночасно добові витрати на спожиту ЕЕ будуть знижені на 2,5% через раціональніший розподіл рудо-/водо-/повітря-потоків за основними технологічними переділами. Отже, застосування триканального нечіткого керування з можливістю узгодженого керування (рудопотоками, водовідливом та вентиляцією) є найбільш ефективним в умовах підземного видобутку залізорудної сировини.

Моделювання роботи АСК в режимі генерації ЕЕ. В режимі додаткової генерації ЕЕ з'являється можливість часткової компенсації сумарного енергоспоживання за рахунок додаткової енергії з гідроакumuлюючих джерел. На рис. 6 наведено результати моделювання роботи АСК (на прикладі шахти «Родіна») в 4-х режимах.

Аналіз результатів моделювання свідчить про можливість скорочення споживання ЕЕ при роботі у більш прогресивних режимах (3 – 4) на 26-35% (в умовах шахти «Родіна») (рис. 6).

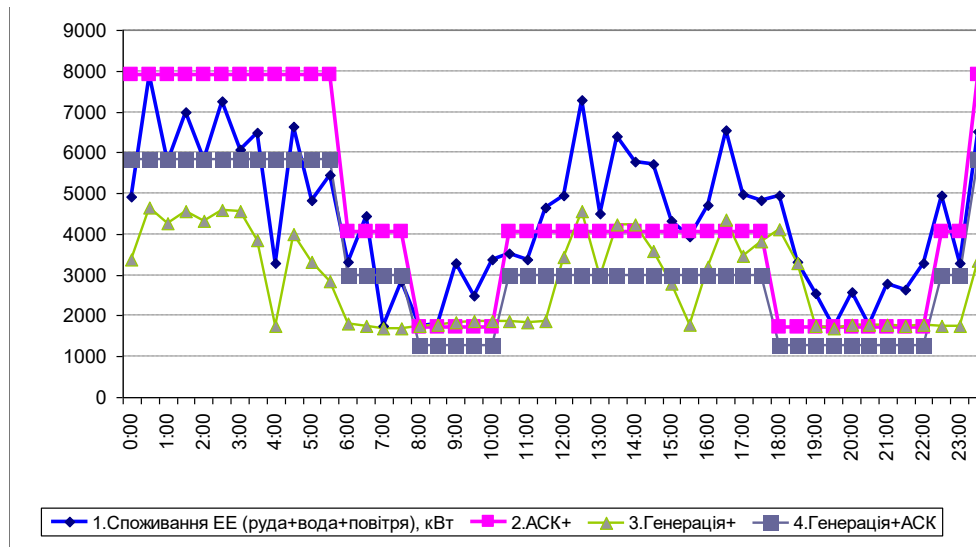


Рис. 6. Результати моделювання роботи ш. «Родіна» в таких режимах: 1 – звичайний режим (без застосування інтелектуального керування та додаткової генерації); 2 – із застосуванням інтелектуального керування але без додаткової генерації; 3 – із застосуванням додаткової генерації, але без застосування інтелектуального керування; 4 – із застосуванням інтелектуального керування та додаткової генерації

Висновки та напрямок подальших досліджень. Процес підвищення енергоефективності функціонування електроенергетичних комплексів та систем залізорудних шахт має базуватись на структурах електричних мереж з розподіленою генерацією електричної енергії за умови інтелектуального автоматизованого керування електроенергопотоками.

Алгоритм функціонування, як сама структура АСК, повинні корегувати з погодинними тарифами на електричну енергію та технологічними параметрами функціонування енергоємних споживачів. В такому варіанті слід очікувати:

використання двоставкового («Ніч/Пік») тарифу без застосування нечітких АСК веде до збільшення добових витрат на спожиту електричну енергію на 12,88 % при одноканальному регулюванні водовідведення і відповідно на 7,1 % при двоканальному керуванні рудопотоком та водовідливом одночасно (однак, застосування нечітких регуляторів дозволяє компенсувати ці втрати);

застосування АСК з нечітким 3-х канальним регулюванням рудопотоку, водовідливу та вентиляції дозволяє в умовах двоставкового тарифу (за рахунок більш раціонального перерозподілу за добовими інтервалами) скоротити витрати на спожиту електричну енергію (наприклад, за даними шахти «Родіна», зі збільшенням добового споживання ЕЕ на 4,45 % (загальні витрати скорочуються 2,5 %).

Моделювання роботи нечітких АСК показало потенційні можливості для зниження загального енергоспоживання на 15-35% в режимах додаткової гідроакumuлюючої генерації ЕЕ (досліджувався двоставковий тариф) в умовах різних підприємств з підземним видобутком залізорудної сировини.

Список літератури

1. Вілкул Ю.Г. Сучасний стан залізорудної галузі, прогноз розвитку та пропозиції / Ю.Г. Вілкул, А.А. Азарян, В. А. Колосов, Ф. І. Караманець, А. С. Батарєєв // Качество минерального сырья. Сб. науч. тр., Кривой Рог: ФЛП Чернявский Д. А., 2017. – Т. 1, С. 9-24.
2. Ступнік М.І. Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу / М.І. Ступнік, М.Б. Федько, С.В. Письменний та ін // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 47, С. 3-8. DOI: [10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2018-1-47-3-8).
3. Sinchuk I., Budnikov K., Krasnopolsky R. Fundamentals of integrating smart technologies for controlling power systems at iron ore underground mining enterprises / Monograph. – Warsaw: PE Shcherbatykh A.V., 2021. – 127 s.
4. Закон України «Про ринок енергії» № 1931-IX від 02.12.2021, с. 103.
5. Sinchuk O. Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines / Sinchuk O., Sinchuk I., Beridze T., Filipp Y., Budnikov K., Dozorenko O., Strzelecki R. // Mining of Mineral Deposits, 2021. – Volume 15, Issue 4. – pp. 25-33. <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>
6. Сінчук О.М. До проблеми створення синергетичних електроенергетичних комплексів з піковими гаєс на основі доводильних систем залізорудних шахт / О.М. Сінчук, Ю.Б. Філіпп, І.О. Сінчук, О.Ю. Михайленко, К.В. Будніков, Р.І. Краснопольський // Гідроенергетика України, 2021. – №3–4, С. 83–89.
7. Sinchuk O.M., Woiko S.M., Sinchuk I.O. та ін. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems. Multi-authored monograph. – Warszawa: iScience Sp. z. o. o., 2018. – 77 p.
8. Wu T., Shieh S., Jang S., Liu C. Optimal energy management for a petrochemical plant under considerations of uncertain power supplies / IEEE Transactions on Power Systems, 2005. – 20(3), pp. 1431-1439. DOI: [10.1109/tpwrs.2005.852063](https://doi.org/10.1109/tpwrs.2005.852063)
9. Brand EL, Vosloo J., Mathews E. Automated energy efficient project identification in the gold mining industry. Proceeding of the 13th Conference on the Industrial and Commercial use of Energy. 2015, pp. 17-22. DOI: [10.1109/ICUE.2015.7280241](https://doi.org/10.1109/ICUE.2015.7280241)
10. Mike Rycroft. Small pumped water storage systems: a new partner for renewable energy. Technology&business for development 2017. Електронний ресурс: URL: <https://www.ee.co.za/article/small-pumped-water-storage-systems-new-partner-renewable-energy.html>.
11. Бодяньський Є.В. Методи обчислювального інтелекту в системах керування технологічними процесами феросплавного виробництва / Бодяньський Є.В., Кученренко Є.І., Михальов О.І., Філатов В.О., Гасик М.М. // Монографія. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2011. – 420 с.
12. Мееров М.В. Многосвязные системы управления / М.В. Мееров, А.В. Ахметзянов, Я.М. Берщанский и др.; под ред. М.В. Меерова. – М.: Наука, 1990. – 264 с.
13. Молчанов А.А. Моделирование и проектирование сложных систем. – К.: Вища школа, 1988 – 359 с.
14. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления; пер. с англ. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004 – 832 с.
15. Kupin A., Senko A. Principles of intellectual control and classification optimization in conditions of technological processes of beneficiation complexes / CEUR Workshop Proceedings 1356, 2015. – pp. 153-160

Рукопис подано до редакції 11.11.2021

УДК 622.794.4:621.3.025

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., С.О.КРАДОЖОН, аспірант
Криворізький національний університет

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ УСТАНОВКИ ДЛЯ КОМБІНОВАНОЇ СУШКИ ПРОДУКТІВ ЗБАГАЧЕННЯ ПРЯМИМ ВПЛИВОМ ЗМІННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Мета. Метою даної роботи є розробка рекомендацій по промислового використання методу сушки тонкодисперсних продуктів збагачення.

Методи дослідження. У роботі використані методи математичного моделювання та математичної статистики при перевірці результатів теоретичних розрахунків, отриманих для визначення параметрів установки для комбінованої сушки тонкодисперсних матеріалів прямим впливом змінного електричного струму.

Наукова новизна. Вперше розроблений метод розрахунку конструктивних та технологічних параметрів сушильної установки тонкодисперсних продуктів збагачення пропусканням змінного електричного струму.

Практична значимість. При мокрих процесах збагачення корисних копалин виникає необхідність зневоднення тонкодисперсних продуктів (концентратів, хвостів, шламів). При цьому існуючі методи зневоднення не завжди можуть забезпечити необхідну кінцеву вологість таких продуктів, або мають високі енергетичні затрати і шкідливі для екології, як наприклад термічна сушка. Існують проблеми, пов'язані з будовою парового середовища осадів, так як дослідження його являє собою складну задачу. Найбільші труднощі виникають при сушці шламових осадів, які