

О.М. СІНЧУК, д-р техн. наук, проф., О.Ю. МИХАЙЛЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
А.І. КУПІН, д-р техн. наук, проф., І.І. ПЕРЕСУНЬКО, канд. техн. наук,
В.Д. БАРАНОВСЬКИЙ, аспірант, Криворізький національний університет

НЕЧІТКА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ «ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ - ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ» В ЕНЕРГОСИСТЕМАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ШАХТ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Статтю присвячено питанню підвищення енергоефективності роботи гірничорудних підприємств за рахунок зниження складової витрат на електроенергію у собівартості видобутої залізорудної сировини. Це досягається здійсненням розподіленої генерації електроенергії з інтелектуальним керуванням комплексом «енергопостачання – енергоспоживання».

Мета. Мета роботи полягає у розробці інтелектуальної системи керування комплексом «електропостачання – енергоспоживання» гірничорудних підприємств з розподіленою генерацією електричної енергії на основі нечіткої логіки для підвищення енергоефективності видобутку залізорудної сировини.

Методи дослідження. Для проведення даного дослідження були використані такі методи: аналіз, систематизація, узагальнення - з метою вивчення та узагальнення досвіду побудови інтелектуальних систем керування електропостачанням; синтез - для розробки нечіткої системи керування процесами «електропостачання–енергоспоживання»; комп'ютерне моделювання для визначення чисельних значень економічних показників роботи інтелектуальної системи керування енергосистемою гірничого підприємства з розподіленою генерацією.

Наукова новизна. Розроблено нечітку систему керування комплексом «електропостачання - енергоспоживання» гірничорудного підприємства та визначений раціональний порядок її роботи з точки зору економічного показника чистої приведеної вартості.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для покращення енергоефективності роботи навіяних систем електропостачання гірничорудних підприємств, що видобувають залізорудну сировину.

Результати. Синтезовано структуру схеми розподіленої багатоканальної нечіткої системи керування енергосистемою та алгоритми її дії. Досліджено економічну ефективність інтелектуальної системи керування у різних варіантах живлення споживачів гірничорудного підприємства, а саме: при автономному живленні від джерел розподіленої генерації у години пік та при додатковому живленні від джерел розподіленої генерації (разом з централізованим) у години дії максимального навантаження і години пік. Дослідження показало, що за чистою наведеною вартістю ефективнішою є нечітка система керування, яка дефіцит потужності, визначений піковим тарифом або рівнем енергоспоживання, покриває за рахунок раціонального задіяння ресурсів розподіленої генерації.

Ключові слова: гірничорудне підприємство, енергосистема, розподілена генерація, нечітка система керування, інтелектуальна система керування, відновлювані джерела енергії, економічна ефективність, чиста приведена вартість.

doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-46-53

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

З ряду як природних, так і штучних факторів, собівартість видобутку залізорудної сировини на вітчизняних гірничорудних підприємствах постійно зростає. Основною причиною цього є збільшення глибин видобутку та зростання цін на електроенергію [1, 2].

Аналіз [3] свідчить, що у загальному комплексі складових собівартості видобутку залізорудної сировини українськими гірничорудними підприємствами на даний період часу енергетичний сегмент в середньому сягає біля 30% та спостерігається виражена тенденція постійного зростання. Без реального рішення проблеми підвищення енергоефективності видобутку залізорудної сировини не може бути позитиву в функціонуванні всієї гірничорудної промисловості.

Процес підвищення енергоефективності гірничорудних підприємств являє собою непросту для практичної реалізації проблему. Головним моментом у загальній структурі складності рішення є унеможливлення отримання узагальненого комплексного 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 котрим і на котрий повинні базуватись всі інші надбудови, повинні бути структури електричних мереж з розподіленою генерацією електричної енергії (ЕЕ) [4].

Водночас зазначимо, що реструктуризація систем електропостачання з однієї схеми - централізованої на іншу - з розподіленою генерацією, це ще не вирішення проблеми підвищення енергоефективності гірничих підприємств. Реалізація такого проекту, сама по собі, в умовах діючих гірничих підприємств, задача не проста, оскільки окрім ряду організаційних перешкод на цьому шляху, потрібно одночасно керувати великою кількістю джерел живлення та споживачів. Функціонування автоматизованої системи керування (АСК) ускладнене факторами, які впливають на рівні споживання електроенергії комплексом споживачів, які 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.

Аналіз досліджень і публікацій. Як свідчать дослідження [5-17] для розробки якісної інтелектуальної АСК комплексом «енергопостачання - енергоспоживання» гірничорудного підприємства з розподілом потоків потужності між енергоємними споживачами в годинах доби потрібно забезпечити обґрунтоване, з техніко-економічної точки зору, визначення раціональних варіантів живлення в певні періоди: централізованого (від енергосистеми) або автономного (від власних джерел). Для розбудови алгоритму функціонування АСК у такому варіанті необхідна комплексна оцінка технологічних параметрів та визначення рівня їх впливу на цей процес, з погляду на економічний енергоспрямований кінцевий варіант. Це формує логіку досліджень: отримання реальних параметрів функціонування комплексів: «енергопостачання - енергоспоживання» з метою розробки алгоритму роботи АСК згідно встановлених енергоорієнтованих режимів їх роботи.

Питання керованості електроенергетичних комплексів гірничих підприємств та прийняття рішень з акцентом на економічну складову цього процесу, стимулює напрямок наукового пошуку, залучаючи до цього науковців різного фаху багатьох держав світу [18-20].

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

Актуальність питання, постановка завдання та окремі алгоритмічно-програмні рішення в напрямку вирішення локальних задач проблеми, яка аналізується, розглядалися авторами в ряді робіт [3,4,20]. У даному дослідженні формально мова йде про економічну доцільність доповнення (зміну) формату структури функціонування електроприймачів з варіанту «споживач – регулятор» у варіант «споживач - регулятор - генератор електричної енергії».

Постановка задачі. Мета дослідження полягає у розробці інтелектуальної системи керування комплексом «електропостачання - енергоспоживання» гірничорудних підприємств з розподіленою генерацією електричної енергії на основі нечіткої логіки для підвищення енергоефективності видобутку залізорудної сировини.

Викладення матеріалу та результати. З огляду формалізації завдань керування таким об'єктом як енергосистема гірничого підприємства з розподіленою генерацією, то цей процес можна представити в вигляді структурної схеми (рис. 1).

При цьому зазначимо що аналізована АСК повинна не тільки керувати (розподіляти) потоками ЕЕ між споживачами в годинах доби не порушуючи технології функціонування підприємства - варіант споживач-регулятор ЕЕ, а й визначати та регулювати режим живлення споживачів в відповідні періоди часу - варіант споживач-генератор ЕЕ.

З огляду раціональності виробничої діяльності гірничих підприємств необхідно оптимізувати обсяги споживання ЕЕ з огляду забезпечення енергоефективності (у 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 критерію ефективності роботи інтелектуальної системи керування (ІСК) має сенс обрати

$$\left\{ E^{(-)} \rightarrow \min; E^{(+)} \rightarrow \max; \bar{R} = \sum_{i=1}^{24} R_i \geq R^* \right\}, \quad (1)$$

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



Рис. 1. Структура керування процесом електропостачання-електроспоживання підприємства з підземним видобутком залізорудної сировини (R - видобуток руди; W - витрати води при водовідведенні; V - витрати повітря в режимі вентиляції; $E^{(+)}$ - генерація ЕЕ, $E^{(-)}$ - витрати ЕЕ)

На рис. 2 наведено авторський приклад багатоканального нечіткого регулятора для інтелектуальної ІСК енергопостачанням. У якості базового обраний 2-зонний тариф типу «Ніч/Пік».

«Ніч/Пік».

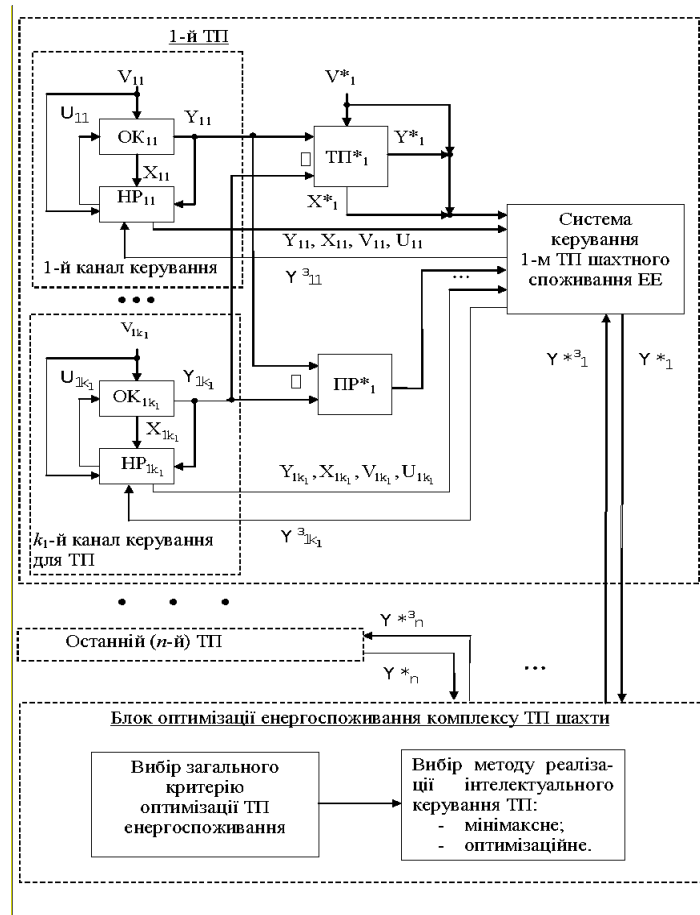


Рис. 2. Варіант структури схеми розподіленої багатоканальної нечіткої системи керування процесами шахтного електроенергоспоживання. Умовні позначення: $OK_{ij} \in \mathcal{R}$ - j -й канал керування i -го ТП (наприклад, видобуток руди, водовідлив, вентиляція тощо); $i=1, \dots, N_s$; N_s - кількість ТП; $j=1, \dots, k_i$; k_i - кількість каналів керування i -го ТП; HP_{ij} - нечіткий регулятор OK_{ij} ; $V_{ij} \in \mathcal{R}$ - вектор збурюючі впливів для OK_{ij} ; $Y_{ij} \in \mathcal{R}$ - вектор вихідних характеристик OK_{ij} ; $U_{ij} \in \mathcal{R}$ - вектор керуючих впливів OK_{ij} ; X_{ij} - вектор інформаційних параметрів про стан OK_{ij} ; $Y_{zj} \in \mathcal{R}$ - вектор завдань (уставок) OV_{ij} ; TP_i^* - комплекс всіх локальних ТП; $V_i^* \in \mathcal{R}$ - вектор головних збурюючі впливів TP_i^* ; $Y_i^* \in \mathcal{R}$ - вектор вихідних характеристик TP_i^* ; X_i^* - вектор інформаційних параметрів про поточних станів комплексу TP_i^* ; $Y_{zi}^* \in \mathcal{R}$ - вектор завдань (уставок) для вихідних характеристик TP_i^* ; PR_i^* - прогноуюча математична модель (регресор) для i -го ТП

Виходячі з цього, будь який одно- або двоканальний регулятор буде відповідним приватним випадком від цього (наприклад, як було продемонстровано в [20]).

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

Для визначення рівня доцільності реалізації концепції розподіленої генерації електроенергії в енергосистемі гірничодобувного підприємства необхідно визначити базові економічні показники, що досягаються при її практичному впровадженні, та порівняти їх із показниками інших варіантів організації роботи електроенергетичного комплексу «електропостачання - енергоспоживання»

Під час проведення експериментів розглядалися такі системи керування енергоспоживанням:

повне покриття потреб виробничих об'єктів шахти в електроенергії за рахунок її придбання у компанії, яка здійснює зовнішнє електропостачання (Grid);

електропостачання виробничих об'єктів під час дії пікового тарифу лише від власних об'єктів розподіленої генерації (DG), а решту часу від зовнішньої електричної мережі (peak off). Таким чином, моделюється ручна система керування за часом доби;

постійне комбіноване електропостачання від системи розподіленої генерації та зовнішньої електромережі (DG+Grid) зі збільшенням частки виробництва власної електроенергії у періоди дії максимального навантаження та пікового тарифу (peak shaving). Цей підхід відповідає концепції Smart Grid.

Дві останні включають нечітку систему керування комплексом «енергопостачання – енергоспоживання» гірничорудного підприємства.

Дані варіанти побудови системи електропостачання порівнюються за показником чистої наведеної вартості (Net Present Value - NPV), який використовується для оцінки доцільності інвестицій у проекти

$$NPV = \sum_{i=1}^N \frac{R_i}{(1+d)^i}, \quad (2)$$

де R_i - різниця між прибутком та витратами на експлуатацію системи, грн; d - розрахункова ставка; N - кількість років експлуатації системи.

Враховуючи, що розглядається окремо лише енергосистема підприємства та не передбачається продаж електроенергії, яка вироблена об'єктами розподіленої генерації, зовнішнім споживачам, то при визначенні значення NPV використовуються лише розрахункові показники: вартість електроенергії придбаної у електропостачальній компанії, капітальні витрати на придбання та монтаж генеруючого обладнання, а також річні експлуатаційні витрати та вартість планово-попереджувальних ремонтів. Оскільки доходна частина відсутня, то NPV завжди прийматиме негативне значення. Переважним буде варіант системи, при якому NPV буде найменшим. Для зручності використовується модульне значення витрат.

Узагальнені результати моделювання наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати моделювання показників роботи систем керування електропостачанням

| Конфігурація системи керування електропостачанням | NPV, грн | Потужність отримана з мережі, кВт·год/день | Витрати на придбання електроенергії, грн/день | Капітальні витрати на придбання генеруючого обладнання, грн | Потужність, що виробляє система розподіленої генерації кВт·год/день | Відсоток використання ВДЕ, % |
|---|-------------|--|---|---|---|------------------------------|
| Grid | 41712216,39 | 168295 | 13351,28 | 0 | 0 | 0 |
| Grid+DG (peak off) | 30313247,75 | 138895 | 9233,23 | 540842,4 | 29400 | 17,47 |
| Grid+DG (peak shaving) 400 | 29718943,26 | 127825,72 | 8866,25 | 744472,74 | 40469,27 | 24,05 |
| Grid+DG (peak shaving) 300 | 25251400,52 | 108265,29 | 7123,92 | 1104306,48 | 60029,71 | 35,69 |

Розглянемо окремі варіанти організації системи керування електропостачанням детальніше. На рис. 3 представлено показники роботи енергосистеми шахти при здійсненні електропостачання тільки від зовнішньої електромережі.

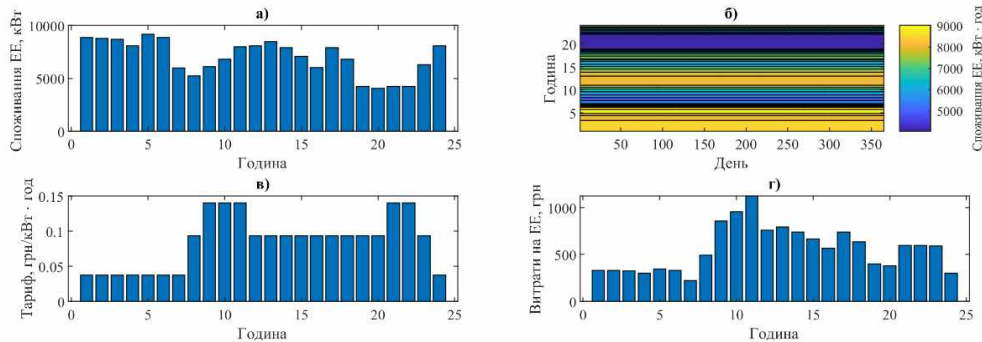


Рис. 3. Показники роботи електроенергетичної системи залізорудної шахти під час електропостачання лише від зовнішньої електричної мережі: *а* - добовий графік електричних навантажень; *б* - річний графік електричних навантажень; *в* - тариф на електроенергію; *г* - витрати на придбання електроенергії

Добовий графік електричних навантажень (рис. 3) отримано шляхом вимірювання енергоспоживання шахти «Батьківщина». Прийнято припущення, що аналогічний графік характерний для інших днів на рік (рис. 3б). Дане припущення є досить грубим, проте з метою якісного порівняння економічних показників різних систем ймовірнісними характеристиками споживаної потужності вирішено знехтувати.

Сумарні витрати на придбання електроенергії, визначені за графіком, наведеним на рис. 3г), становлять 168295 кВт·год/день.

Зазначимо, що найбільші витрати на електроенергію припадають на ранкові та денні години, коли високе енергоспоживання і діють піковий та напівпіковий тарифи. Незважаючи на суттєве енергоспоживання у нічний час, витрати на придбання досить низькі через величину нічного тарифу за спожиту ЕЕ.

Далі було розраховано два варіанти, які передбачають використання власних об'єктів генерації для електропостачання споживачів. Прийнято, що встановлена потужність устаткування, що генерує, достатня для повного покриття дефіциту потужності, величина якого визначена системою керування енергоспоживанням в залежності від режиму роботи. Враховуючи, що ця потужність для різних варіантів системи неоднакова, то капітальні витрати на придбання, монтаж, а також вартість обслуговування генеруючого обладнання пропорційні необхідному власному річному виробленню електроенергії. Прийнято ставку на порядок меншу, ніж «зелений тариф», що діє для альтернативних електростанцій, зведених у 2020-2021 роках та становить 0,0504 грн/кВт·год.

Раніше наведені добовий та річний графіки електричних навантажень, а також тарифи, диференційовані за часом, були використані при обчисленнях економічних показників систем, що включають об'єкти розподіленої генерації.

На рис. 4 показано результати обчислень для системи, в якій здійснюється автономне електропостачання під час дії пікового тарифу. Частка розподіленої генерації за такого підходу становить 17,47 %.

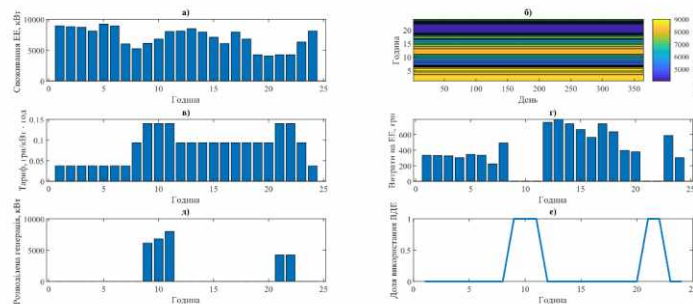


Рис. 4. Показники роботи електроенергетичної системи залізорудної шахти під час автономного електропостачання в години пік (peak off): *а* - добовий графік електричних навантажень; *б* - річний графік електричних навантажень; *в* - тариф на електроенергію; *г* - витрати на придбання електроенергії; *д* - вироблення електроенергії власними об'єктами розподіленої генерації; *е* - частка використання відновлюваних джерел енергії

Зміна чистої наведеної вартості такої системи, порівняно з іншими, протягом розглянутого періоду експлуатації 15 років наведено на рис. 5. Зниження показника NPV для системи, що реалізує peak off підхід, на відміну від електропостачання тільки від зовнішньої електричної мережі становило 27,33 %.

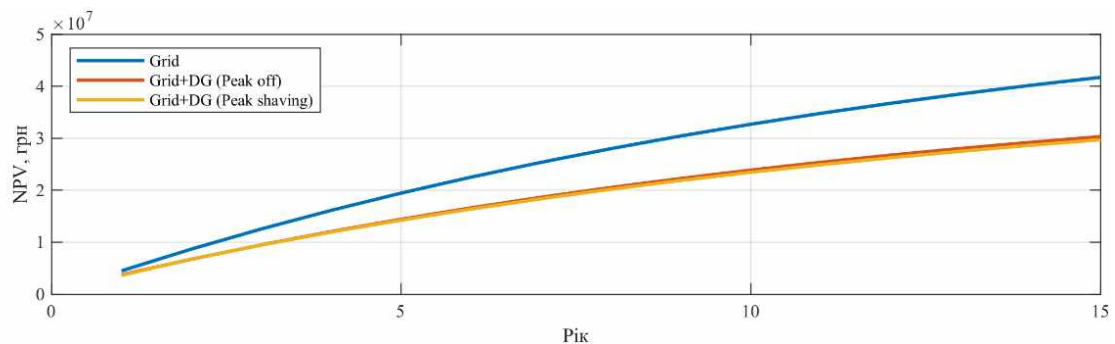


Рис. 5. Чиста наведена вартість систем керування процесом електропостачання типової залізорудної шахти протягом 15 років їх використання

Враховуючи, що основне енергоспоживання не завжди припадає на пікові години і енерговитрати залишаються досить високими і під час дії напівпікового тарифу, ефективність такої системи є досить обмеженою.

При використанні системи керування, алгоритм якої підтримує обмеження витрат на придбання електроенергії (peak shaving) у електропостачальній компанії на рівні 400 грн/годину, зростає частка використання об'єктів власної генерації на 6,58 % до 24,05 % (див. рис. 6). Показник чистої наведеної вартості знижується, проте незначно лише на 1,96 %, якщо порівняти з peak off системою.

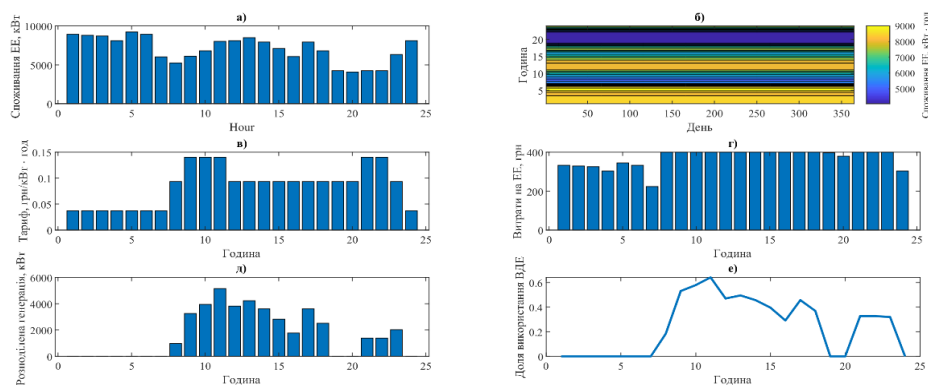
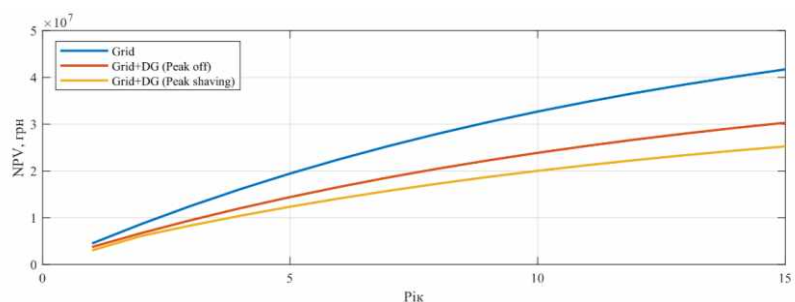


Рис. 6. Показники роботи електроенергетичної системи залізорудної шахти при обмеженні енерговитрат підприємства (peak shaving) на рівні 400 грн/год: *a* - добовий графік електричних навантажень; *б* - річний графік електричних навантажень; *в* - тариф на електроенергію; *г* - витрати на придбання електроенергії; *д* - вироблення електроенергії власними об'єктами розподіленої генерації; *е* - частка використання відновлюваних джерел енергії

Зменшивши обмеження на придбання електроенергії до 300 грн/год в цінах на 2021 року (табл. 1) значення наведеної вартості системи зменшується до 25251400,52 грн., що на 15,06 % менше, ніж при обмеженні 400 грн/год і на 16,7 % - ніж за автономного електропостачання в години дії пікового тарифу (рис. 7).

Рис. 7. Чиста наведена вартість систем керування електропостачанням типової залізорудної шахти протягом 15 років їх використання

Це досягається за рахунок того, що обмеження діє протягом усього дня, а не лише у певний час. Ця об-



ставина дозволяє зменшити енергоспоживання із зовнішньої мережі в моменти високих енерговитрат. Зазначимо, що таке зниження не може відбуватися необмежено, тому що зумовлює зростання потужності, яку повинна виробляти система розподіленої генерації і, як наслідок, збільшення вартості генеруючого обладнання, що нівелює економічний ефект від зниження витрат на придбання електроенергії. Оптимізація енергосистеми з цього погляду є предметом наступних майбутніх досліджень.

Висновки. Моделювання роботи нечітких систем керування показало потенційні можливості для зниження загального обсягу електроенергоспоживання на 15-35% в режимах додаткової гідроакумуючої генерації ЕЕ (досліджувався двоставковий тариф) в умовах різних підприємств з підземним видобутком залізорудної сировини.

Дослідження комплексних економічних показників роботи систем керування електропостачанням залізорудних шахт показало, що найбільш ефективною з точки зору чистої наведеної вартості є система, що здійснює введення в роботу об'єктів власної генерації для вироблення електроенергії, необхідної для покриття дефіциту потужності, обумовленого високим чинним тарифом або рівнем споживання електроенергії. Як наслідок, витрати на придбання електроенергії у зовнішньої електропостачальної компанії обмежуються на певному рівні (peak shaving). Визначальну роль у процесі практичної реалізації систем електропостачання з розподіленою генерацією відіграє допустимий рівень матеріальних витрат. При його високому значенні чиста наведена вартість практично дорівнює або вище, ніж NPV при автономному електропостачанні в години пік. Це пов'язано з тим, що рівень власної генерації є досить низьким і витрати на придбання електроенергії дуже суттєві. У цьому випадку високий NPV системи керування обумовлений високим NPV зовнішньої мережі. З іншого боку, при дуже низькому значенні NPV системи також високий через необхідність високої генерації і, як наслідок, високих витрат на купівлю, монтаж і обслуговування на потужність силового обладнання, що виробляється, що значно перевищує дисконтовану вартість придбаної електроенергії. У цьому випадку високий NPV системи керування обумовлений загальним високим NPV системи розподіленої генерації. Тому знаходження оптимальних умов функціонування системи керування електропостачанням гірничорудного підприємства має здійснюватися адресно для кожного конкретного випадку.

Список літератури

1. Вілкул Ю.Г., Азарян А.А., Колосов В.А., Караманиць Ф.І., Батарєв А.С. Сучасний стан залізорудної галузі, прогноз розвитку та пропозиції. *Якість мінерального сировини*. Сб. науч. тр. 2017. Т.1. - С. 9-24.
2. Ступнік М.І., Федько М.Б., Письменний С.В. та ін. Проблеми розкриття та підготовки рудних родовищ на глибоких горизонтах шахт Кривбасу. *Вісник Криворізького національного університету*. Вип. 47. 2018. С. 3-8.
3. Sinchuk I., Budnikov K., Krasnopolsky R. Fundamentals of integrating smart technologies for controlling power systems of iron ore underground mining enterprises. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2021. - 123 p.
4. Жаркін А.Ф., Денисюк С.П., Попов В.А. Системи електропостачання з джерелами розподіленої генерації. Київ: «Наукова думка» НАН України, 2017.
5. Синчук О.Н., Купин А.И., Синчук И.О., Козакевич И.А., Дозоренко О.В. Оптимизация энергопотребления в условиях железорудных шахт на основе применения нечеткой логики. *Электричні і енергозберегаючі системи*. Вип. 3(47). 2019, С. 58–65.
6. Sinchuk O., Kupin A., Sinchuk I., Rohoza M., Plieshkov P. Certain aspects concerning the development of a functioning scheme of the automated system to control energy flows of underground iron-ore enterprises. *Mining of Mineral Deposits*, Vol. 14(3). 2020. - pp. 101-111.
7. Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. **А.В. Праховник, В.П. Розен, В.В. Дегтярев**, М.: Недра, 1985. - 232 с.
8. Pivnyak G., Samusia V., Oksen Y., Radiuk M. Efficiency increase of heat pump technology for waste heat recovery in coal mines. *New Developmenta in Mining Engineering*. 2015. pp. 1–4. DOI: 10.1201/b19901-2.
9. Автоматизация управления промышленным энергообеспечением. **Э.А. Соскин, Э.А. Киреева**. М.: Энергоиздат, 1990. - 384 с.
10. **Волинець В.І.** Аналізування ефективності споживання електроенергії вугільними шахтами. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Енергетична безпека навколишнього середовища». Луцьк. РВВ ЛНТУ. 2012. - С. 35-36.
11. **Розен В.П., Соколовська І.С., Іншеков Є.М., Стоянова І.І.** Удосконалення механізму впровадження директиви 2012/27/EU про енергоефективність шляхом адаптації міжнародних стандартів з енергоменеджменту на національному рівні. *Проблеми загальної енергетики*. Вип. 4 (43). 2015. - С. 52-57.

12. Wu T., Shieh S., Jang S., Liu C. Optimal energy management for a petrochemical plant under considerations of uncertain power supplies. IEEE Transaction on Power Systems, 20 (3), 2005, pp. 1431–1439. DOI: 10.1109/tpwrs.2005.852063
13. Brand H., Vosloo J., Mathews E. Automated energy efficiency project identification in the gold mining industry. Proceeding of the 13th Conference on the Industrial and Commercial use of Energy (ICUE). 2015, pp. 17-22. DOI: 10.1109/ICUE.2015.7280241.
14. Батраков Д.В. Анализ и особенности способов повышения энергоэффективности шахтных насосных водоотливных установок средствами электропривода / Гірничий вісник, 2013. - Вип. 96. - С. 271-75.
15. Рухлова Н.Ю. О проблеме эффективного электропотребления главным водоотливом шахты. Гірничая електромеханіка та автоматика. 2012. Вип. 89. С. 141-145.
16. Pujades E., Orban P., Bodeux S., Archangeau P., Erpicum S., Dassargues A. Underground pumped storage hydropower plants using open pit mines: How do groundwater exchanges influence the efficiency. Applied Energy. 2017. Vol. 190. pp. 135–146. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.12.093.
17. Menéndez J., Fernández-Oro J.M., Loredó J. Economic Feasibility of Underground Pumped Storage Hydropower Plants Providing Ancillary Services. Applied Sciences. 2020. Vol. 10(11). P. 3947. DOI:10.3390/app10113947.
18. Biloshytskiy M., Tatarchenko H., Biloshytska N., Uvarov P. Operational lifetime increase of the pumping equipment when pumping-out contaminated groundwater. Mining of Mineral Deposits, 2021. - Vol. 15(1). pp. 42-49. DOI: 10.33271/mining15.01.042.
19. Разумный Ю.Т., Ильченко Е.С. Проблемы использования водоотливных установок угольных шахт в качестве потребителей-регуляторов. Гірничая електромеханіка та автоматика, 2004. - Вип. 73. - С. 20-23.
20. Sinchuk O., Kupin A., Sinchuk I., Kozakevych I., Peresunko I. Simulating of fuzzy controlling of power streams in conditions of underground extraction of iron ore / Праці XVI міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми сучасної електротехніки – 2020 (ПСЕ-2020)». 8-12 червня 2020. Київ: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського».

УДК 622.235:622.271

О.П. СТРИЛЕЦЬ, гірничий інженер, директор Центру з підривних робіт
Національного технічного університету (Дніпровська політехніка)
Г.І. ЄРЕМЕНКО, канд. техн. наук, доц., Д.А. ТІТОВ, магістр, АГН України
С.М. ГЕНКУЛЕНКО, гірничий інженер, головний інженер ТОВ «РУДОМАЙН»

АНАЛІЗ СЕЙСМОБЕЗПЕКИ СПОРУДЖЕНЬ КРИВБАСУ ЗА УМОВ ВИБУХОВИХ РОБІТ ПРИ ЗМЕНШЕНІЙ САНІТАРНО-ЗАХИСНІЙ ЗОНІ КАР'ЕРУ «ПІВДЕННИЙ» ТОВ «РУДОМАЙН»

Основна мета дослідження полягає в удосконаленні методу оцінки вібрації, зумовленої короткоуповільненим підриванням свердловинних зарядів, заснованого на визначенні максимальної маси вибухової речовини в групі уповільнення для розрахунку схем комутації блоків в кар'єрі «Південний» ТОВ «Рудомайн», що забезпечить допустимі значення швидкості сейсмічних коливань ґрунту на межі санітарно-захисної зони для будівель і споруд м. Кривий Ріг.

Методами дослідження є апаратна реєстрація сейсмічних проявів масових технологічних вибухів у кар'єрі та математичне моделювання фізичних коливальних процесів на базі реєстраційних таблиць та матриць у прив'язці до динамічних реакцій активованих вибухом елементів споруджень, розташованих в зоні його сейсмічного впливу.

Наукова новизна дослідження полягає в установленні закономірностей сейсмічного впливу масових вибухів кар'єру «Південний» ТОВ «РУДОМАЙН» на будівлі та споруди за умов здійснення вибухових робіт при зменшеній санітарно-захисній зоні. Вдосконалено методику розрахунку сейсмомобезпечної маси вибухових речовин в групі уповільнення на основі експериментального визначення коефіцієнта умов проведення вибуху K , який залежить від гірничо-геологічних та технологічних умов проведення вибуху в кар'єрі, а також – поширення сейсмічних хвиль від блоку до будівель та споруд.

Практичне значення: прогнозування параметрів вібрації ґрунту в основі будівель та споруд на базі експериментально встановленого коефіцієнта умов проведення вибуху K дозволяє більш точно визначати максимальну масу вибухових речовин (ВР) в ступені уповільнення, що надає можливість одночасно підривати більшу їх масу в межах одного блоку, розподіляючи її на групи зарядів, що не перевищують максимально допустиму сейсмомобезпечну масу. Це дозволяє збільшити масу вибухових речовин на один масовий вибух та зменшити кількість масових вибухів і їх вплив на будівлі, які знаходяться на межі санітарно-захисної зони кар'єру.

Результат. Допустима швидкість сейсмічних коливань ґрунту будівель, наближених до межі санітарно захисної зони кар'єру «Південний» ТОВ «РУДОМАЙН», при частоті нижче 20 Гц складає 0,4 см/с, що відповідає II балам за шкалою MSK-64. Такі коливання не становлять загрози житловим будівлям, що перебувають в задовільному стані.