

С.М. БОЙКО, канд. техн. наук,
Кременчуцький льотний коледж Національного авіаційного університету
І.О. СІНЧУК, канд. техн. наук, доц., А.П. СІНОЛИЦІЙ,
Є.О. НЕСМАШНИЙ, доктори техн. наук, професори, О.В. ДОЗОРЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ В УМОВАХ РОЗПОДІЛЬЧИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Мета. Метою даної роботи є аналіз особливостей прогнозування рівнів електроспоживання в умовах залізорудних підприємств при впровадженні розподільчих електричних мереж з відновлювальними джерелами електроенергії, на основі аналізу графіків прогнозу генерації енергетичними установками на базі відновлювальних джерел енергії в умовах залізорудних підприємств та процесу електроспоживання приймачами цих підприємств.

Методи дослідження. У статті для прогнозування рівнів електроенергоспоживання приймачами залізорудних підприємств при впровадженні в існуючі структури систем електропостачання відновлюваних джерел енергії використовувався метод штучних нейронних мереж.

Наукова новизна полягає в тому, що запропоновано прогнозувати рівні енергоспоживання за допомогою нейронних мереж в умовах розподільчих мереж залізорудних підприємств та при впровадженні в їх структуру відновлювальних джерел енергії.

Практична значимість. Фактори, що впливають на ефективність погодинного прогнозу, включають прогнозний горизонт, місцеві погодні умови, географічне охоплення, доступність, якість даних та інші. З огляду на той факт, що система електропостачання залізорудного підприємства планується бути комбінованою – це ускладнює процес прогнозування електроспоживання, оскільки із загальної спожитої електричної енергії необхідно віднімати власну згенеровану електричну енергію. На сьогодні розроблено велику кількість методів прогнозування електроспоживання, проте не існує універсального методу, так як об'єкт прогнозування, має унікальний характер електроспоживання і складні залежності між електроспоживанням і факторами, що на них впливають. Тому обґрунтовано, що при короткостроковому і довгостроковому прогнозуванні слід віддавати перевагу штучним нейронним мережам, що покращить точність прогнозу в умовах багатофакторності.

Результати. Запропоновано підхід до вирішення цієї проблеми, який базується на реалізації прогнозу моделі для оцінки очікуваних рівнів електроспоживання з врахуванням функціонування в структурі систем автономних джерел генерації електричної енергії на основі відновлювальних джерел електроенергії. Запропоновано тактику оцінювання існуючих та очікуваних рівнів споживання електроенергії приймачами залізорудних підприємств з підземним способом видобутку залізорудної сировини, з подальшим втіленням цього процесу в структуру керування процесом електроспоживання. Це дозволить підприємствам збільшити енергоефективність та зменшити витрати на споживану електроенергію.

Ключові слова: електропостачання, електроспоживання, прогнозування, відновлювані джерела енергії, штучні нейронні мережі.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-24-29

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними результатами. Макроекономіка України, як держави, розвивається та формується на сировинній базі. Однією з основних базових формувань такого економічного формату є залізорудна галузь [1].

Продукція цієї галузі – залізорудна сировина (ЗРС), будучи в свою чергу сировиною для металургійної галузі, щорічно дозволяє поповнити валютні запаси країни на 50-60% та водночас є базовою складовою системо-утворюючого процесу формування ВВП [2].

Залізорудна сировина (сира руда, аглоруда) видобувається як відкритим (кар'єр), так і підземним (шахта, рудник) способами. Залізорудні підприємства гірничорудної галузі відносяться до класу енергоємних. Встановлені електричні потужності підприємств з відкритими способами видобутку в середньому становлять 30 МВт, а підземні – 3 МВт. З ряду відомих причин з 1991 по 2001 р. спостерігалась стійка тенденція зменшення рівнів споживання ЕЕ по всім без виключення залізорудним підприємствам України [3].

Проте в останні роки цей процес стабілізувався. В [4] приведені графіки споживання електроенергії (ЕЕ) рядом залізорудних підприємств з підземними способами видобутку ЗРС. Як свідчить різниця в рівнях споживання за останні п'ять років в гірничому видобутку не перевищувала 30 %. Між тим рівень впливу обсягів споживання ЕЕ на показники собівартості видобутку ЗРС щорічно зростає, чого не скажеш про ціну цього продукту на світовому ринку сировини. Перед залізорудними підприємствами постала важлива задача – вирішення проблеми міні-

мізації росту частки енергозатрат в загальному комплексі ціни собівартості ЗРС. Вирішення цієї задачі лежить в площині комплексності пошуку результату.

Встановлені рядом досліджень результати пошуку напрямків підвищення електроенергоєфективності видобутку ЗРС [4-11] виділили, проміж інших, найбільш ефективний напрямок – включення в структуру систем електропостачання залізрудних підприємств автономних джерел ЕЕ на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ). Тобто по суті необхідно перебудувати системи електропостачання з централізованого виду живлення на так звані варіанти розподільчих мереж. Така синергетика систем живлення приймачів ЕЕ в структурі енергетичного комплексу електропостачання-електроспоживання передбачає значне зниження матеріальних затрат (в 2-3 рази) підприємств за спожитою енергією від генеруючих компаній. Водночас в такому варіанті, в свою чергу, можуть бути свої підваріанти [12-14].

Та все ж незалежно від варіантів, в т.ч. від їх кількості, важливим моментом в досягненні очікуваного рівня ефективності цього процесу є прогнозування необхідних рівнів генерування та обсягів споживання ЕЕ, а точніше адаптивна реакція на ці зміни з боку самого підприємства. Це пов'язано з тим, що прогнози обсягів споживання електричної енергії використовуються для формування щорічних зведених балансів виробництва і споживання електричної енергії. Баланси виробництва і споживання електричної енергії, в свою чергу, є основою для формування графіків ремонту устаткування і т.д.

Між тим, короткострокові прогнози споживання в свою чергу є основою для формування диспетчерських графіків. Одночасно визначаються необхідні обсяги та розміщення резервів потужності в єдиній енергетичній системі підприємства.

Узгоджені графіки споживання і генерації є найважливішими показниками, що визначають основні аспекти їх роботи – графіки вироблення електроенергії станціями з урахуванням резервів, склад генеруючого обладнання, обсяги купівлі та продажу електроенергії і потужності на ринку.

Планування споживання здійснюється на основі прогнозу сумарного показника і кожної компоненти, при цьому структура споживання повинна бути збалансована на кожному етапі і рівні планування. Обсяги вихідних даних і моделі прогнозів для різних компонент можуть бути різними. Виникає необхідність розробки адаптивної системи моделей прогнозування та планування споживання, застосовної на різних стадіях і ланках планування.

Між тим, така ідеологія, яка швидше відноситься до організаційних заходів, не може бути достатньою для досягнення реального ефекту.

Цікавим доповненням до вищезазначених слів може бути впровадження в практику роботи залізрудних підприємств автономних джерел енергії на основі існуючих ресурсів самих підприємств. Перш за все необхідно зробити акцент на маючі місце в підземних умовах водопритоках і штучному нагнітання повітря в гірничі виробки.

Саме на цих джерелах можливо і необхідно створювати автономні джерела енергії, включивши їх в структуру систем електропостачання-електроспоживання даного гірничого підприємства.

Аналіз досліджень і публікацій. Як показали результати досліджень авторів, достатньо ефективним в напрямку впровадження відновлюваних джерел енергії є створення гідроакуюлюючих міні- та мікроелектростанцій на базі водовідливів шахт, кар'єрів та збагачувальних комплексів, вітроенергетичних станцій та сонячних електростанцій [6].

Відповідно до закону України «Про ринок електричної енергії» від 13.04.2017, № 2019-VIII, починає діяти ринок купівлі електроенергії «на добу вперед» зі штрафами за неподання прогнозів або за невиконання наданих прогнозів. У Законі відсутні механізми збору та аналізу даних для короткострокового прогнозу генерації відповідно до потреби в електроенергії.

Також слід зазначити, що довгостроковий, короткостроковий і оперативні прогнози споживання електроенергії вимагають різних методик. Для реалізації довгострокових прогнозів потрібні сценарні підходи для оцінки загальноекономічної ситуації, галузевих тенденцій розвитку і т.п. Для короткострокових прогнозів важливий облік метеофакторів, характеру дня (робочий, вихідний), стану режиму енергосистеми в найближчій ретроспективі. При оперативному прогнозуванні в темпі процесу потрібні адаптивні моделі прогнозу.

Постановка завдання. Розробка тактики оцінювання існуючих та очікуваних рівнів споживання ЕЕ приймачами залізничних підприємств з підземним способом видобутку ЗРС з подальшим втіленням цього процесу в структуру керування процесом електроспоживання.

Виклад матеріалу та результати. Отже, основна проблема прогнозування генерації ВДЕ в умовах ЗРП в порівнянні із традиційними джерелами, є недостовірність прогнозів споживання енергії ЗРП плюс власне проблеми короткострокового прогнозування метеоумов «на добу вперед», що фактично впливає на погодинне прогнозування генерації.

Слід відзначити, що ця проблема наразі не вирішена остаточно. В ряді відомих публікацій пропонуються алгоритми і програмні комплекси, але загальноновизнаних «стандартів галузі» для прогнозування генерації ВДЕ немає.

Між тим, фактори, що впливають на ефективність погодинного прогнозу, включають прогнозний горизонт, місцеві погодні умови (що впливають на мінливість ресурсів ВДЕ), географічне охоплення, доступність даних (наприклад, обсяг, місце розташування, способи і надійність надання інформації) та якість даних (наприклад, узгодженість за часом, точність, розбивку і корекцію за охопленням території) та інші.

Точність прогнозів ВДЕ зазвичай збільшується при більш коротких інтервалах часу отримання значень оброблених поточних метеоданих. Наприклад, для погодинного прогнозування в межах помилки до $\pm 5\%$ потрібно мати дані для прогнозування з розбивкою на 15 хв, які в свою чергу повинні використовувати для розрахунків мінімум 9 серій поточних даних. Тобто, практично, свіжі дані від метеостанцій повинні надходити і оброблятися щохвилини [6].

У свою чергу, ЗРП постають як динамічні системи, що розвиваються у часі і просторі, стан яких визначається сукупністю різних гірничо-геологічних і технологічних факторів, що характеризують умови виробництва. Однак, врахувати всі чинники при визначенні електроспоживання тим чи іншим окремим механізмом неможливо, так як майже кожен з них рідко залишається режимно постійним навіть протягом нетривалого часу, а окремі фактори непередбачувано впливають на цей процес.

В результаті аналізу можливості впровадження ВДЕ у складі локальних енергетичних систем (ЛЕС) було виявлено, що ЛЕС на базі ВДЕ, впливають на розподільні мережі в ЛЕС та перетворюють їх на активні елементи. Це призводить до необхідності внесення змін у прийнятті стратегії управління ЛЕС та планування структури і режимів локальних енергетичних систем. При цьому їхній вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно заздалегідь ґрунтовно досліджувати та аналізувати питання приєднання ВДЕ до ЛЕС в залежності від умов експлуатації та особливостей технологічного процесу електроприймачів ЗРП [6].

До складу запропонованої системи електропостачання входить наступне устаткування: вітрові мініелектростанції (ВМЕС), батарея акумуляторів, що служить для накопичення електроенергії при роботі ВДЕ для живлення системи її управління (або, за необхідності, як резервне джерело живлення); перетворювальна апаратура, у випадку використання генератора змінної напруги, що служить для перетворення електроенергії від ВДЕ у постійний струм для живлення інвертора й заряду акумуляторних батарей і постійного струму від акумуляторів напруги змінного струму зі стандартними параметрами (рис. 1).

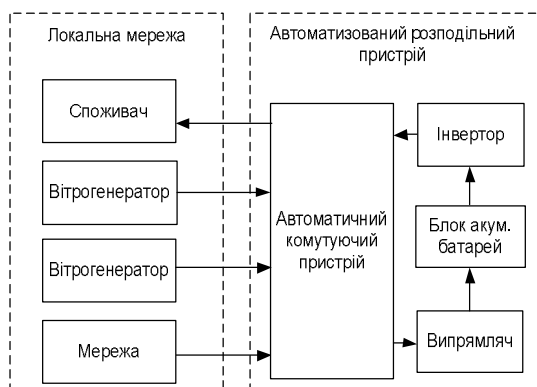


Рис. 1. Структурна схема системи локального електропостачання на базі відновлювальних джерел електроенергії

Таким чином спожита підприємством потужність за умови використання ЛЕС на базі ВДЕ в системі електропостачання дорівнює:

$$S_{П} = S_{ПС} + \left(\sum_{i=1}^n S_{ВЕС} + \sum_{i=1}^n S_{СЕС} + \sum_{i=1}^n S_{ГЕС} \right), \quad (1)$$

де $S_{ПС}$ – спожита електрична енергія промислового підприємства з енергосистеми, $S_{ВЕС}$ – згенерована потужність ВЕС; $S_{СЕС}$ – згенерована потужність СЕС; $S_{ГЕС}$ – згенерована потужність ГЕС.

З огляду на той факт, що система електропостачання комбінована – це ускладнює процес прогнозування електроспоживання, оскільки із загальної спожитої електричної енергії необхідно віднімати згенеровану ЕЕ ЛЕС. Аналізуючи графіки прогнозу генерації електричної енергії вітроенергетичної установки в умовах залізорудної підприємства та електроспоживання цих підприємств, можна зробити висновок про те, що реалізація короткострокового і оперативного (добового) прогнозування значно ускладнюється (рис. 2, 3).

До теперішнього часу розроблено велику кількість методів прогнозування електроспоживання, проте не існує універсального методу, який міг би з однаковим успіхом застосовуватися для різних типів об'єктів. Це викликано тим, що будь-який об'єкт прогнозування, чи то регіональна енергосистема або конкретне промислове підприємство, має унікальний характер електроспоживання і складні залежності між електроспоживанням і факторами, що на нього впливають. У зв'язку з цим виникає завдання вибору методики прогнозування електроспоживання, що володіє задовільною якістю прогнозу [15].

Сезонна модель авторегресійного проінтегрованого змінного середнього (АРПЗС) (ARIMA) дозволяє прогнозувати нестационарні циклічні тимчасові ряди [5-7].

Результат прогнозування електроспоживання на добу цеху ЗРП зображено на рис. 2.

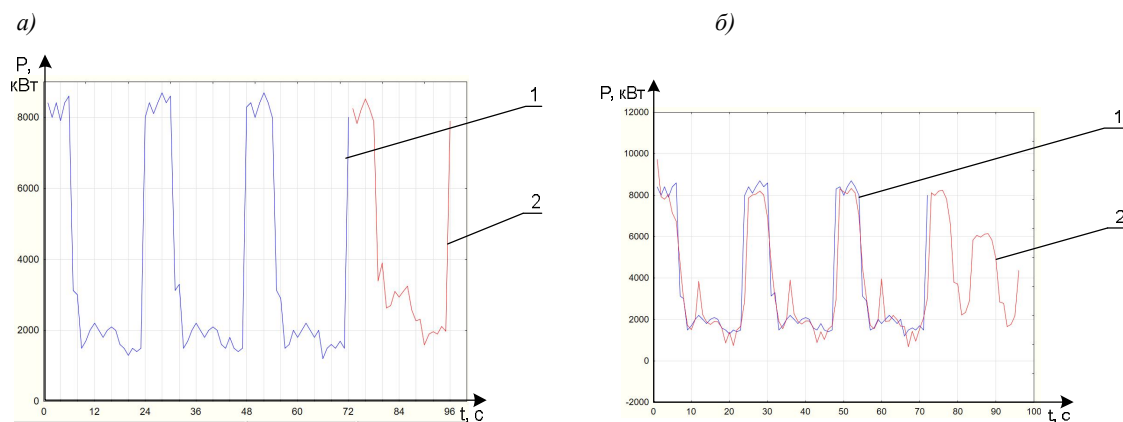


Рис. 2. Погодинний прогноз електроспоживання на добу цеху залізорудного підприємства: а – за методом АРПЗС, б – за методом експоненціального згладжування (1 – факт, 2 – прогноз)

Між тим, метод експоненціального згладжування найбільш ефективний при розробці середньострокових прогнозів. Він прийнятний при прогнозуванні тільки на один період вперед. Його основні переваги простота процедури обчислень і можливість обліку ваги вихідної інформації. Робоча формула методу експоненціального згладжування:

$$S_t = a \cdot \gamma_t + (1 - a) \cdot S_{t+1}, \quad (2)$$

де t – період, що передуює прогнозу; $t+1$ – прогнозний період; S_{t+1} – прогнозований показник; a – параметр згладжування; γ_t – фактичне значення досліджуваного показника за період, що передуює прогнозу; S_t – експоненціально зважена середня для періоду, що передуює прогнозу.

З поміж інших, прогноз за допомогою штучних нейронних мереж, з математичної точки зору є найбільш функціональним.

Вхідний шар нейронів слугує для введення значень вхідних змінних, вихідний шар – для виведення результатів.

Побудова даного прогнозу реалізована у пакеті «St Neural Networks» (рис. 3).

Отже, аналізуючи дослідження різних методів прогнозування, було встановлено, що методи відрізняються швидкістю обчислень, похибкою отриманого прогнозу, кількістю необхідних даних для точного прогнозування та ін.

У той же час, все ж перевагу слід віддавати штучним нейронним мережам, так як головними їх перевагами є те, що вони можуть апроксимувати будь-яку нелінійну функцію з відповідним ступенем точності, мають здатність до адаптації, створення асоціативних зв'язків і навчання. Також вони застосовуються при короткостроковому і довгостроковому прогнозуванні.

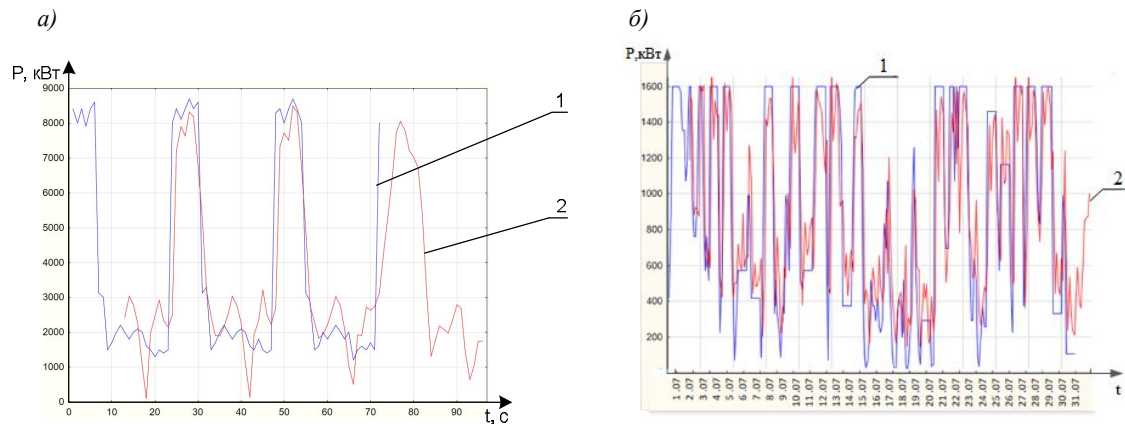


Рис. 3. Графіки прогнозу електропостачання та електроспоживання в умовах залізорудного підприємства з використанням штучних нейронних мереж: *а* – почогодинний прогноз електроспоживання на добу цеху залізорудного підприємства, *б* – прогноз генерації електричної енергії вітроенергетичної станції (1 – факт, 2 – прогноз)

Висновки та напрямок подальших досліджень. В умовах залізорудних підприємств актуальним та реально можливим напрямком підвищення електроенергоєфективності видобутку ЗРС є впровадження в загальну структуру систем електроживлення локальних систем на базі відновлюваних джерел енергії.

Для прогнозування рівнів електроенергоспоживання приймачами залізорудних підприємств при впровадженні в існуючі структури систем електропостачання відновлюваних джерел енергії необхідно вирішити багатокритеріальну задачу з використанням методу штучних нейронних мереж.

Запропоновано тактику оцінювання існуючих та очікуваних рівнів споживання ЕЕ приймачами залізорудних підприємств з підземним способом видобутку ЗРС з подальшим втіленням цього процесу в структуру керування процесом електроспоживання. Це дозволить підприємствам збільшити енергоєфективність та зменшити витрати на споживану ЕЕ.

Список літератури

1. Шидловський А.К. Геоелектроенергетика України / Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Рогоза М.В., Випанасенко С.І. Навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет. 2002. – 282 с.
2. Дослідження техніко-економічних показників гірничодобувних підприємств України та ефективності їх роботи в умовах змінної кон'юнктури світового ринку залізорудної сировини: Монографія / Є.К. Бабець, І.С. Мельникова, С.Я. Гребенюк, С.П. Лобов; за ред. Є.К. Бабця; НДГРІ ДВНЗ «КНУ». – Кривий Ріг: Вид. Р.А. Козлов, 2015. – 391 с.
3. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises' electricity supply systems. Multi-authored monograph / O.M. Sinchuk, S.M. Boiko, I.O. Sinchuk, F.I. Karamanyts, I.A. Kozakevych, M.L. Baranovska, O.M. Yalova; Edited by DSc., Prof. O.M. Sinchuk. – Warsaw: iScience Sp. z o. o. – 2018. – 77 p.
4. Sinchuk, O., Sinchuk, I., Boiko, S. Control system power consumption of the mining enterprises with the purpose of increasing electroenergoinvest Technical Electrodynamics 2016, № 6, P. 60–62.
5. Системи електропостачання з джерелами розподіленої генерації: Монографія / А.Ф. Жаркин, С.П. Денисюк, В.А. Попов; за ред. С.Е. Ноткиной; Інститут електродинамики НАН України. – Київ: Вид. Нова думка, 2017. – 231 с.
6. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): Монографія / Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманич Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О; Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.
7. S. Tabatabaee. Investigation of droop characteristics and X/R ratio on small-signal stability of autonomous microgrid / H.R. Karshenas, A. Bakhshai // Proc. 2nd Power Electron., Drive Syst. Technol. Conf. 2011. P. 223–228.
8. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startceva T.B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods // RNSPE, 10-14 September, 2001, Proceedings. Kazan: Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. P. 440-442.
9. Baumann T., Germond A. Application of the Kohonen Network to Short-Term Load Forecasting. IEEE 0-7803-1217-1. 1993. P.407-412.
10. Carpenter G., Grossberg S. A Massively Parallel Architecture for a Self-Organizing Neural Pattern Recognition Machine // Computer Vision, Graphics and Image Processing. 1987. Vol.37.
11. Chen S.T., David C.Y., Moghaddamjo A.R. Weather sensitive short-term load forecasting using non fully connected artificial neural network // IEEE Trans. on Power Systems. 1992. Vol. 7, No 3. P. 1098 – 1105.
12. European Smart Grids Technology Platform: vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future. – European Commission, 2006. – 44 p.

13. **Barker P.P.** Determining the impact of distributed generation on power systems: Part 1. Radial distribution systems / P.P. Barker, R.W. de Mello // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Conference Proceedings. – 2000. – Vol. 3. – P. 1645–1656.

14. **Vovos P.N.** Centralized and distributed voltage control: impact on distributed generation penetration / P.N. Vovos, A.E. Kiprakis, A.R. Wallace, G.P. Harrison // IEEE Transactions on Power Systems. – 2007. – Vol. 22, N 1. – P. 476–493.

15. **Кузнєцов М.П.** Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями / М.П. Кузнєцов // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 3. – С. 42–48.

Рукопис подано до редакції 10.04.2019

УДК 622.271

В.В. ПЕРЕГУДОВ, д-р техн. наук, проф., директор,

І.Є. ГРИГОР'ЄВ, канд. техн. наук, заст. директора, ДП «ДП «Кривбаспроект»

Ю.І. ГРИГОР'ЄВ, канд. техн. наук, асистент, Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКІВ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ НАСИПНОГО ТИПУ

Мета. Стан відкритих гірничих робіт, що склався на вітчизняних підприємствах, а також кон'юнктура на ринку мінеральної сировини вимагають пошуку нових, економічно доцільніших підходів до ведення відкритих гірничих робіт. Таким підходом є комплексне освоєння надр, що сприяє покращенню техніко-економічних показників роботи гірничо-видобувних підприємств. Цілеспрямоване формування техногенних родовищ із необхідними параметрами і подальше їх відпрацювання є одним з основних напрямів комплексного освоєння, а визначення цих параметрів і дослідження їх взаємозв'язків є науковою задачею даної публікації.

Методи. В роботі було використано методи патентного пошуку, аналізу літературних джерел для вивчення технології формування і відпрацювання техногенного родовища, регресійного аналізу і математичного моделювання головних параметрів техногенного родовища.

Наукова новизна. В роботі досліджено залежності оптимальних значень місткості та виробничої потужності техногенного родовища, що забезпечують найкращі техніко-економічні показники формування та відпрацювання техногенного родовища. Доведено, що питома собівартість формування та відпрацювання техногенного родовища знаходяться у прямій залежності від його місткості і зворотній – від виробничої потужності. Виявлено, що місткість техногенного родовища має більший вплив на питому собівартість формування та відпрацювання техногенного родовища, ніж його виробнича потужність. Виконано математичне моделювання головних параметрів техногенного родовища.

Практична значимість. Отримані результати досліджень головних параметрів техногенних родовищ можуть бути використані проектними організаціями і гірничодобувними підприємствами при проектуванні. Математичні залежності дозволять більш ґрунтовно визначати головні параметри техногенних родовищ і підвищать точність технічних рішень проектних інститутів.

Ключові слова: техногенне родовище, собівартість формування і відпрацювання техногенного родовища, місткість техногенного родовища, виробнича потужність техногенного родовища, математична модель, регресійний аналіз.

doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-105-29-34

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. В результаті діяльності гірничодобувної та гірничо-переробної промисловостей на поверхні планети накопичилися мільярди кубічних метрів відходів виробництва у вигляді розкритих порід, шлаків, шлаків, золи тощо, які посилюють екологічне навантаження, а тому проблема їх утилізації має світове значення. При цьому, Україна має потужну гірничорудну промисловість і займає сьоме місце у світі за обсягами виробництва мінеральної сировини, тому проблема утилізації відходів для неї має першорядне значення. З українських надр щорічно видобувається більше 2 млрд. т гірської маси, 60-70% якої складається у відвали. Однак, рівень використання відходів виробництва сягає лише 12-15%, в той час як в передових країнах світу він досягає 80%. Тенденція використання вторинних ресурсів спостерігається в США, Японії, Канаді, Великобританії, Франції, Німеччині, ПАР та інших індустріально розвинутих країнах.

Для умов Криворізького залізорудного басейну, який є одним з найбільших гірничодобувних регіонів світу, питання комплексного освоєння родовищ й залучення у вторинну переробку відходів гірничого виробництва набуває все більшої значущості. За різними оцінками, у відва-