

УДК 681.5:330.46

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ РУДОПОТОКУ НА ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОМУ КОМБІНАТІ В УМОВАХ БАГАТОЗОННОГО ТАРИФУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ**К. В. Пряжнікова, І. А. Белкіна, Є. В. Кочура**

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»

просп. Дмитра Яворницького, 19, м. Дніпро, 49600, Україна. E-mail: pryagnikov@gmail.com

Проведено моделювання процесу виробництва концентрату та його енергоємності з обґрунтуванням економічної ефективності використання тризонного тарифу на електроенергію. Розроблено модель проходження руди через всі технологічні ланки гірничо-збагачувального комбінату. Досліджено зміни потужності у часі на виході зі збагачувальної фабрики з урахуванням тризонного тарифу на електроенергію. Управління роботою бункеру здійснювалось завдяки регулюванню необхідного значення запасів у бункері в момент часу, що в свою чергу забезпечило вплив на ритмічність подачі руди на збагачувальну фабрику – найбільш енергоємну ланку гірничо-збагачувального комбінату. За результатами моделювання виявлено доцільність подальших досліджень щодо можливості впровадження управлінського впливу на гірничо-збагачувальному комбінаті.

Ключові слова: енергоспоживання, динаміка, рудопоток, моделювання.**МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РУДОПОТОКА НА ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНОМ КОМБИНАТЕ В УСЛОВИЯХ МНОГОЗОНАЛЬНОГО ТАРИФА НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ****Е. В. Пряжникова, И. А. Белкина, Е. В. Кочура**

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет»

пр. Дмитрия Яворницкого, 19, г. Днепр, 49600, Украина. E-mail: pryagnikov@gmail.com

Проведено моделирование процесса производства концентрата и его энергоёмкости с обоснованием экономической эффективности использования трехзонного тарифа на электроэнергию. Разработана модель прохождения руды через все технологические звенья горно-обогательного комбината. Исследованы изменения мощности во времени на выходе из обогащательной фабрики с учетом трехзонного тарифа на электроэнергию. Управление работой бункера осуществлялось с помощью регулирования требуемого значения запасов в бункере в момент времени, что в свою очередь обеспечило влияние на ритмичность подачи руды на обогащательную фабрику - наиболее энергоёмкое звено горно-обогащательного комбината. В результате моделирования выявлена целесообразность для дальнейших исследований возможности внедрения управленческого воздействия на горно-обогащательном комбинате.

Ключевые слова: энергопотребление, динамика, рудопоток, моделирование.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Проблема забезпечення енергоефективності гірничо-збагачувального виробництва у зв'язку із підвищення вартості електроенергії набуває особливої гостроти і негайності. Це викликано тим, що у складі витрат на виробництво продукції гірничо-збагачувальних комбінатів, витрати на електроенергію складають більше 60% [1]. Гірничо-збагачувальні підприємства забезпечують сировиною всі подальші галузі національної економіки, а тому підвищення ефективності використання електроенергії при збагаченні сировини є одним з факторів, що визначають витратність та конкурентність важкої промисловості України.

Загальні витрати електроенергії при збагаченні визначається потужністю, що споживається електроприймачами фабрики. Більшість гірничо-збагачувальних підприємств працює в умовах дво- або трьохзонного тарифу на електроенергію. Використання тарифних сіток дозволяє зменшити витрати на електроенергію та оптимізувати процес виробництва. У зв'язку з цим, набувають актуальності задачі моделювання роботи гірничо-збагачувального комбінату із врахуванням особливостей роботи кожної технологічної ланки, порівняння рівнів енергоспоживання з використанням дво- або тризонного тарифу на електроенергію на основі розробленої моделі. Серед досліджень присвячених питанням підвищення енергоефективності гірничого виробництва можна виділити роботи Федунця Н.І. та Ляхомського О.В [2–3], в яких на основі факторного аналізу було визначено найбільш

впливові технологічні фактори енергоспоживання в процесі збагачення руди. В роботах [4–6] розглянуто питання раціонального електроспоживання та ролі інформаційних технологій в стратегії підвищення ефективності систем автоматичного керування промислових підприємств.

У дослідженні [1] розроблена імітаційна економіко-математична модель для дослідження залежності собівартості продукції дробарних фабрик від параметрів рудопотоку в умовах роботи з врахуванням багатозонального тарифу на електроенергію. Дослідження проводилось в межах тільки дробарної фабрики та не враховувала параметри динаміки надходження руди.

У роботі [7] проведено дослідження доходу і прибутку гірничо-збагачувального підприємства від організації рудоподачі та розглянута не тільки динаміка надходження руди, а й зміна якісних її характеристик. Але проблему енерговитрат гірничо-збагачувальних процесів у рамках цих двох досліджень розглянуто не було.

Таким чином проходження руди через всі технологічні ланки гірничо-збагачувального комбінату з подальшим аналізом енергоспоживання в умовах дво- або трьохзонного тарифу на електроенергію не проводилось.

Метою даної статті є побудова моделі проходження руди через всі технологічні ланки гірничо-збагачувального комбінату із подальшим порівняльним аналізом енергоспоживання в умовах багатозонального тарифу на електроенергію.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. В рамках даного дослідження розглянемо роботу гірничо-збагачувального комбінату в умовах рівномірної подачі руди з кар'єру на дробарно-збагачувальний переділ, яка відбувається цілодобово. Згідно з [7] цей процес має імпульсний періодичний характер, який пояснюється організацією доставки сировини залізничним транспортом. Відповідно до існуючої організації виробничого процесу на гірничо-збагачувальних комбінатах, у вигляді імпульсного процесу можна представити транспортування руди не лише з кар'єрного складу на дробарну фабрику, але і фізичне її переміщення між будь-якими іншими ланками виробництва.

Кожен залізничний потяг безперервно циркулює по ланках «кар'єр-дробарна фабрика». Тому процес відвантаження руди одним, виділеним залізничним потягом має свій період та тривалість. Період надходження руди на дробарну фабрику визначається довжиною і станом залізничних шляхів, а також технічними характеристиками транспортного та навантажувального обладнання. Динаміку поставок руди на дробарну фабрику одним залізничним потягом можна представити у вигляді ряду Фур'є [8]:

$$f_i(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \cdot \cos(n \cdot \frac{2\pi}{T} t) + \sum_{n=1}^N b_n \cdot \sin(n \cdot \frac{2\pi}{T} t), \quad (1)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cdot \cos(n \cdot \frac{2\pi}{T} t) dt, \quad (2)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T U(t) \cdot \sin(n \cdot \frac{2\pi}{T} t) dt, \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T U(t) dt, \quad (4)$$

де f_i – функція динаміки надходження руди i -тим залізничним потягом; i – порядковий номер залізничного потягу; t – момент часу; a_0, a_n, b_n , – коефіцієнти ряду Фур'є згідно до n -ої гармоніки; N – кількість гармонік; $U(t)$ – імпульсний сигнал на вході дробарної фабрики; T – період надходження руди на дробарну фабрику.

Проте слід враховувати те, що доставка руди відбувається не одним, а декількома залізничними потягами, що можуть доставляти руду з декількох різних кар'єрів, або з різних горизонтів одного кар'єру, і відповідно мати різний період T . Розглянемо функцію $F(t)$, яка описує процес надходження руди на дробарну фабрику в момент часу t . Функція $F(t)$ представляє собою суму періодичних функцій $f_1(t), f_2(t) \dots f_i(t)$ з періодами $T_1, T_2 \dots T_i$:

$$F(t) = f_1(t) + f_2(t) + \dots + f_i(t). \quad (5)$$

Такий підхід дозволяє виділити період T , який може бути використаний для опису статистичної динаміки якості руди, за допомогою вже відомих моделей [2, 7]. Тобто, з'являється можливість функціонально пов'язати між собою процес формування потужності гірничо-збагачувального комбінату і випадковий процес формування якості руди, що описується спектральною щільністю.

У рамках даного дослідження будемо розглядати дробарну фабрику як аперіодичну стійку ланку з запізненням, тож передаточна функція і амплітудно-частотна характеристика дробарної фабрики матимуть наступний вигляд:

$$K_o(p) = \frac{k_1 k_2}{t_1 p + 1} \cdot e^{-t_2 p}, \quad (6)$$

$$|K_o(i\omega)| = \frac{k_1 k_2}{\sqrt{t_1^2 \omega^2 + 1}}, \quad (7)$$

де p – оператор Лапласа; t_1 – постійна часу; t_2 – період запізнення початку перехідного процесу; k_1, k_2 – коефіцієнти перетворення відповідно для аперіодичної складової і складової запізнення.

На основі спектрального методу аналізу [9–10] проходження сигналів через систему ланок, використовуємо пряме та обернене перетворення Фур'є для знаходження спектру вхідного сигналу та сигналу на виході дробарної та збагачувальної фабрики.

Докладніше розглянемо бункер. Стан бункеру характеризується трьома змінними величинами:

- $Q1$ – вхідний потік руди до бункера, який в даному дослідженні дорівнює вихідному потоку руди з дробарної фабрики;
- $Q2$ – вихідний потік бункера, який у свою чергу дорівнює вхідному потоку збагачувальної фабрики;
- M – запас руди в бункері.

Таким чином рівняння матеріального балансу [6]:

$$\Delta M = \Delta t \cdot Q1 - \Delta t \cdot Q2, \quad (8)$$

$$\frac{dM}{dt} = Q1 - Q2, \quad (9)$$

$$q1(\omega) = f(\omega) * |K_o(i\omega)|, \quad (10)$$

де ΔM – приріст руди в бункері за час Δt ; $f(\omega)$ – результат перетворення Фур'є функції $F(t)$.

Постійна часу бункера дорівнює відношенню запасу руди в ньому до вихідного потоку:

$$T_o = \frac{M_{сеп}}{Q_{сеп}}, \quad (11)$$

де T_o – постійна часу бункера, ч.; $M_{сеп}$ – середнє значення кількості запасів в бункері, т.; $Q_{сеп}$ – середнє значення вихідного потоку, т/ч.

Рівняння бункеру з урахуванням постійної часу буде мати вигляд диференційного рівняння:

$$Q1(t) = \frac{M_{сеп}}{Q_{сеп}} \cdot \frac{dQ2(t)}{dt} + Q2(t). \quad (12)$$

Управління роботою бункеру може здійснюватись завдяки регулюванню необхідного значення запасів у бункері в момент часу t , що в свою чергу впливає на ритмічність подачі руди на збагачувальну фабрику – найбільш енергоємну ланку гірничо-збагачувального комбінату.

Потік $Q1$, що виходить з дробарної фабрики надходить на збагачувальну фабрику. Розглядаємо збагачувальну фабрику як аперіодичну стійку ланку з запізненням, тож використовуємо для розрахунків формули 6-7. Однак коефіцієнт перетворення k_1 буде дорівнювати співвідношенню кількості руди,

що надходить на збагачення до кількості отриманого концентрату (середні статистичні показники). Це пояснюється відділенням об'єму пустої породи від готової продукції.

$$s(\omega) = q2(\omega) * |K_{36}(i\omega)|, \quad (13)$$

де $s(\omega)$ – спектральна щільність сигналу, що виходить зі збагачувальної фабрики; $q2(\omega)$ – результат перетворення Фур'є функції $Q2(t)$.

Отримана після оберненого перетворення Фур'є спектральна щільності сигналу $s(\omega)$ функція $S(t)$ слугуватимуть основою для обчислення енергоспоживання процесу виробництва концентрату згідно до багатозонних тарифів на електроенергію (станом на червень 2016 року).

Відомо, що оплата за електричну енергію згідно багатозонного тарифного коефіцієнту в загальному вигляді обчислюється:

$$C = \sum_{m=1}^{k=n} C_{oce} \cdot Km_m \cdot A_m \quad (14)$$

$$A_m = R(t) \cdot E_i \quad (15)$$

де C – загальні витрати на спожити електроенергію, грн; C_{oce} – ціна за одиницю спожитої електроенергії

грн/кВт; Km_m – тарифний коефіцієнт m -ї зони; A_m – кількість енергії спожитої в m -ній тарифній зоні, кВт; $R(t)$ – кількість концентрату, що виходить із збагачувальної фабрики за час t , т.; E_i – коефіцієнт енергоспоживання при виробництві i -го класу руди.

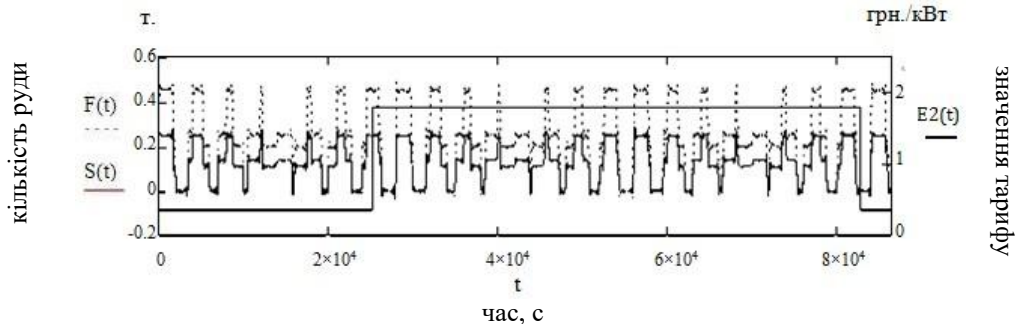
Кількість концентрату R , що виходить зі збагачувальної фабрики може бути розрахована, як визначений інтеграл функції $S(t)$ зі змінною верхньою границею інтегрування.

На прикладі Центрального гірничо-збагачувального комбінату розглянемо дробарну фабрику, на яку руда надходить з двох різних родовищ, тобто залізничними потягами з різними технічними характеристиками.

На рис. 1, 2 зображено графік динаміки потужності на виході збагачувальної фабрики з урахуванням двозонного $E2(t)$ та трizonного $E3(t)$ тарифу на електроенергію.

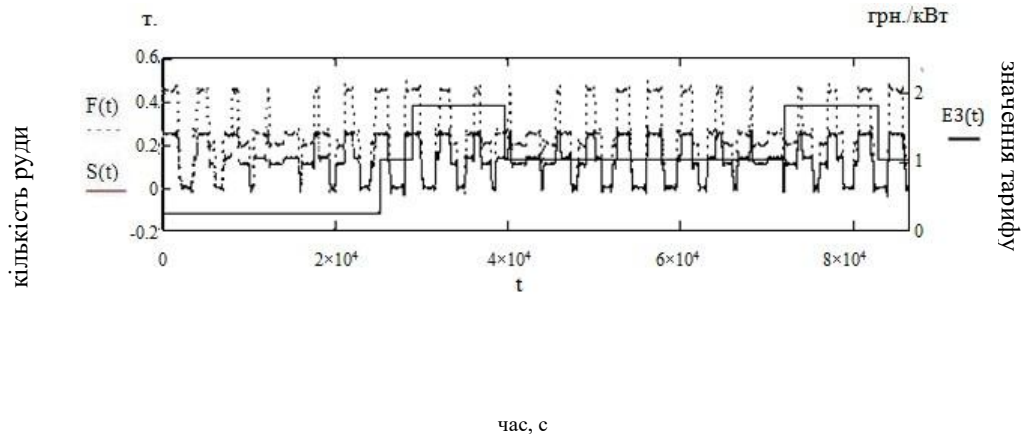
Представимо алгоритм моделювання у вигляді схеми моделювання змін потужності на виході зі збагачувальної фабрики на рис. 3

Результати щодо витрат на електроенергію по годинно представлені на рис. 4. Таким чином, завдяки використанню трьохзонного тарифу є можливість знизити витрати на електроенергію більш ніж на 24 %.



$F(t)$ – функція динаміки надходження руди на дробарну фабрику в момент часу t
 $S(t)$ – функція динаміки виходу руди зі збагачувальної фабрики в момент часу t
 $E2(t)$ – тарифний коефіцієнт для двозонних тарифів на електроенергію

Рисунок 1 – Графік змін потужності у часі на виході зі збагачувальної фабрики з урахуванням двозонного тарифу на електроенергію



$E3(t)$ – тарифний коефіцієнт для трьохзонних тарифів на електроенергію

Рисунок 2 – Графік змін потужності у часі на виході зі збагачувальної фабрики з урахуванням трьохзонного тарифу на електроенергію

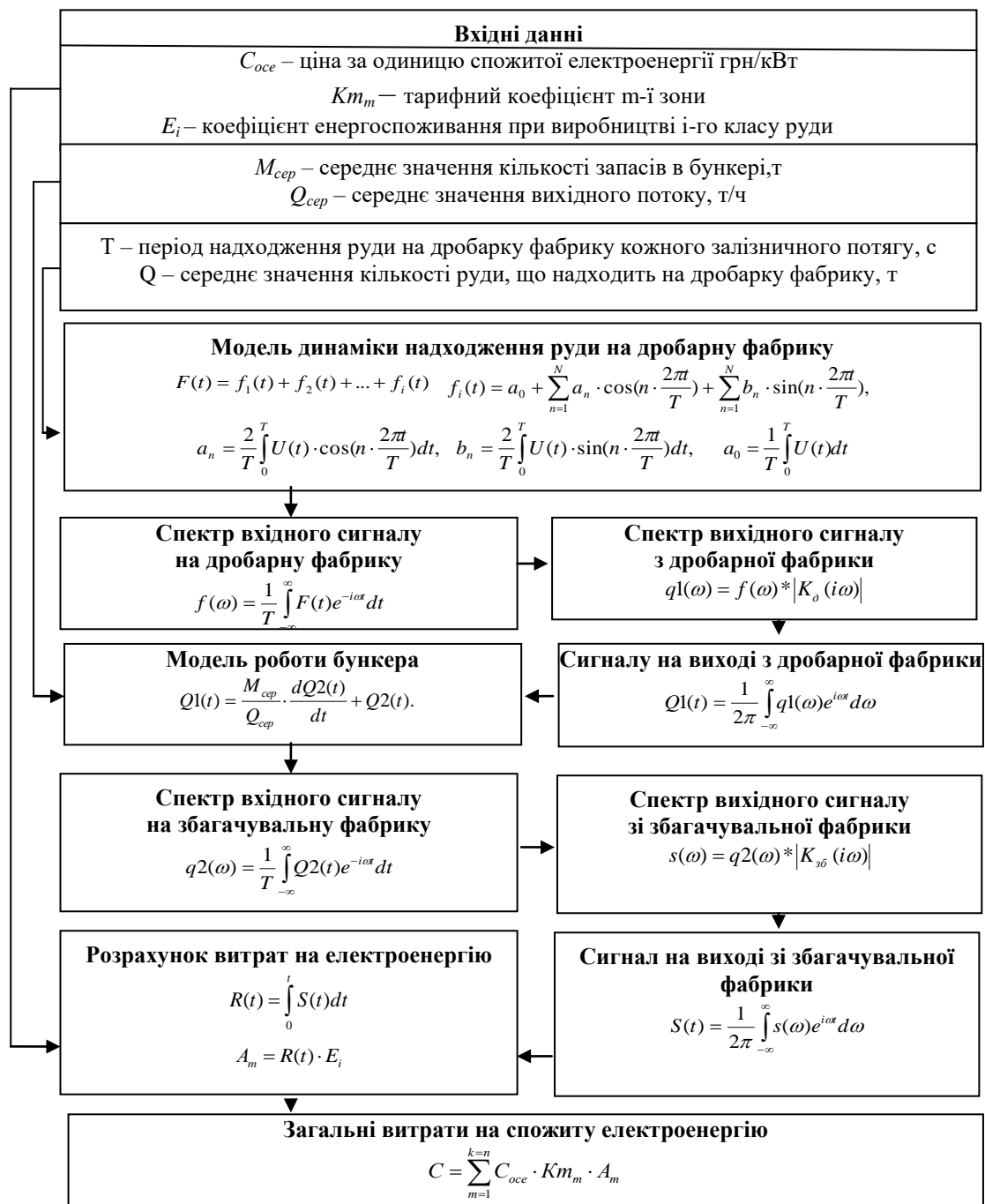


Рисунок 3 – Схема моделювання змін потужності на виході зі збагачувальної фабрики

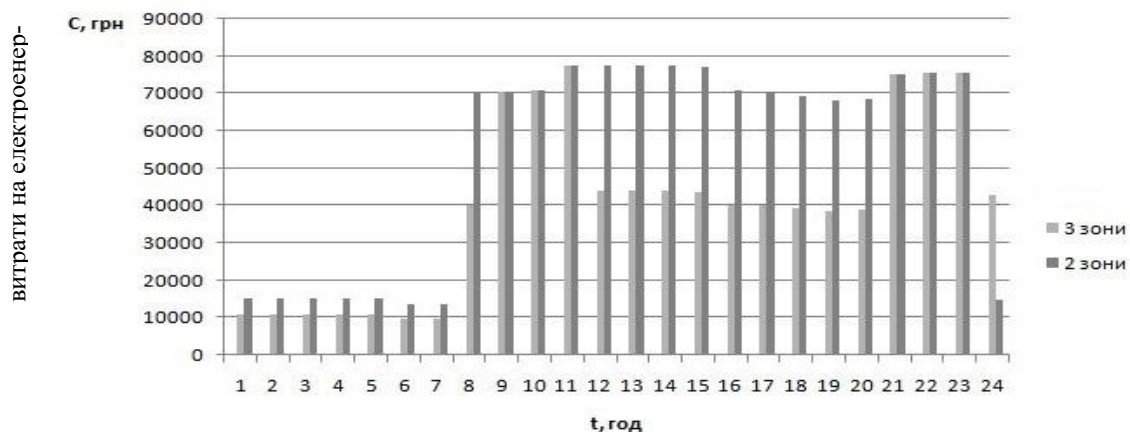


Рисунок 4 – Добовий графік змін витрат на електроенергію з урахуванням трьохзонного та двохзонного тарифу на електроенергію

ВИСНОВКИ. В дослідженні була розроблена модель проходження руди через технологічні ланки гірничо-збагачувального комбінату. Дана модель дозволяє дослідити вплив динаміки руди потоку на споживання електроенергії та енерговитрат на вході та виході кожної технологічної ланки: дробарної фабрики, бункера та збагачувальної фабрики.

Було здійснено моделювання процесу виробництва концентрату та його енергоємності з обґрунтуванням економічної ефективності використання тризонного тарифу на електроенергію. Результати моделювання вказують на доцільність подальших досліджень можливості управління рудо постачанням з метою зниження енергоспоживання. Управління динамікою подачі руди на збагачувальну фабрику дає можливість впливати на енергоспоживання гірничо-збагачувального комбінату.

Перспективою подальших досліджень є обґрунтування та розробка системи автоматизованого управління динамікою руди за критерієм мінімальних витрат на електроенергію.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гаренко А. А., Кочура Є. В. Формування собівартості продукції дробарних фабрик в умовах багатозонального тарифу на електроенергію – Д.: Національний гірничий університет, 2012. – 146 с.
2. Моделирование поверхности показателей энергоэффективности обогатительных производств горных предприятий / А. В. Ляхомский, С. В. Вахрушев, М. Г. Петров – М.: МГГУ, Горный информационно-аналитический бюллетень, № 10, 2006 – С. 313–316.
3. Федунец Н. И., Ляхомской А. В. Анализ влияния технологических факторов на электропо-

требление горно-обогатительных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2006. – С. 167–173.

4. Кудрин Б.Н. Основы комплексного метода расчета электрических нагрузок. – Промышленная энергетика, № 11. – 1986. – С. 23–26.

5. Кузнецов Н. М., Шуцкий В. И. Рациональное электропотребление на горнодобывающих и горно-обогатительных предприятиях. – Труды Кольского научного центра РАН, 1997. – С. 128–134.

6. Использование информационных технологий для повышения эффективности пусконаладочных работ и испытаний систем автоматизированного управления / В. В. Найда, И. С. Конох, Л. В. Сухомлин – Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 3/2015 (92). – С. 40–47.

7. Економіко-математичне моделювання впливу режимів рудоподачі на ефективність використання економічного потенціалу гірничо-збагачувального підприємства / І. А. Белкіна, Р. М. Лепа, Є. В. Кочура. – Д.: Національний гірничий університет, 2013. – 123 с.

8. Анго А. Математика для электро- и радиоинженеров. – М., 1965. – 780 с.

9. Bussmann S., Schild K. Self-Organizing manufacturing control: an industrial application of agent technology. Proc. 4th Int. Conf. On Multi-Agent Systems. – 2000. – P. 87–94.

10. Маракас Г. М. Системы поддержки принятия решений в двадцать первом веке. UpperSaddleRiver, Нью-Джерси: PrenticeHall, 1999. – 529 с.

MODELING OF ORE SUPPLY DYNAMICS IN MINING ENTERPRISE UNDER MULTI-ZONE TARIFFS FOR ELECTRICITY

K. Priazhnikova, I. Bielkina, E. Kochura

State Higher Educational Institution "National Mining University"

prosp. Dmytra Yavornytskoho, 19, Dnipro, 49600, Ukraine. E-mail: pryaznikov@gmail.com

Purpose. To design the model of ore dynamics taking into consideration all technological stages of mining and processing enterprise with a further comparative analysis of energy consumption in terms of multi-zone electric power tariffs. **Methodology.** The following methods have been applied: economical and mathematical modeling, method of graphical analysis and inference for interpretation of visual images and simulation modeling results. Also, methods of comparison, theoretical synthesis and critical analysis have been used to study recent scientific works and existing approaches on modeling of energy consumption at mining enterprises and to determine the perspective of further research. **Results.** The mathematical model of ore supply dynamics has been developed taking into consideration both all the technological levels of mining and processing plant and multi-zone tariffs for electricity which are practically used in all modern production enterprises. The model analysis has been made to examine the ore supply dynamics of the mining and processing plant and to identify the ways of influence on the level of plant's energy consumption. As a result feasibility of further research as for the automation system creation for management and control of energy consumption in mining enterprises has been proved. **Originality.** For the first time, multi-zone tariffs for electricity have been considered in ore supply dynamics modeling. **Practical value.** Controlling of ore supply dynamics in frames of multi-zone tariffs makes possible to influence energy consumption level of mining and processing plant. The developed model can be adapted and used to manage real production process. References 10, tables 0, figures 4.

Key words: energy consumption, dynamics, ore flow, modeling.

REFERENCES

1. Garenko, A.A. and Kochura, E.V. (2012), *Formuvannja sobivartosti produkciji drobnarjnyx fabryk v umovax bahatozonal'noho taryfu na elektroenerhiju* [Formation of production cost in conditions of crushing plants multy-zones electricity tariff]. Monography, NMU, Dnipropetrovsk, Ukraine.
2. Liakhomskoi, A.V., Vahrushev, S.V. and Petrov, M.G. (2006), "Modeling of the energy efficiency indicators surface of mineral processing production in mining enterprises". *Mining Information-analytical bulletin*, № 10, pp. 313-316.
3. Fedunets, N.I. and Liakhomskoi, A.V. (2006), "Analysis of the technological factors impact on energy consumption of mining and processing enterprises" *Seminar №14*, pp. 167-173.
4. Kudrin, B.N. (1986), "Fundamentals of a complex method for calculating electrical loads". *Industrial energy*, №11, pp. 23-26.
5. Kuznetsov, N.M. (2011). "Efficient energy consumption in mining enterprises". *Energy efficiency and energy supply*, pp. 128-134.
6. Nayda, V.V., Konokh, I.S. and Sukhomlyn, L.V. (2015), "The use of informational technologies for enhancement the effectiveness of pre-commissioning and testing of the automatic control systems" *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, issue 3(92), pp. 40-47.
7. Bielkina, I.A, Lepa, R.M. and Kochura, E.V. (2013), *Ekonomiko-matematyčne modeljuvannja vplyvu režymiv rudopodači na efektyvnist' vykorystannja ekonomičnoho potencialu hirnyčo-zbahačuval'noho pidpryjemstva* [Economic-mathematical modeling of ore regimes problem on the efficiency of the economic potential of mining and processing enterprises]. Monography, NMU, Dnipropetrovsk, Ukraine.
8. Ango, A. (1965). *Matematyka dlja elektro- y radyoynženerov* [Mathematics for electric and radio engineers]. Moscow.
9. Bussmann, S. and Schild, K. (2000), "Self-Organizing manufacturing control: an industrial application of agent technology", *Proc. 4th Int. Conf. On Multi-Agent Systems*, pp. 87-94.
10. Marakas, G.M. (1999), *Sistemy podderzhki prinjatija reshenij v dvadcat' pervom veke* [Decision support systems in the twenty-first century]. Upper Saddle River, Nyu-Dzhersy, PrenticeHall, USA.

Стаття надійшла 06.03.2017.