

ЗНИЖЕННЯ ВИТРАТ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ В ПРОЦЕСАХ РУДОПІДГОТОВКИ НА ОСНОВІ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ФОРМУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СПЕКТРІВ

*Д. В. Кочура, аспірант, НТУ «Дніпровська політехніка»,
kochura.de.v@ntu.one, orcid.org/0000-0002-1639-6578,*

*О. Ю. Чуріканова, д. е. н., доцент, НТУ «Дніпровська політехніка»,
churikanova.o.yu@ntu.one, orcid.org/0000-0001-5703-2271*

Методологія дослідження. Для дослідження, результати якого представлено в даній статті, використано аналітичні методи – для аналізу процесів управління рудопотоками та виявлення резервів покращення процесу з метою мінімізації витрат на електроенергію; математичні методи – для обґрунтування закономірності формування спектральних характеристик рудопотоку з параметрами технологічних режимів гірничо-транспортного та дробарного устаткування.

Результати. При проведенні аналізу енергетичних спектрів рудо підготовки сформовано ряд економічних, організаційних та технічних заходів, які дозволять досягнути збільшення економічного ефекту від технологічного процесу. Виявлено, що мінімізація дисперсії часу роботи екскаватора шляхом організації його ритмічної роботи в кар'єрі поряд із підвищенням коефіцієнта завантаженості з метою максимізації часу його роботи, суттєво підвищує надійність електромеханічного обладнання за рахунок своєчасної подачі автосамоскидів під час завантаження. Встановлено, що витримування постійної кількості транспортних ємностей з рудою, а також застосування дробарок високої продуктивності та організації ритмічного режиму подачі думпкарів з рудою, дозволяє суттєво зменшити витрати електроенергії на дроблення руди. Доведено, що для зменшення витрат електроенергії системою завантаження бункерів дробильно-збагачувальних фабрики ефективним є застосування човникового режиму їхнього завантаження з максимально припустимим періодом завантаження.

Новизна. Під час аналізу енергетичних спектрів процесів рудопідготовки з метою мінімізації витрат та підвищення економічної ефективності діяльності гірничо-рудного підприємства діагностовано зв'язок динаміки енергоспоживання дробарно-збагачувальних фабрик із закономірностями формування спектральних характеристик рудопотоку та параметрами гірничо-транспортного та дробарного устаткування.

Практична значущість. Запропоновано комплекс реальних практичних заходів, спрямованих на зниження витрат на електроенергію на гірничо-збагачувальних підприємствах.

Ключові слова: витрати на електроенергію, мінімізація витрат, спектральні характеристики рудопотоку, дробильно-збагачувальна фабрика.

Постановка проблеми. Україна має великі поклади залізних руд, що складають основу розвитку чорної металургії та в значній мірі визначають експортний потенціал країни. Виробництво залізрудного концентрату є дуже енергоємним. Наприклад, на Інгулецькому гірничо-збагачувальному комбінаті на виробництво однієї тонни концентрату витрачається біля 73 квт/год електроенергії. При виробництві 12,189 млн тонн концентрату за рік витрачається 892 млн.

квт/год електроенергії. В структурі собівартості виробництва залізрудного концентрату вартість електроенергії складає близько 60%. В умовах світової енергетичної кризи зниження витрат на електроенергію на гірничо-рудних підприємствах є актуальною проблемою.

На гірничо-збагачувальних комбінатах контролюються загальні витрати електроенергії, які визначаються характеристиками обладнання та кількістю переробленої руди.

Показники лічильників електроенергії дають інтегровані показники активної потужності за зміну, добу, тиждень, місяць, рік і не показують динаміку енергоспоживання, яка залежить від режимів роботи гірничо-транспортного комплексу.

Випадковий процес споживання активної потужності $P(t)$ має дві складові: $M[P(t)]$ – математичне очікування та $P(t) - M[P(t)]$ – центрована випадкова складова активної потужності з математичним очікуванням, що дорівнює нулю.

$$P(t) = M[P(t)] + P(t) - M[P(t)] \quad (1)$$

Математичне очікування $M[P(t)]$ характеризує середнє значення активної потужності, що споживається за конкретний період часу – зміну, добу, тиждень, місяць і визначається характеристиками технологічного обладнання та типом руди, що переробляється. Центрована випадкова складова активної потужності $P(t) - M[P(t)]$ характеризує коливання, що залежать від режимів роботи гірничо-транспортного комплексу та коливань мас та якості руди, що переробляється. Відомо, що динаміку енергоспоживання визначає рух десятків тисяч тонн руди, на що витрачається 20–30% електроенергії, що споживається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Режими роботи технологічних комплексів рудопідготовки мають дискретний характер. Це пов'язано з дискретним характером добутку руди екскаваторами в забоях, транспортування руди залізничними думпкарами та автосамоскидами, дроблення руди дробарками, режимами завантаження бункерів збагачувальної фабрики. В роботі [3] наведені аналітичні залежності енергетичних спектрів типових імпульсних процесів.

В роботі [2] розглядається імпульсний характер постачання руди на збагачувальну фабрику. Амплітуда імпульсу вимірюється в одиницях масової долі заліза в руді. Досліджувались впливи режимів рудопостачання на коливання якості залізородного концентрату. В роботі [3] розглядається вплив щільності руди на режими роботи дробарок.

Але питомі витрати електроенергії на процеси рудопідготовки та збагачення руди у

першу чергу залежать від об'ємів та мас руди, що подається на переробку, та продуктивності встановленого технологічного устаткування, режимів його роботи. Тому при імпульсному характері постачання руди необхідно вивчити вплив продуктивності по руді та кількості руди, що переробляється на витрати електричної енергії.

Формулювання мети статті. Мета цієї роботи полягає в тому, що на основі загальної теорії енергетичних спектрів імпульсних випадкових процесів обґрунтувати закономірності формування спектральних характеристик рудопотоку з параметрами технологічних режимів гірничо-транспортного та дробарного устаткування та розробити заходи по зниженню витрат на електроенергію на гірничо-збагачувальних підприємствах.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо роботу екскаватора в забої кар'єру при завантаженні руди з продуктивністю Q_1 . Графік роботи екскаваторного забою наведено на рис. 1.

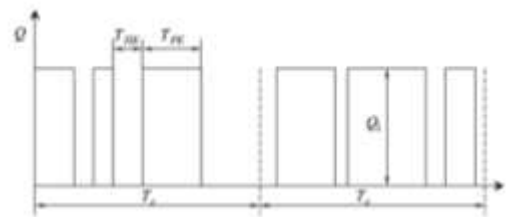


Рис. 1. Графік роботи екскаваторного забою

Позначення на рис. 1: T_c – час зміни; T_{PE} – час роботи екскаватора; $T_{ПЕ}$ – час простою екскаватора; Q_1 – продуктивність екскаватора по руді.

Енергетичний спектр екскаваторного забою наведено на рис. 2.

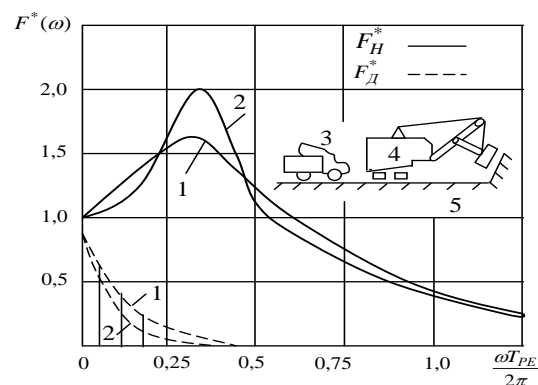


Рис. 2. Енергетичний спектр екскаваторного забою

Позначення на рис. 2: F_H^* – нормований безперервний енергетичний спектр; F_D^* – нормований дискретний енергетичний спектр.

Нормовані значення енергетичного спектра одержані шляхом розділення його значень на $F(0)$:

$$F(0) = \frac{4Q_1^2}{T_c} \cdot D_{pe}, \quad (2)$$

де D_{pe} – дисперсія часу роботи екскаватора;

Крива 1 – відповідає пуансоновському розподілу пауз; крива 2 – відповідає рівномірному розподілу пауз; 3 – автосамоскиди; 4 – екскаватор;

5 – забій кар’єру;

На рис. 3 наведено графік роботи дробарки крупношматкового дроблення, що працює в комплексі з автосамоскидами або залізничними думпкарми.

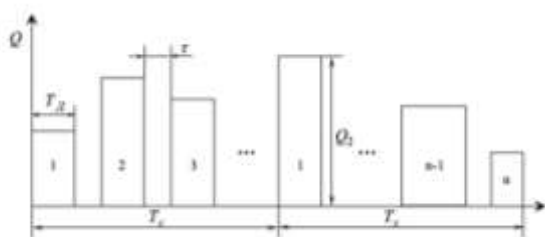


Рис. 3. Графік роботи дробарного комплексу

Позначення на рис. 3: T_D – час дроблення руди; τ – період розвантаження автосамоскидів або залізничних думпкарів; n – кількість розвантажених в дробарку автосамоскидів або думпкарів за зміну T_c ; Q_2 – продуктивність дробарки.

На рис. 4 наведено енергетичний спектр дробарного комплексу з випадковим розподілом кількості транспортних засобів, що завантажуються в дробарку.

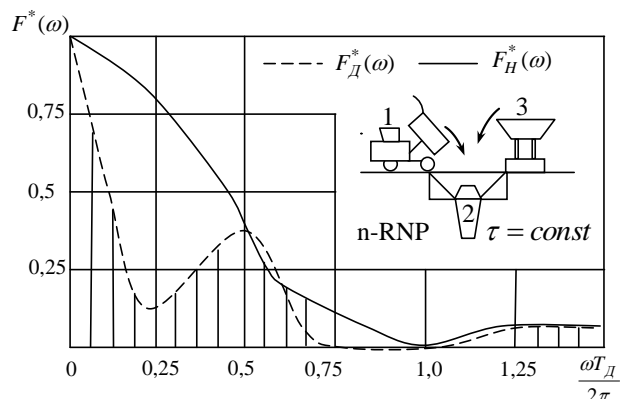


Рис. 4. Енергетичний спектр дробарного комплексу

Нормоване одиничне значення безперервної частини енергетичного спектру на рис. 4 дорівнює:

$$F_H(0) = \frac{2M(n)T_D^2\sigma_n^2}{T_c}, \quad (3)$$

де $M(n)$, σ_n^2 – відповідно математичне очікування та дисперсія кількості транспортних засобів.

Нормоване одиничне значення дискретної частини енергетичного спектру на рис.4 дорівнює:

$$F_D(\omega) = \frac{4\pi[M(Q_2)]^2 T_D^2}{T_c^2}. \quad (4)$$

Позначення на рис. 4: 1 – автосамоскид; 2 – дробарка; 3 – думпкар; $M(Q_2)$ – математичне очікування продуктивності дробарки.

Розглянемо енергетичний спектр рудопотоку при постійній кількості ємностей, що розвантажуються протягом зміни та змінних інтервалах завантаження. Графік роботи дробарки у такому режимі наведено на рис. 5. Енергетичний спектр дробарного комплексу наведено на рис. 6.

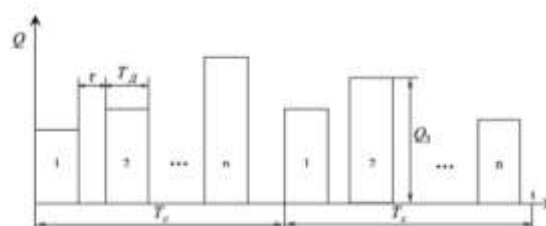


Рис. 5. Графік роботи дробарного комплексу

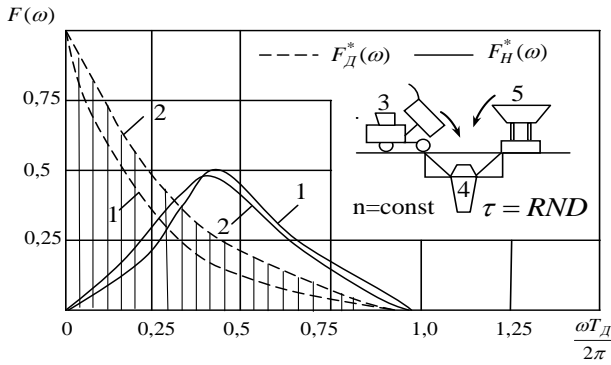


Рис. 6. Енергетичний спектр дробарного комплексу

Позначення на рис. 5,6: Q_3 – продуктивність дробарки в ємностях, що завантажуються в дробарку; крива 1 на рис. 6 відповідає пуансоновському закону розподілення інтервалів, а крива 2 – нормальному закону; $M(Q_3)$ – математичне очікування продуктивності дробарки.

Нормоване одиничне значення безперервної частини енергетичного спектру на рис. 6 дорівнює:

$$F_H(0) = \frac{2[M(Q_3)]^2 T_d^2}{T_c} \quad (5)$$

Нормоване одиничне значення дискретної частини енергетичного спектру на рис. 6:

$$F_d(0) = \frac{4\pi[M(Q_3)]^2 T_d^2}{T_c^2} \quad (6)$$

Розглянемо процес завантаження бункера збагачувальної фабрики. Графік завантаження бункера наведено на рис. 7, де T – період завантаження; τ – інтервал між завантаженнями; Q_4 – продуктивність конвейера.

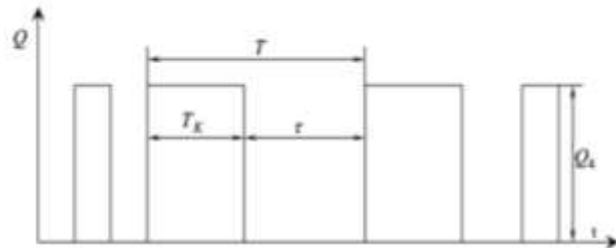


Рис. 7. Графік конвейерного завантаження бункера

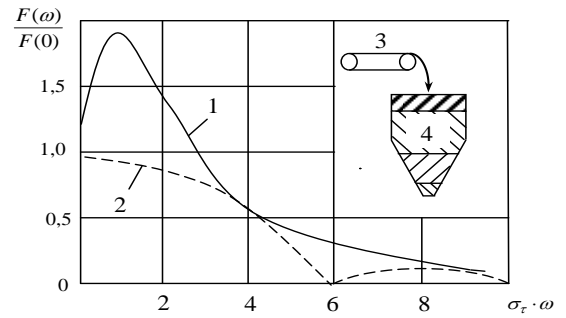


Рис. 8. Енергетичний спектр конвейерного завантаження

Позначення на рис. 8: крива 1 відповідає енергетичному спектру завантаження бункера; крива 2 – відповідає спектру одиночного імпульсу; 3 – конвейер; 4 – бункер; σ_τ – середньоквадратичне відхилення інтервалу завантаження.

Енергетичний спектр при частоті $\omega = 0$ дорівнює:

$$F(0) = \frac{Q_4^2 D_{TK}}{T} \quad (7)$$

де D_{TK} – дисперсія довжини імпульсу продуктивності.

У випадку завантаження бункерів збагачувальної фабрики за допомогою автостели, що працює у човниковому режимі, часова діаграма завантаження автостелою бункера наведена на рис. 9.

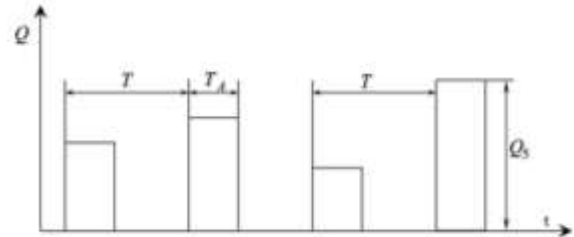


Рис. 9. Часова діаграма роботи періодичного завантаження автостелою

Позначення на рис.9: T – період завантаження; T_A – час завантаження або час проходження автостели над бункером.

Енергетичний спектр автостели наведено на рис. 10, де 1 – крива безперервної частини спектру; 2 – крива дискретної частини спектру; 3 – автостела; 4 – бункери.

Максимальне значення дискретної частини спектру:

$$F_D(0) = \frac{4\pi[M(Q_5)]^2}{T^2}, \quad (8)$$

де $M(Q_5)$ – математичне очікування продуктивності автостели.

Максимальне значення безперервної частини енергетичного спектру:

$$F_H(0) = \frac{2\sigma_Q^2}{T}, \quad (9)$$

де σ_Q^2 – дисперсія продуктивності автостели.

Виконаємо оцінку частотних діапазонів та періодів коливань енергоспоживання, що генерують технологічні комплекси процесів рудопідготовки, використовуючи графіки енергетичних спектрів рис. 2 – рис. 10.

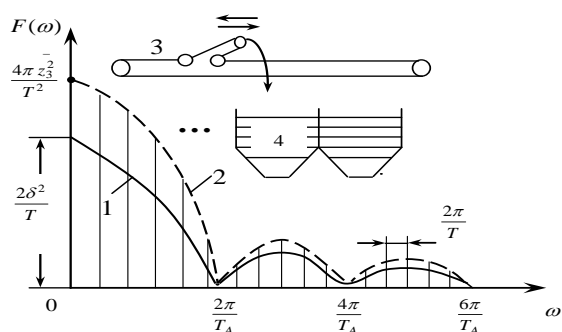


Рис. 10. Енергетичний спектр автостели

Для екскаваторного забою згідно з графіком рис. 2 діапазон суттєвих частот енергоколивань складає: $\frac{\omega T_{PE}}{2\pi} = (0,25 \div 0,5)$.

Коли прийняти $T_{PE} = 10-20$ хвилин, то частоти енергоколивань, що генеруються екскаваторним забоем:

$$4,36 \cdot 10^{-4} \text{ Гц} \leq \omega_{e3} \leq 2,61 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}, \quad (10)$$

Відповідні періоди енергоколивань, що генеруються екскаваторним забоем:

$$6,36 \text{ хвилин} \leq T_{e3} \leq 38,2 \text{ хвилин}, \quad (11)$$

Для комплексу крупношматкового дроблення згідно із графіком рис. 4

$$\frac{\omega T_D}{2\pi} = (0,1 \div 0,5) \cdot$$

Для умов, наприклад, Інгулецького ГЗК $T = 1,5$ хвилин, $n = \text{var}$.

Частоти енергоколивань, що генеруються дробарним комплексом:

$$6,97 \cdot 10^{-3} \leq \omega_{DK} \leq 34,8 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}, \quad (12)$$

Відповідні періоди коливань енергоспоживання:

$$0,5 \text{ хвилин} \leq T_{DK} \leq 2,38 \text{ хвилин}. \quad (13)$$

Для конвейєрного завантаження бункера згідно із графіком рис. 8 при $\sigma_Q^2 = 0,1$ та часу включення конвейєра $T_K = \frac{T}{2}$, що знаходиться в межах від 10 до 30 хвилин.

Діапазон суттєвих коливань енергоспоживання системи завантаження бункерів:

$$5,6 \cdot 10^{-5} \text{ Гц} \leq \omega_k \leq 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ Гц}, \quad (14)$$

Періоди енергоколивань, що відповідають відповідним частотам (14):

$$0,5 \text{ хвилин} \leq T_K \leq 5 \text{ хвилин}, \quad (15)$$

Визначено діапазон суттєвих частот, що генеруються автостелою при човниковому режимі роботи.

Початкові дані для розрахунку в умовах Інгулецького ГЗК:

- час завантаження секції: 3,2 хвилини;
- період завантаження бункера: $T = 67,2$ хвилини;

Діапазон частот:

$$1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Гц} \leq \omega_{AB} \leq 32 \cdot 10^{-3} \text{ Гц}, \quad (16)$$

Відповідні періоди енергоколивань:

$$0,5 \text{ хвилин} \leq T_{AB} \leq 10,7 \text{ хвилин}, \quad (17)$$

Динаміка рудопотоку провокує коливання активної потужності та електричної енергії, що споживається електроприводом технологічного устаткування гірничозбагачувального комбінату. На ці коливання витрачається 25-30% встановленої потужності

обладнання гірничо-збагачувального комбінату, що складає сотні тисяч кіловат.

Виходячи з фізичного сенсу спектральної щільності активної потужності P вона дорівнює:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\omega_B} S(\omega) d\omega, \quad (18)$$

де ω_B – верхня межа частоти коливань.

Витрати електричної електроенергії E пропорційні споживаній потужності P та часу t :

$$E = P \cdot t, \quad (19)$$

Висновки. Аналіз енергетичних спектрів процесів рудопідготовки дозволяє запропонувати наступні організаційно-технічні заходи по зменшенню витрат електроенергії:

1. Для зменшення витрат електроенергії в кар'єрі необхідно:

- мінімізувати дисперсію часу роботи екскаватора шляхом організації їх ритмічної роботи в кар'єрі, підвищенням надійності електромеханічного обладнання, своєчасною подачею автосамоскидів під завантаження;

- підвищити коефіцієнт завантаження екскаватора з метою максимізації часу його роботи.

2. Для зменшення витрат електроенергії на дроблення руди, що завантажуються в дробарку залізничних думпкарів і автосамоскидів необхідно:

- витримувати постійну кількість транспортних ємностей з рудою, що завантажуються в дробарку протягом зміни;

- мінімізувати середнє значення і дисперсію часу дроблення шляхом застосування дробарок високої продуктивності, організації ритмічного режиму подачі думпкарів з рудою, що завантажуються в дробарку.

3. Для зменшення витрат електроенергії системою завантаження бункерів дробильно-збагачувальних фабрик необхідно:

- застосувати човниковий режим завантаження бункерів з максимально допустимим періодом завантаження;

- при адресному періодичному завантаженні бункерів необхідно мінімізувати дисперсію часу завантаження і збільшувати періодичність довантаження.

Для реалізації цих заходів необхідно впровадити їх в технологічні карти та посадові інструкції диспетчерської служби кар'єрів, дробарних фабрик та гірничотранспортного цеху.

Необхідно організувати систему контролю за виконанням цих інструкцій та заходи матеріального та морального стимулювання їх виконання.

Література

1. Горенко А.А., Кочура Є.В. Формування собівартості продукції дробарних фабрик в умовах багатозонального тарифу на електроенергію. Д.: Національний гірничий університет, 2012. 146 с.

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

3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: «Радио и связь», 2009. 656 с.

References

1. Horenko, A.A., & Kochura, E.V. (2012). Formuvannya sobivartosti produktsii drobarnykh fabryk v umovakh bahatozonalnogo taryfu na elektroenerhiu. Dnipropetrovsk: Nationalnyy Hirnychy Universitytet.

2. Belkina, I.A., Lepa, R.M., & Kochura E.V. (2013). Ekonomiko-matematychne modeluvannya vplyvu rezhymiv rudopodachi na efektyvnist vykorystannia ekonomichnoho potentsialu hirnycho-zbahachuvalnoho pidpryemstva. Dnipropetrovsk: Nationalnyy Hirnychy Universitytet.

3. Levin, B.R. (2009). Theoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Moskva: «Radio and sviaz».

REDUCTION OF ENERGY COST IN THE PROCESSES OF ORE PREPARATION ON THE BASIS OF THE REGULARITIES OF THE FORMATION OF ENERGY SPECTRUM

*D. V. Kochura, Post-graduate student, Dnipro University of Technology,
O. Yu. Churikanova, D.E., Associate Professor, Dnipro University of Technology*

Methods. Analytical methods for the analysis of ore flow management processes and the identification of ways of process improvement for the purpose of minimizing electricity costs;

mathematical methods for substantiating the regularity of the formation of spectral characteristics of the ore flow with the parameters of the technological modes of the mining, transportation and crushing equipment are used for the research of this subject area.

Results. During the analysis of the energy spectra of ore preparation, a number of economic, organizational and technical measures were formed, which will allow to achieve an increase in the economic effect of the technological process. It was found that minimizing the dispersion of the excavator's working time by organizing its rhythmic work in the quarry along with increasing the load factor in order to maximize its working time significantly increases the reliability of electromechanical equipment thanks to the timely supply of dump trucks during loading. It has been established that maintaining a constant number of transport containers with ore, as well as the use of high-performance crushers and the organization of a rhythmic mode of delivery of dump trucks with ore allows to significantly reduce the cost of electricity for ore crushing. It has been proven that the use of a shuttle mode of loading bunkers with the maximum permissible loading period is effective in reducing electricity consumption by the loading system of bunkers of crushing and enrichment factories.

Novelty. During the analysis of the energy spectra of ore preparation processes in order to minimize costs and increase economic efficiency of the mining and ore enterprise, the correlation between the energy consumption dynamics of the crushing and beneficiation factories and the regularities of the formation of the spectral characteristics of the ore stream and the parameters of the mining, transportation and crushing equipment was diagnosed.

Practical value. A set of real practical measures aimed at reducing electricity costs at mining and beneficiation enterprises is proposed.

Keywords: electricity costs, cost minimization, spectral characteristics of the ore stream, crushing and beneficiation plant.

Надійшла до редакції 12.11.22 р.