

Електронний журнал «Ефективна економіка» включено до переліку наукових фахових видань України з питань економіки (Категорія «Б», Наказ Міністерства освіти і науки України № 975 від 11.07.2019). Спеціальності – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 292. Ефективна економіка. 2024. № 3.

DOI: <http://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.3.96>

УДК 330.46.63.2

Д. В. Кочура,

аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1639-6578>

ЕКОНОМІКА ДИНАМІКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ДРОБАРНИХ ФАБРИК

D. Kochura,

Postgraduate student, National Technical University "Dnipro Polytechnic"

ECONOMICS OF THE ENERGY CONSUMPTION DYNAMICS OF CRUSHING PLANTS

У статті розроблено економіко-математичну модель динаміки електроспоживання дробарної фабрики, що працює разом із транспортним підприємством, яке постачає сировину. Модель пов'язує динамічну складову електричної енергії, що споживається дробарним обладнанням, і логістичні параметри постачання сировини на дробарну фабрику, такі як період постачання, вантажопідйомність транспортних засобів, продуктивність дробарки, питомі витрати електроенергії на одиницю маси сировини. Встановлено, що при періодичному постачанні сировини на дробарну фабрику вартість динамічної складової електроенергії значно перевищує статичну складову загальних витрат на електроенергію, що споживається дробарною фабрикою. Обґрунтовано, що суттєво знизити витрати електроенергії на

дробарних фабриках можна за рахунок мінімізації простоїв дробарного обладнання та скорочення періоду постачання сировини. Вперше запропоновано модель електроспоживання дробарки у вигляді періодичної послідовності трикутних та експоненціальних імпульсів активної потужності електродвигуна дробарки.

In the structure of the cost of production of crushing plants of ore and non-metallic raw materials, electricity costs account for 50-60%. Well-known energy saving methods, such as the introduction of more efficient crushers, accounting and control of energy costs using automated control systems, require significant capital investment. In addition, they are aimed at saving overall energy costs and do not take into account the dynamics of energy consumption. The problem lies in the economic assessment of the impact of electricity consumption on the dynamics of energy consumption by crushing equipment and the connection of these costs with the logistics parameters of the supply of ore and non-metallic materials to the crushing plant.

The purpose of the study is to develop ways to reduce energy costs in the structure of production costs of crushing plant products through organizational management of energy consumption dynamics.

Research results. The article develops an economic and mathematical model of the dynamics of power consumption of a crushing plant, working together with a transport enterprise supplying raw materials. The model connects the dynamic component of the electrical energy consumed by crushing equipment and the logistics parameters of the supply of raw materials to the crushing factory, such as the delivery period, the carrying capacity of vehicles, the productivity of the crusher, and the specific energy consumption per unit mass of raw materials. It has been established that with the periodic supply of raw materials to a shot mill, the cost of the dynamic component of electricity significantly exceeds the static component of the total costs of electricity consumed by the shot factory. It has been established that it is possible to significantly reduce energy consumption at crushing factories by

minimizing downtime of crushing equipment and reducing the period of supply of raw materials. For the first time, a model of crusher power consumption has been proposed in the form of a periodic sequence of triangular and exponential pulses of the active power of the crusher electric motor.

Ключові слова: енергозбереження, дробарні фабрики, логістика постачання сировини, електроспоживання, динаміка.

Keywords: energy saving, crushing plants, raw material supply logistics, power consumption, dynamics.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. У структурі собівартості продукції дробарних фабрик рудної та нерудної сировини витрати на електроенергію складають 50-60%. Сировина постачається на дробарні фабрики автомобільним або залізничним транспортом. Процес постачання сировини, розвантаження транспортних ємностей та завантаження дробарок має дискретний характер, тому процес електроспоживання дробарками має динамічний характер. Відомі методи енергозбереження, такі як впровадження більш ефективних дробарок, облік та контроль витрат на електроенергію за допомогою автоматизованих систем контролю, потребують значних капіталовкладень. До того ж вони націлені на економію загальних витрат на електроенергію і не враховують динаміку електроспоживання. Але відомо, що динамічна складова електроенергії є основною для процесів дроблення. Економія електроенергії в промисловості є дуже актуальною в зв'язку з її дефіцитом в Україні через російську агресію.

Проблема полягає в економічній оцінці впливу витрат електроенергії на динаміку енергоспоживання дробарним устаткуванням та в зв'язку цих витрат із логістичними параметрами постачання рудних та нерудних матеріалів на дробарну фабрику.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам енергозбереження в гірничій та гірничорудній промисловості присвячено багато досліджень. У

роботі [1] розглянуті передумови формування програм енергозбереження на гірничорудних підприємствах, рекомендовано модернізувати дробарки або замінити їх на менш енергоємні на стадії дроблення руди. В роботі [2] запропоновано стабілізувати якісні характеристики руди в рудопотоках, що дозволить збільшити валовий прибуток гірничо-збагачувальних комбінатів. В роботі [3] досліджено енергомісткість гірничорудних підприємств та запропоновано впровадити нові енергозберігаючі технології, нове дробарне обладнання з використанням вібраційних впливів.

В роботі [4] процес подачі руди на дробарну фабрику розглядається у вигляді імпульсного процесу. Амплітудою прямокутних імпульсів визначена масова частка заліза в руді. Динамічними параметрами процесу є період і тривалість подачі руди. Досліджувався вплив цих параметрів імпульсного процесу на економічні показники діяльності гірничо-збагачувального комбінату (дохід, собівартість і прибуток) та на якість концентрату. Дослідження динаміки енергоспоживання з метою енергозбереження в цій роботі не проводились. У роботі [5] методом імітаційного моделювання змодельовано витрати електроенергії у процесі дроблення сировини. Подача руди на дробарну фабрику моделюється у вигляді періодичної послідовності прямокутних імпульсів. Амплітудою прямокутних імпульсів є щільність руди, яка функціонально пов'язана із твердістю руди. Обґрунтовано експериментальні залежності собівартості продукції дробарних фабрик від параметрів рудопостачання, періоду поставок та часу дроблення. Водночас одержані результати потребують уточнення, оскільки витрати електроенергії залежать від питомих витрат електроенергії на одиницю маси руди, а процес зміни маси руди, що завантажується у дробарку, та активна потужність, що споживається дробаркою, моделюються трикутниками або експоненціальним імпульсами. Крім того, важливо одержати аналітичні формули, що описують динаміку електроспоживання у загальному вигляді.

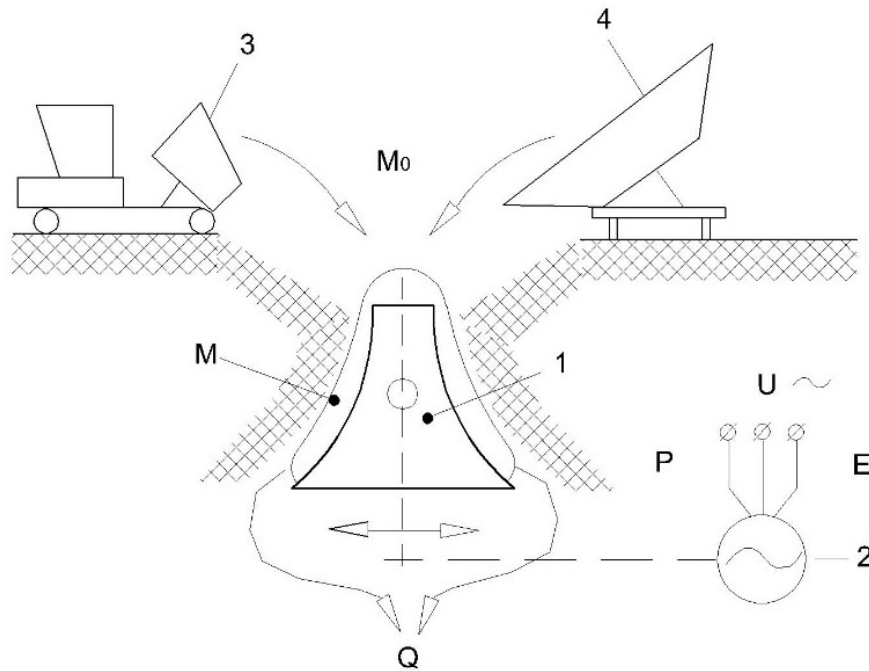
Формулювання цілей статті (постановка завдання). Метою статті є розробка шляхів зниження витрат на електроенергію у структурі виробничої

собівартості продукції дробарних фабрик за рахунок організаційного управління динамікою енергоспоживання.

Методика дослідження. Як інструмент дослідження впливу імпульсних процесів подачі руди на дробарну фабрику на динаміку її електроспоживання, використовуються математичний апарат та термінологія спектрального аналізу імпульсних періодичних та випадкових процесів [6]. Спектральна щільність або спектр – це розподіл дисперсій складових гармонік за частотами, що в теорії випадкових процесів позначається терміном «енергетичний спектр». У теорії випадкових процесів дисперсія коливань процесів будь-якої фізичної природи трактується як «енергія» випадкового процесу, спектральна щільність процесу будь-якої природи – як «енергетичний спектр». Але це не електрична енергія, це дисперсія коливань, наприклад, масової частки заліза в руді або коливань щільності руди, що завантажується у дробарку. Електрична енергія витрачається на переробку (дроблення) маси сировини. Зв'язок між масою руди, що переробляється, та електричною енергією, що споживається в процесі переробки, визначається питомими витратами електроенергії на одиницю маси сировини, що завантажується у дробарку. Для вивчення процесів електроспоживання необхідно дослідити зміну у часі активної потужності, тому що електрична енергія, що споживається в процесі переробки сировини, визначається електричною активною потужністю та часом переробки.

Виклад основного матеріалу дослідження. Постачання сировини на дробарні фабрики здійснюється здебільшого залізничним або автомобільним транспортом. Сировиною може бути руда, вугілля, вапняк, граніт, тощо. Схема дробарного комплексу наведена на Рис. 1.

На дробарних фабриках використовуються дробарки різних типів: конусні, шокові, редуційні та інші. Загальною характеристикою цих дробарок є залежність активної потужності дробарки P від кількості матеріалу M , що знаходиться в дробарці.



1 – дробарка; 2 – електродвигун; 3 – автосамоскид, 4 – залізничний думпкар; M_0 – маса сировини, що завантажується в дробарку, або вантажопідйомність транспортної ємності; Q – продуктивність дробарки; M – маса сировини в дробарці; P – активна потужність електродвигуна; E – електрична енергія, що споживається; U – напруга змінного струму

Рис. 1. Схема дробарного комплексу

Джерело: сформовано автором.

У загальному випадку:

$$P = K \cdot M, \quad (1)$$

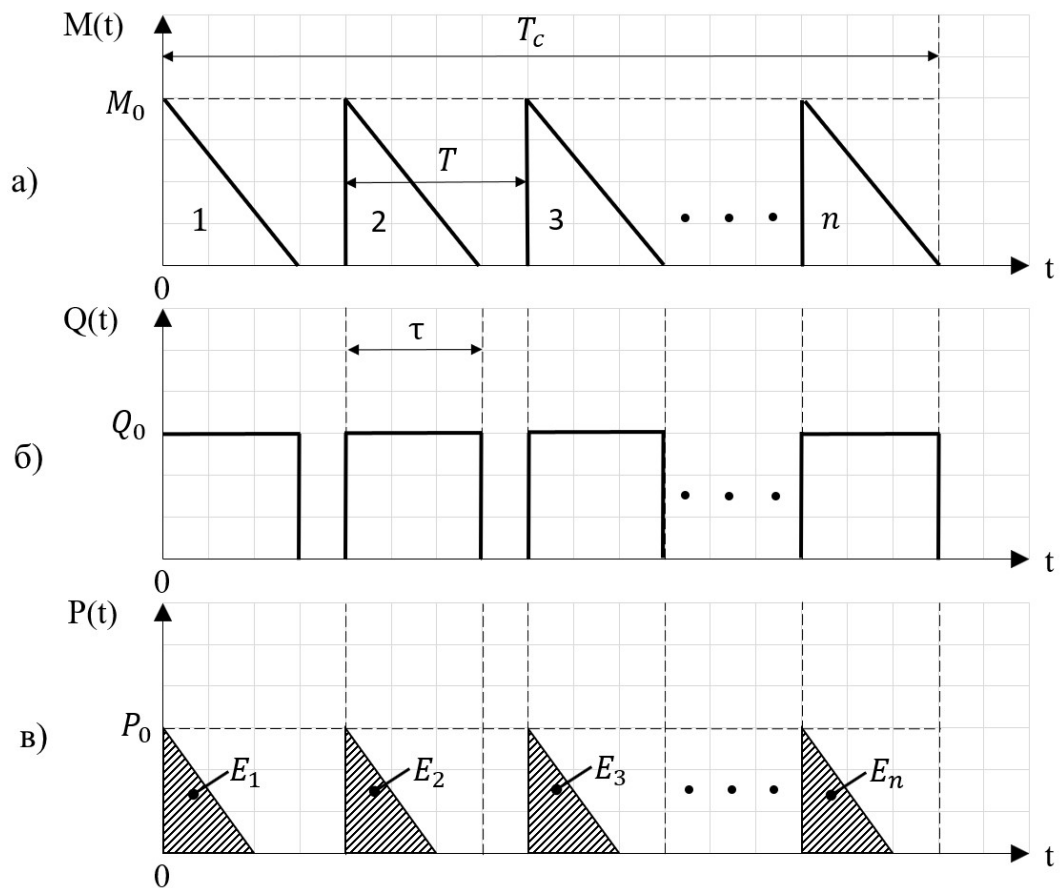
де K – коефіцієнт, що визначається конструкцією дробарки.

Подача сировини на дробарну фабрику має імпульсний характер.

$$\text{Розмірність } [K] = \left[\frac{\text{КВт}}{\text{Т}} \right].$$

Динаміка роботи дробарного комплексу наведена на Рис. 2.

Динаміка зміни запасу сировини в дробарці при постійній продуктивності наведена на Рис. 2а. Динаміка зміни запасу сировини в дробарці – це послідовність трикутних імпульсів, що визначає динаміку енергоспоживання. Динаміка зміни продуктивності дробарки $Q(t)$ наведена на Рис. 2б. Динаміка зміни активної потужності $P(t)$ та електричної енергії, що споживається дробаркою E , наведена на Рис. 2в.



T – період завантаження дробарки сировиною; τ – час дроблення маси M_0 сировини; T_c – час робочої зміни; 1, 2, 3... n – номери розвантажених під час робочої зміни ємностей з сировиною

Рис. 2. Динаміка роботи дробарного комплексу
Джерело: розроблено автором.

Електрична енергія, що споживається при дробленні однієї транспортної ємності:

$$E_1 = \int_{t_0}^{\tau} P(t) dt , \quad (2)$$

Згідно із графічною інтерпретацією інтегралу, електрична енергія – це заштрихована площа на Рис. 2в. Використовуючи формулу площі трикутника, енергія що споживається продовж робочої зміни:

$$E = \frac{P_0 \cdot \tau}{2} \cdot n , \quad (3)$$

З метою виявлення залежності спожитої енергії, від вантажопідйомності транспортних ємностей M_0 та динамічних параметрів, таких як період постачання сировини, у формулу (3) введено співвідношення.

Час дроблення однієї ємності з сировиною:

$$\tau = \frac{M_0}{Q}, \quad (4)$$

де Q – номінальна продуктивність дробарки.

Кількість транспортних ємностей, що завантажуються у дробарку за зміну:

$$n = \frac{M_{\Pi}}{M_0}, \quad (5)$$

де M_{Π} – планове завдання з дроблення сировини за зміну.

Період завантаження сировини у дробарку:

$$T = \frac{T_p}{n} = \frac{T_p \cdot M_0}{M_{\Pi}}, \quad (6)$$

З формули (6) знаходимо:

$$M_0 = \frac{M_{\Pi} \cdot T}{T_p}. \quad (7)$$

Підставимо в формулу (1) вирази (6) і (7):

$$E = \frac{K M_0 \cdot M_{\Pi} \cdot T}{2 Q T_p} \cdot n, \quad (8)$$

Введемо в формулу (8) постійний коефіцієнт:

$$B = \frac{K \cdot M_{\Pi}}{2 T_p}, \quad (9)$$

Одержимо:

$$E = B \frac{M_0 \cdot T}{Q} \cdot n, \quad (10)$$

На підставі формули (10) можна зробити висновок про існування зв'язку між основними параметрами процесу дроблення та дати конкретні пропозиції щодо зменшення витрат електроенергії, наприклад, при розгляді проектів енергозбереження. З метою зменшення витрат електроенергії можна скоротити період постачання сировини T , наприклад, шляхом скорочення простоїв дробарки або використовувати дробарки більш високої продуктивності. Щодо параметрів вантажопідйомності M_0 , кількості ємностей n , то на них накладені обмеження планової переробки та постачання сировини $M_{\Pi} = M_0 \cdot n$.

Розглянемо динаміку енергоспоживання дробарного комплексу, використовуючи методи спектрального аналізу імпульсних процесів. Нехай динаміка зміни запасів сировини $M(t)$ та активної потужності дробарки $P(t)$

визначаються послідовністю експоненціальних імпульсів, наведених на Рис. 3 та на Рис. 4.

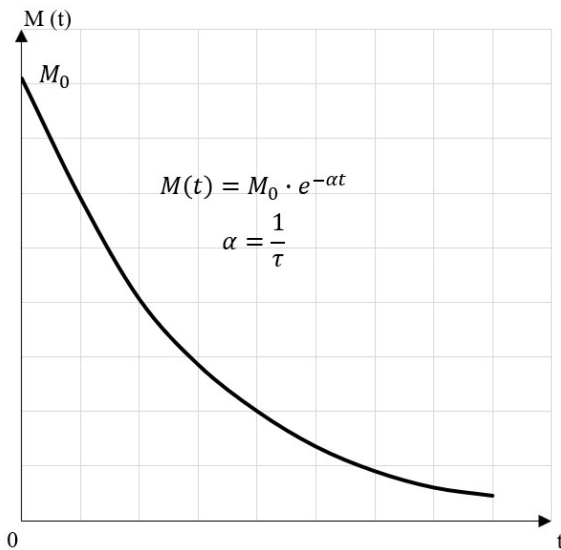


Рис. 3. Графік змін запасу сировини в дробарці після завантаження сировинною масою M_0

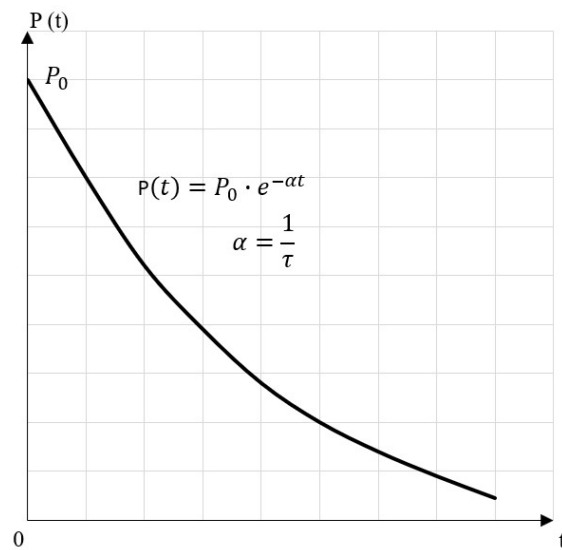


Рис. 4. Графік зміни активної потужності дробарки

Джерело: розроблено автором.

Динаміка роботи дробарного комплексу аналогічна Рис. 2, але замість трикутних імпульсів будуть експоненціальні. Спектральна послідовність експоненціальних імпульсів є решітчастою функцією, огинаючою якої є спектральна щільність одиничного експоненціального імпульсу.

Формула для розрахунку огинаючої спектральної щільності:

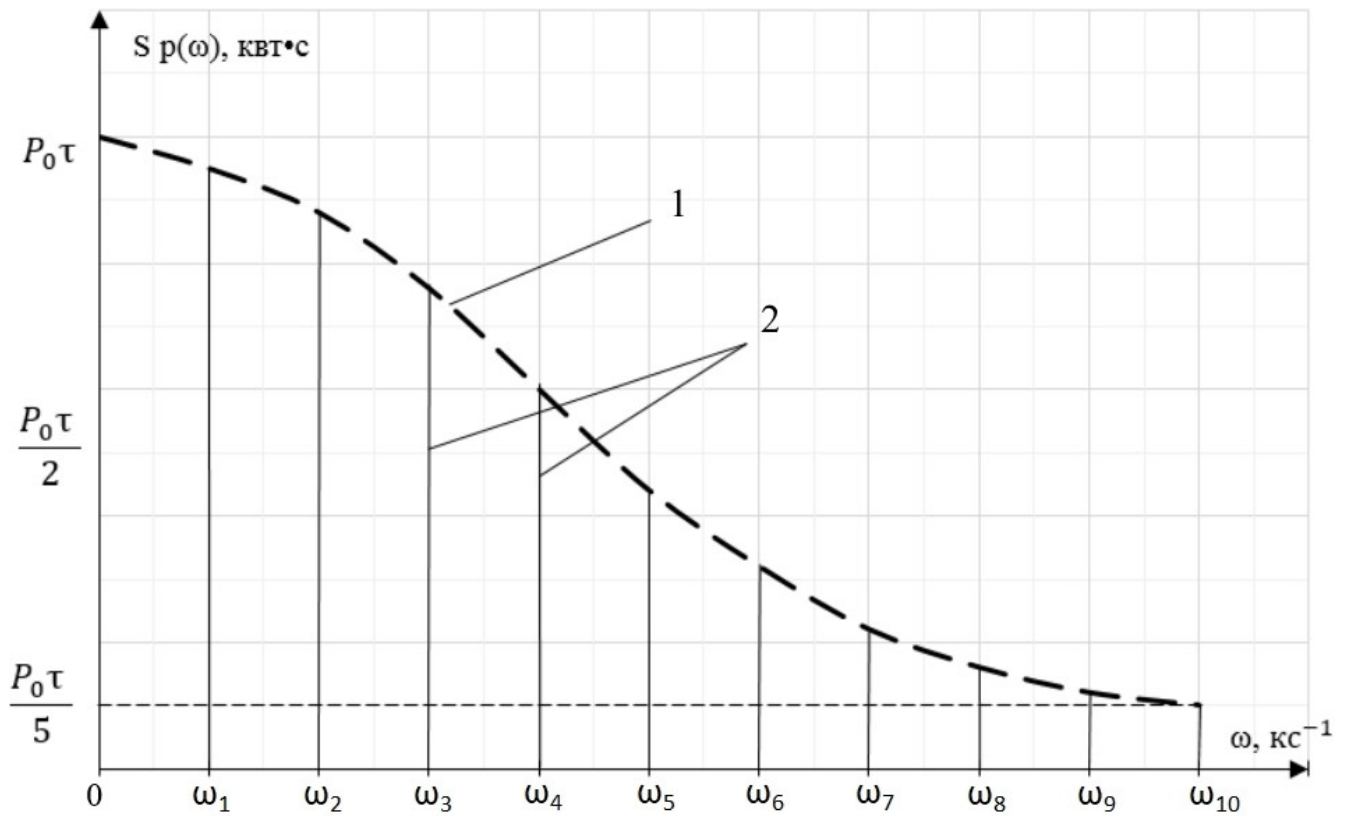
$$S_p \omega = \frac{P_0}{\sqrt{\frac{1}{t^2} + \omega_k^2}}, \quad (11)$$

де $\omega_k = \frac{2\pi K}{T}$, $K=0, 1, 2, 3 \dots K$ -ї гармоніки.

При $\omega=0$

$$S_p(\omega_0) = P_0 \cdot \tau, \quad (12)$$

Інші гармоніки будуть мати енергію, пропорційну формулі (12).



1 – огинаюча спектральної щільності активної потужності; 2 – гармонійні складові енергії, що споживається дробарним комплексом; ω_k – частота k -ї гармоніки

Рис. 5. Спектр активної потужності, що споживається дробарним комплексом

Джерело: розроблено автором.

Розглянемо енергію постійної складової енергії спектру.

$$E_0 = S_p(\omega) = P_0 \cdot \tau, \quad (13)$$

З формули (1) $P_0 = K \cdot M_0$.

З формули (4) $\tau = \frac{M_0}{Q}$.

З формули (7) $M_0 = \frac{M_{п \cdot T}}{T_p}$.

Підставивши формули (1), (4) та (7) в (13), одержимо:

$$E_0 = \frac{KM_0 \cdot M_{п \cdot T}}{Q \cdot T_p} = \frac{KM_{п}}{T_p} \cdot \frac{M_0 \cdot T}{Q}, \quad (14)$$

Визначимо $\frac{KM_{п}}{T_p} = C$.

Розмірність коефіцієнта: $[C] = \frac{\text{кВт}}{\text{Т}} \cdot \frac{\text{Т}}{\text{год}} = \frac{\text{кВт}}{\text{год}}$

$$\text{Тоді} \quad E_0 = C \frac{M_0 \cdot T}{Q}, \quad (15)$$

Згідно із законом Релея повна енергія дискретної частини спектру буде сумою енергій гармонійних складових спектру.

$$E = E_0 + \sum_{K=1}^{10} E_K, \quad (16)$$

де E – повна енергія спектру активної потужності дробарки; E_0 – постійна складова енергії спектру; K – номер гармоніки; E_K – енергія K -ї гармоніки.

Динамічна складова енергії спектру, що визначає динаміку електроспоживання:

$$E_d = \sum_{K=1}^{10} E_K, \quad (17)$$

Визначимо співвідношення між динамічною та постійною складовими енергії спектру. Аналіз спектру дає можливість отримати кількісні дані цього співвідношення:

$$\frac{E_d}{E_0} \approx 40, \quad (18)$$

Згідно із співвідношенням динамічна складова енергії, що визначає динаміку енергоспоживання дробарки, у багато разів більша, ніж постійна складова. Вона визначає ефективність заходів з управління динамікою енергоспоживання з метою енергозбереження.

За формулами (15) та (17) можна розрахувати вартість складових постійної та динамічної загальних витрат на електроенергію.

Вартість постійної складової електроенергії:

$$C_0 = (K_1 + K_2 + K_3)E_0, \quad (19)$$

Вартість динамічної складової електроенергії:

$$C_d = (K_1 + K_2 + K_3)E_d, \quad (20)$$

де K_1 – тарифний коефіцієнт вартості 1 МВт/год електроенергії; K_2 – тарифний коефіцієнт доставки 1 МВт/год електроенергії; K_3 – тарифний коефіцієнт розподілу 1 МВт/год електроенергії.

Загальні витрати електроенергії:

$$C = C_0 + C_d, \quad (21)$$

При нормуванні витрат електроенергії на дробарній фабриці необхідно

розробляти норми витрат постійної та динамічної частини електроенергії, що споживається на процеси дроблення сировини.

Для економії електроенергії в дробарному комплексі необхідно зменшувати простої та підвищувати продуктивність дробарки. Позитивним чинником також є використання менших транспортних ємностей при виконанні завдань із планової переробки сировини. Щодо продуктивності дробарки, то вона визначається типом встановленого обладнання. Тип транспорту – автомобільний або залізничний. Вантажопідйомність визначається проєктними рішеннями. Залишається для управління параметр – мінімальний час простою:

$$t_n = T - \tau \dots \dots \dots (22)$$

Час простою мінімальний $T = \tau$.

Це ідеальний випадок. На практиці встановлюється мінімально допустимий час простою, який контролюється диспетчером.

При перевищенні нормативного часу простою дробарного комплексу на робітників гірничого-транспортного цеху та дробарної фабрики накладаються штрафні санкції, наприклад, їх позбавляють премії.

Висновки та перспективи подальших розвідок у даному напрямі.

Розроблено економіко-математичну модель динаміки електроспоживання дробарної фабрики, що працює разом із транспортним підприємством, яке постачає сировину. Модель пов'язує динамічну складову електричної енергії, що споживається дробарним обладнанням, і логістичні параметри постачання сировини на дробарну фабрику. Встановлено, що при періодичному постачанні сировини на дробарну фабрику вартість динамічної складової електроенергії значно перевищує статичну складову загальних витрат на електроенергію, що споживається дробарною фабрикою. Встановлено, що суттєво знизити витрати електроенергії на дробарних фабриках можна за рахунок мінімізації простоїв дробарного обладнання та скорочення періоду постачання сировини.

Практичне значення дослідження полягає в тому, що запропоновані заходи з управління логістикою постачання рудних та нерудних матеріалів на

дробарні фабрики дозволяють значно знизити вартість електроенергії у виробничій собівартості продукції дробарних фабрик.

Перспективи подальших розвідок у даному напрямі вбачаємо у розробці комп'ютерної інформаційної системи оцінки динаміки енергоспоживання дробарних фабрик.

Література

1. Кравець В. Г., Темченко О. А., Темченко Г. В. Економіко-технологічні передумови формування програми енергозбереження на гірничорудних підприємствах. *Вісник НТУ «Київський політехнічний інститут». Серія «Гірництво»*. 2015. Вип. 27. С. 66-76.

2. Темченко О. А. Сучасні підходи до вирішення проблем диспетчеризації на залізородних кар'єрах. *Збагачення корисних копалин*. 2008. Вип. 34. С. 174-179.

3. Максимов С. В., Темченко Г. В. Дослідження енергомісткості витрат гірничорудних підприємств. *Економічний вісник НГУ*. 2012. №2. С. 52-58.

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

5. Гаренко А. А., Кочура Є. В. Формування собівартості продукції дробарних фабрик в умовах багатозонального тарифу на електроенергію : монографія. Дніпро : Національний гірничий університет, 2012. 146 с.

6. Бабак В. П., Марченко Б. Г., Фриз М. Є. Теорія ймовірностей, випадкові процеси та математична статистика : підручник. Київ : Техніка, 2004. 288 с.

References

1. Kravets', V. H., Temchenko, O. A. and Temchenko H. V. (2015), "Economic and technological prerequisites for the formation of an energy saving

program at mining enterprises”, *Visnyk NTU “Kyivs'kyj politekhnichnyj instytut”*. Seriiia “Hirnytstvo”, vol. 27, pp. 66-76.

2. Temchenko, O. A. (2008), “Modern approaches to solving scheduling problems in iron ore quarries”, *Zbahachennia korysnykh kopalyn*, vol. 34, pp. 174-179.

3. Maksymov, S. V. and Temchenko, H. V. (2012). “Research on the energy consumption of mining enterprises”, *Ekonomichnyj visnyk NHU*, vol. 2, pp. 52-58.

4. Bielkina, I. A., Lepa, R. M. and Kochura, Ye. V. (2013), *Ekonomiko-matematychni modeliuvannia vplyvu rezhymiv rudopodachi na efektyvnist' vykorystannia ekonomichnoho potentsialu hirnycho-zbahachuval'noho pidpriemstva* [Economic and mathematical modeling of the influence of ore supply regimes on the efficiency of using the economic potential of a mining and beneficiation enterprise], Natsional'nyj hirnychyj universytet, Dnipro, Ukraine.

5. Harenko, A. A. and Kochura, Ye. V. (2012), *Formuvannia sobivartosti produktsii drobarnykh fabryk v umovakh bahatozonal'noho taryfu na elektroenerhiu* [The formation of the cost price products of crushing factories in the conditions of a multi-stage tariff for electricity], Natsional'nyj hirnychyj universytet, Dnipro, Ukraine.

6. Babak, V. P., Marchenko, B. H. and Fryz M. Ye. (2004), *Teoriia jmovirnostej, vypadkovi protsesy ta matematychna statystyka* [Probability theory, random processes and mathematical statistics], Tekhnika, Kyiv, Ukraine.

Стаття надійшла до редакції 03.03.2024 р.