

**Кочура Д.В.**

аспірант кафедри економіки та економічної кібернетики,  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Демиденко М.А.**

кандидат технічних наук, доцент,  
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

**Kochura Denys, Demydenko Mykhailo**

Dnipro University of Technology

## ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ ЗБАГАЧУВАЛЬНОЇ ФАБРИКИ

*У статті розглянуто залежність витрат електроенергії на динаміку енергоспоживання від динаміки постачання руди в бункера збагачувальної фабрики, а саме від періоду завантаження та його тривалості. Розроблено економіко-математична модель динаміки енергоспоживання збагачувальної фабрики. Виявлено закономірності впливу параметрів завантаження рудою бункерів збагачувальної фабрики на динаміку формування витрат на електроенергію при виробництві залізорудного концентрату. Одержано математичні залежності витрат на динамічну складову електричної енергії від часових параметрів процесу завантаження руди в бункера збагачувальної фабрики, а саме від періоду та часу завантаження. Розроблено організаційні та економічні заходи по завантаженню бункерів збагачувальної фабрики, що забезпечують економію електроенергії. Виявлено закономірності впливу параметрів завантаження рудою бункерів збагачувальної фабрики на динаміку формування витрат на електроенергію при виробництві залізорудного концентрату. Розроблено принципи побудови системи матеріального стимулювання оперативного-диспетчерського персоналу за економію електричної енергії на основі результатів економіко-математичного моделювання. Встановлено, що енергетична складова собівартості виробництва залізорудного концентрату залежить не тільки від кількості та якості руди, а й від динамічних параметрів процесу завантаження руди в бункери збагачувальної фабрики, при тому ця встановлена залежність має нелінійний характер від періоду та часу завантаження.*

**Ключові слова:** енергозбереження, собівартість виробництва залізорудного концентрату, мінімізація витрат на електроенергію, економіка збагачення руд.

**Постановка проблеми.** Гірничорудна промисловість України характеризується високою енергоємністю, що значною мірою визначається застарілими виробничими фондами, зношеністю обладнання, недосконалістю технологій та іншими чинниками. У теперішній час рівень електроспоживання на одиницю продукції на гірничо-збагачувальних комбінатах України у декілька разів вищий ніж у розвинутих країнах [7]. Незважаючи на значне зростання тарифів на електроенергію використання її недостатньо ефективно. Виробництво залізорудного концентрату на гірничо-збагачувальних підприємствах є основою сировинної бази чорної металургії України. При цьому відомо, що витрати на електроенергію становлять близько 55-60% у складі собівартості товарної продукції збагачувальних фабрик. Процес збагачення руди зі змінними властивостями являє собою коливальний динамічний процес, що зумовлює підвищення витрат електроенергії на колювання великих мас рудної сировини, збільшуючи при цьому енергетичну складову собівартості вироб-

ництва залізорудного концентрату. У цих умовах проблема зниження динамічної енергетичної складової собівартості виробництва залізорудного концентрату на основі моделювання динаміки енергоспоживання є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблеми енергоефективності та енергозбереження на гірничих та гірничорудних підприємствах присвячені роботи Афанасьєва В.Г. [1], Касьянкової Н.В. [4], Ліра В.Е. [6], Максимова С.В. [7], Темченко О.А. [5] та інших вчених. Теперішні роботи в галузі енергозбереження присвячені розробці комплексних програм енергозбереження на гірничо-рудних підприємствах, що вміщують організаційні заходи та модернізацію застарілого технологічного обладнання на нове – менш енергоємне [5]. В роботі [8] зроблено аналіз незадовільного сучасного стану електроспоживання та енергозбереження на гірничо-збагачувальних комбінатах. Як показник електроспоживання пропонуються питомі витрати електроенергії на одиницю продукції. В роботі [3] розглянуто формування

собівартості продукції дробарних фабрик в умовах багатозонного тарифу на електроенергію. У праці [2] виконано моделювання впливу обсягів партій поставок руди на собівартість концентрату. Недоліком цієї роботи є те що рудопостачання на збагачувальну фабрику безпосередньо здійснюється системою загрузки бункерів, а не залізничними думпкарами. Тому вплив алгоритму загрузки бункерів на енергоспоживання збагачувальної фабрики не розглядався.

На сьогодні не існує досліджень впливу динаміки рудопостачання в бункера збагачувальної фабрики на динаміку енергоспоживання та динаміку витрат на електроенергію в процесі виробництва залізородного концентрату.

**Формулювання цілей статті.** Метою є встановлення залежностей витрат електроенергії на динаміку енергоспоживання від динаміки постачання руди в бункера збагачувальної фабрики, а саме від періоду завантаження та його тривалості.

**Виклад основного матеріалу.** Збагачувальна фабрика являє собою ряд технологічних ліній, що працюють паралельно. Схему однієї з таких ліній наведено на рис. 1.

Для математичного моделювання встановлено такі умови:

– витрати на електроенергію під час збагачення руди залежать від електричної активної потужності  $P$ , оскільки споживана обладнанням за час  $t$  електрична енергія має таке значення:

$$E = P \cdot t \quad (1.1),$$

– активна потужність:

$$P = P_{xx} + \bar{P} + \tilde{P}, \quad (1.2)$$

де  $P_{xx}$  – потужність обладнання на холостому ході;  $\bar{P}$  – середнє значення активної потужності;  $\tilde{P}$  – дина-

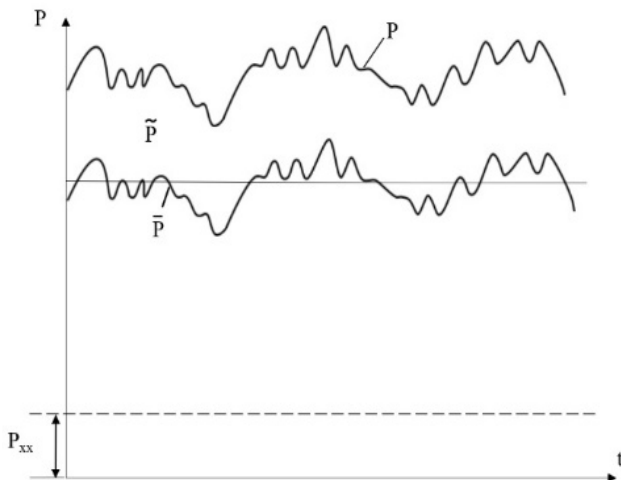


Рис. 2. Графіки складових активної потужності, яку споживає обладнання в процесі збагачення руди

Джерело: власна розробка авторів

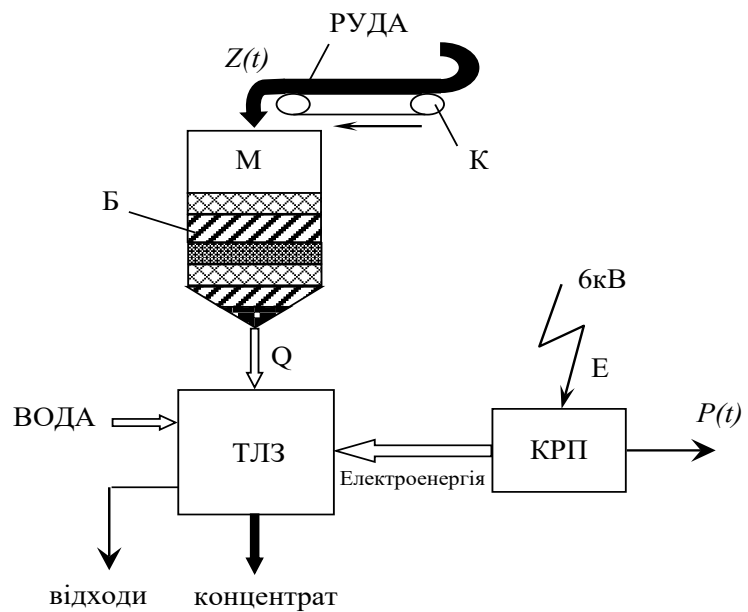


Рис. 1. Схема технологічної лінії збагачення руди

ТЛЗ – технологічна лінія збагачення; Б – бункер з рудою; К – конвеєр подачі руди; КРП – комплексний розподільчий пристрій; Q – продуктивність по руді на вході ТЛЗ; M – маса руди в бункері; P(t) – активна потужність споживання ТЛЗ як функція часу t; Z(t) – імпульсний процес подачі руди в бункер; E – електрична енергія

Джерело: власна розробка авторів

мічна складова електричної потужності обладнання.

Величина параметра  $P_{xx}$  визначається потужністю, споживаною обладнанням технологічної лінії в холостому режимі без подачі руди;

Параметр  $\bar{P}$  залежить від продуктивності технологічної лінії по руді (рис. 2). Величину параметра  $\bar{P}$  зумовлено зміною якісних характеристик руди та динамікою рудопостачання.

Отже, динамічна складова активної потужності спожитої обладнанням є центрованою випадковою величиною з математичним очікуванням  $\bar{P}$ . За літературними даними [3] параметр  $\bar{P}$  визначається динамікою процесу збагачення і складає 20-30% активної потужності, що споживається в процесі збагачення. Функція  $\tilde{P}(t)$  відображає стаціонарний випадковий процес, математичне очікування якого дорівнює нулю.

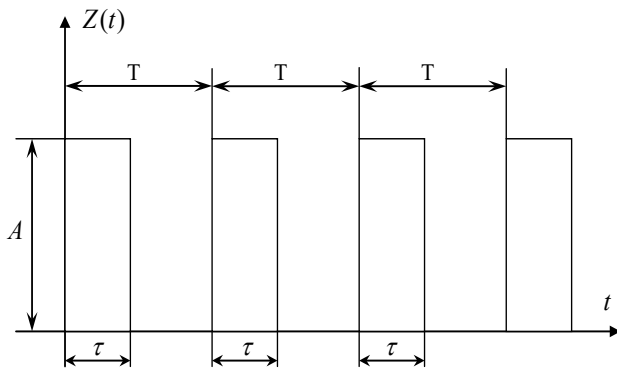
Графік імпульсного процесу подачі руди в бункер наведено на рис. 3.

Імпульсний характер довантаження руди в бункер зумовлено режимом роботи головного конвеєра й автостели, яка послідовно завантажує всі бункери збагачувальної фабрики.

Спектральна щільність цього процесу має такий вигляд:

$$S_k(\omega) = A \frac{\sin \frac{\omega_k \tau}{2}}{\frac{\omega_k T}{2}}, \quad (1.3),$$

тут  $\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

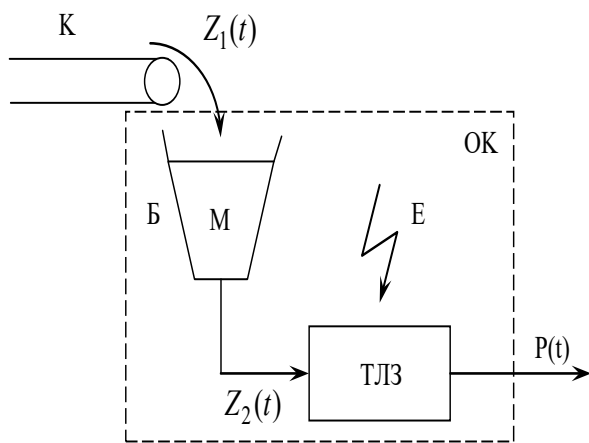


**Рис. 3. Графік процесу подачі руди в бункер**

Позначення:  $A$  – амплітуда імпульсу;  $T$  – період;  $\tau$  – довжина імпульсу.

Джерело: власна розробка авторів

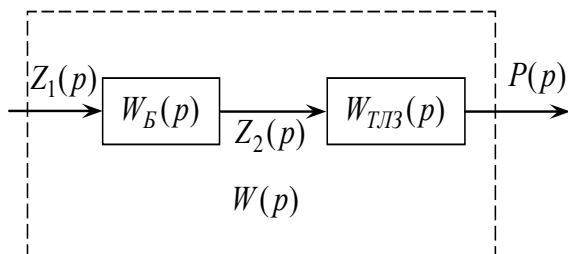
Розглянемо технологічну схему збагачення руди (рис. 4) з позицій теорії керування та побудуємо функціональну й структурну схеми ТЛЗ (рис. 5) як об'єкта керування.



**Рис. 4. Функціональна схема ТЛЗ**

ОК – об'єкт керування.  $Z_1(t)$  – показник якості руди на вході в бункер;  $Z_2(t)$  – показник якості руди на виході з бункера та на вході в ТЛЗ;  $M$  – маса руди в бункері.

Джерело: власна розробка авторів



**Рис. 5. Структурна схема ТЛЗ**

$W_B(p)$  – передатна функція бункера;  $W_{ТЛЗ}(p)$  – передатна функція ТЛЗ;  $Z_1(p)$ ,  $Z_2(p)$ ,  $P(p)$  – відображення через оператор Лапласа функцій часу  $Z_1(t)$ ,  $Z_2(t)$ ,  $P(t)$ ,  $W(p)$  – передатна функція об'єкта керування, де  $p$  – оператор Лапласа.

Джерело: власна розробка авторів

Передатна функція об'єкта керування в разі послідовного з'єднання об'єктів

$$W(p) = W_B(p) \cdot W_{ТЛЗ}(p) \quad (1.4),$$

Передатна функція бункера з рудою

$$W_B(p) = \frac{\kappa_B}{T_B(p) + 1} \quad (1.5),$$

де  $\kappa_B$  – передатний коефіцієнт бункера;  $T_B$  – стала часу заповнення бункера;

Передатна функція ТЛЗ

$$W_{ТЛЗ}(p) = \frac{\kappa_{ТЛЗ}}{T_{ТЛЗ}(p) + 1} e^{-p\tau_{ТЛЗ}} \quad (1.6),$$

де  $\kappa_{ТЛЗ}$  – передатний коефіцієнт ТЛЗ;  $T_{ТЛЗ}$  – стала часу заповнення бункера;  $\tau_{ТЛЗ}$  – транспортне запізнення в роботі ТЛЗ.

Передатна функція ТЛЗ:

$$W(p) = \frac{\kappa_B \cdot \kappa_{ТЛЗ}}{(T_B p + 1)(T_{ТЛЗ} p + 1)} e^{-p\tau_{ТЛЗ}} \quad (1.7),$$

Замінюючи оператор Лапласа  $p$  на параметр  $j\omega$  та виконуючи елементарні перетворення, одержимо модуль комплексного коефіцієнта передачі ТЛЗ, а саме:

$$|k(j\omega)| = \frac{\kappa}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_1)^2 + \omega^2 T_2^2}} \quad (1.8),$$

тут  $\kappa = \kappa_B \cdot \kappa_{ТЛЗ}$ ;  $T_1 = T_B$ ;  $T_2 = T_{ТЛЗ}$ ;  $\omega$  – колова частота.

Із теорії управління відомо, що спектральна щільність сигналу активної потужності що споживається обладнанням технологічної лінії збагачення,

$$S_2(\omega) = S_k(\omega) \cdot |k(j\omega)|^2 = A \frac{|\sin \frac{\omega_k \tau}{2}|}{\frac{\omega_k T}{2}} \cdot \frac{\kappa^2}{(1 - \omega^2 T_1)^2 + \omega^2 T_2^2} \quad (1.9),$$

Цей параметр впливає на величину динамічної складової електричної потужності, що споживається в процесі збагачення руди на коливання, тобто

$$P_k = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty S_2(\omega) d\omega \quad (1.10),$$

За допомогою оберненого перетворення Фур'є можливо за спектральною щільністю процесу  $S_2(\omega)$  розрахувати витрати електроенергії на динаміку процесу збагачення руди за заданий період часу  $T_s$  (зміна, доба, місяць).

$$E = \int_0^{T_s} \tilde{P}_k(t) dt \quad (1.11),$$

де  $E$  – витрати електроенергії на динаміку процесу збагачення.

Виконаємо моделювання динаміки енергоспоживання. Метою моделювання є пошук раціонального співвідношення періоду  $T$  та часу  $\tau$  завантаження бункерів збагачувальної фабрики, яке може відповідати мінімальному значенню енергетичної складової собівартості виробництва концентрату.

Моделювання виконували скориставшись програмним пакетом Mathcad, на основі розроблених математичних моделей для різних значень параметрів завантаження бункерів збагачувальної фабрики. Результати моделювання наведені у табл.1.

Таблиця 1

Результати моделювання

№	A, %	τ, год	T, год	E, квт*год
1	2	3	4	5
1	4	4	12	8,51 · 10 <sup>4</sup>
2	4	3	12	6,94 · 10 <sup>4</sup>
3	4	2	12	4 · 10 <sup>4</sup>
4	4	1	12	2,54 · 10 <sup>4</sup>
5	4	4	16	1,46 · 10 <sup>5</sup>
6	4	3	16	1,14 · 10 <sup>5</sup>
7	4	2	16	7,88 · 10 <sup>4</sup>
8	4	1	16	4,02 · 10 <sup>4</sup>
9	4	4	4	2,7 · 10 <sup>-14</sup>
10	4	3	4	155,93
11	4	2	4	220,512
12	4	1	4	155,93
13	4	4	8	6106
14	4	3	8	5,642 · 10 <sup>3</sup>
15	4	2	8	4,3 · 10 <sup>3</sup>
16	4	1	8	2,34 · 10 <sup>3</sup>

Джерело: власна розробка авторів

За результатами моделювання побудовано графіки (рис. 6.) Аналіз результатів моделювання показує, що для базового режиму завантаження бункерів рудою при періоді T = 8 год, тривалість завантаження бункерів рудою τ = 2 години, енергія, що споживається на коливання технологічного процесу E = 4,3 · 10<sup>3</sup> квт · год за одну зміну або 12900 квт · год за добу.

Найкращий режим завантаження бункеру, що характеризується мінімальним значенням енергоспоживання, повинен мати такі параметри:

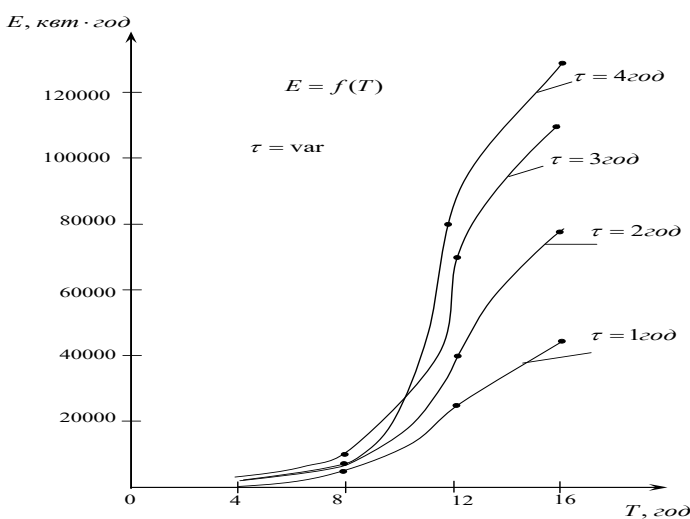


Рис. 6. Графік залежності витрат електроенергії на коливання E від періоду завантаження бункерів T й часу завантаження τ

Джерело: власна розробка авторів

- період завантаження T = 4 год;
- тривалість завантаження бункеру τ = 2 год;
- енергія, що споживається на коливання технологічного процесу E = 156 квт · год за зміну або 468 квт · год за добу.

Економія електроенергії за добу при однозонному тарифі 2 грн за квт · год дорівнює 12432 квт · год. Грошове вираження економії становить 24864 грн, а за це рік близько 9 млн грн. Рудозбагачувальна фабрика складається з ряду паралельно працюючих технологічних ліній збагачення. Розглянемо засади управління завантаженням рудою бункерів рудозбагачувальної фабрики в режимі енергозбереження, з використанням методів матеріального стимулювання оперативно-диспетчерського персоналу. На рис. 7 наведено схему рудозбагачувальної фабрики.

Автостелла A завантажує рудою бункери рудозбагачувальної фабрики з періодом завантаження T. Для витримування заданого періоду T, моніторингу, контролю та управління процесом завантаження треба розробити методи матеріального стимулювання оперативно-диспетчерського персоналу за підтримку оптимального режиму завантаження бункерів з метою економії електроенергії. Розглянемо спектральні щільності динамічної складовою активної потужності P, що споживається рудозбагачувальною фабрикою для різних режимів роботи, на рис. 8.

Відомо, що кутова частота  $\omega = 2\pi f$ , де f – частота коливань;  $f = \frac{1}{T}$ , де T – період коливань.

Резонансні частоти  $\omega_1, \omega_2$ , відповідають плановому періоду завантаження бункерів згідно із формулою:

$$\omega_1 = \omega_2 = \frac{2\pi}{T_n} \tag{1.12}$$

Динамічна складова електричної енергії що споживається збагачувальною фабрикою при відмінному

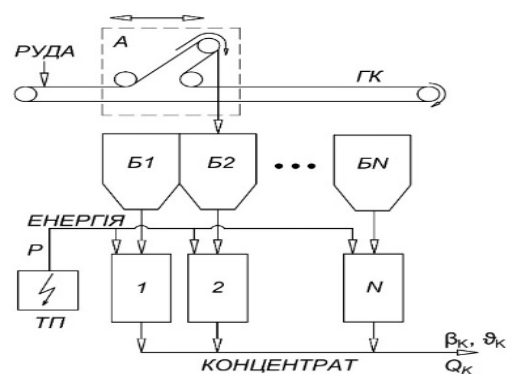
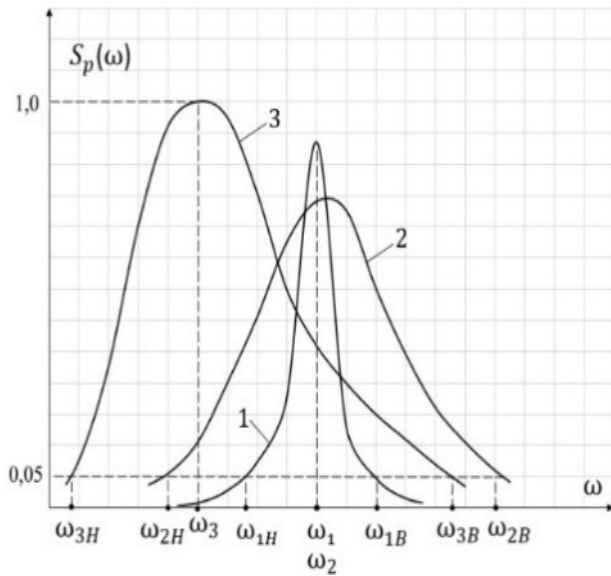


Рис. 7. Схема рудозбагачувальної фабрики

Позначення: A – автостелла; GK – головний конвеєр; B1...BN – бункери з рудою; 1, 2 ... N – технологічні лінії збагачення; ТП – трансформаторна електростанція; P – електрична активна потужність; βк – масова доля заліза в концентраті; Qк – продуктивність фабрики за концентратом; Qк – втрати залізу у відходах.

Джерело: власна розробка авторів



**Рис. 8. Спектральні щільності  $S_p(\omega)$  динамічної складової активної потужності, що споживається рудозбагачувальною фабрикою**

Позначення: 1 – спектральна щільність  $S_{p1}(\omega)$ , що відповідає відмінному режиму роботи системи завантаження бункерів збагачувальної фабрики; 2 – базова спектральна щільність  $S_{p2}(\omega)$ , що відповідає запланованому режиму роботи оперативно-диспетчерського персоналу по виконанню алгоритму завантаження бункерів; спектральна щільність  $S_{p3}(\omega)$ , що відповідає незадовільному режиму роботи оперативно-диспетчерського персоналу по виконанню планового режиму завантаження бункерів;  $\omega_1, \omega_2$  – резонансні частоти, що відповідають заданому або плановому періоду завантаження бункерів  $T_n$ .

$\omega_{ni}, \omega_{ib}$  – відповідно нижні та верхні межі суттєвих частот спектральних щільностей, де  $i = 1, 2, 3$ .

Джерело: власна розробка авторів

виконанні оперативним персоналом режиму завантаження бункерів:

$$E_1 = \frac{T_c}{2\pi} \int_{\omega_{1n}}^{\omega_{1b}} S_{p1}(\omega) d\omega, \quad (1.13),$$

де  $T_c$  – час спостереження, або звітності (зміна, доба, місяць).

Динамічна складова електричної енергії, що споживається збагачувальною фабрикою при плановому режимі завантаження бункерів:

$$E_2 = \frac{T_c}{2\pi} \int_{\omega_{2n}}^{\omega_{2b}} S_{p2}(\omega) d\omega. \quad (1.14),$$

Динамічна складова електричної енергії, що споживається збагачувальною фабрикою при незадовільному режимі завантаження бункерів:

$$E_3 = \frac{T_c}{2\pi} \int_{\omega_{3n}}^{\omega_{3b}} S_{p3}(\omega) d\omega. \quad (1.15),$$

Зрозуміло, що  $E_1 < E_2 < E_3$ .

Розробимо систему матеріального стимулювання оперативно-диспетчерського персоналу збагачувальної фабрики за економію електроенергії при зав-

таженні бункерів рудою. В системі необхідно врахувати результати економії динамічної складової електроенергії, та напруженість роботи оперативно-диспетчерського персоналу, що визначається середньою кількістю працюючих секцій  $\bar{N}$  впродовж розрахункового, або звітного періоду, наприклад місяць. Кількість працюючих секцій змінюється у зв'язку із планом виробництва концентрату, відмовами обладнання, відсутністю електроенергії та інше.

Середня кількість працюючих технологічних ліній за звітний період  $T$  (місяць):

$$\bar{N} = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K N_i, \quad (1.17),$$

де  $K$  – кількість робочих змін за звітний період (місяць);  $N_i$  – кількість працюючих технологічних ліній під час  $i$  – зміни.

Начислення премії за економію динамічної складової електроенергії, що споживається збагачувальною фабрикою здійснюється за алгоритмом, схема якого наведена на рис. 9.

При виконанні планових показників  $\beta_{кп}, \vartheta_n, q_n, M_n$  наведених на рис. 9 оперативно-диспетчерському персоналу призначається премія у розмірі 15% до базової ставки.

Згідно із досягнутими результатами роботи по економії динамічної складової електричної енергії та напруженості роботи оперативно-диспетчерському персоналу збагачувальної фабрики додатково призначається премія у розмірі:

$$\Pi = \frac{B \cdot 1,5\%}{100\%} \cdot N_3, \quad (1.18),$$

де  $N_3$  – номер умовної зони результатів роботи;  $B$  – базова ставка.

В кінці місяця визначаються підсумки результатів роботи оперативно-диспетчерського персоналу у вигляді координат точки  $R$ , наприклад  $R(E_{DR}, \bar{N}_R)$ , що відповідає зоні 8 дивіться рис. 9.

Відповідний розмір премії буде:

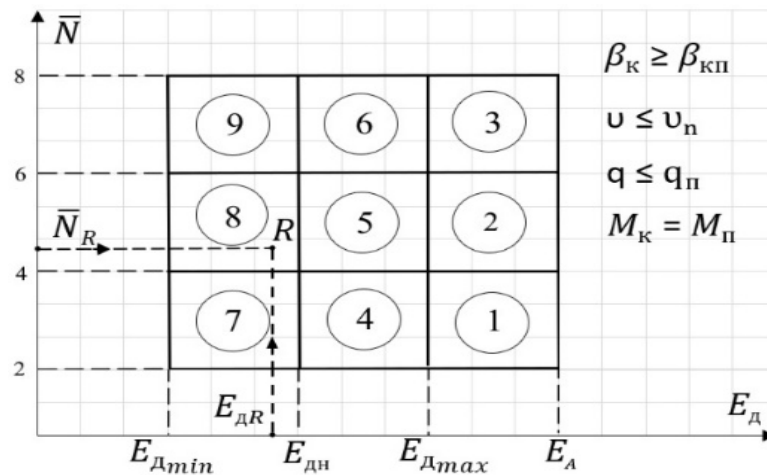
$$\Pi = \frac{8 \cdot 1,5\%}{100\%} \cdot B \quad (1.19),$$

тобто, 12% додатково від базової ставки. Загальна премія оперативно-диспетчерському персоналу буде складати у цьому випадку 27% від базового окладу.

У випадку, коли фактичні витрати динамічної складової електроенергії  $E_d > E_{dmax}$ , то на працівників накладається штраф або їм взагалі не виплачується премія.

Наприклад в зоні 3 не виплачується премія за економію динамічної складової електричної енергії, а в зонах 1, 2 накладається додаткова штраф відповідно 3% та 1,5% від базової ставки.

За розглянутою методикою економічного стимулювання операторів завантаження бункерів збагачувальної фабрики необхідно стимулювати також роботу операторів млинів. Процеси подрібнення руди на збагачувальних фабриках є найбільш енергоємними. Тех-

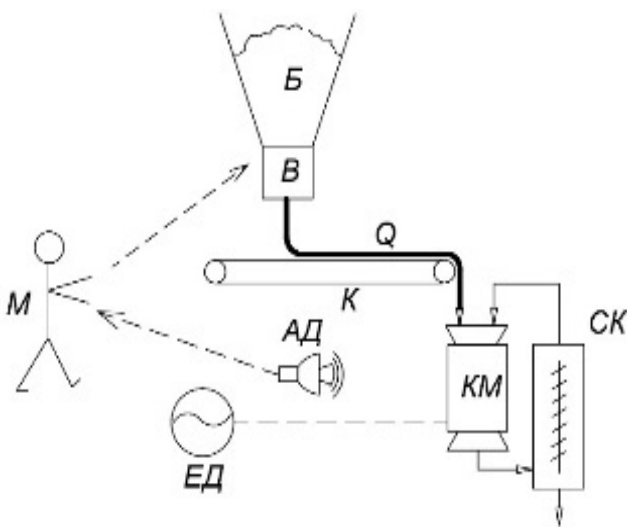


**Рис. 9. Схема визначення премії за економію динамічної складовою електроенергії, що споживається збагачувальною фабрикою**

Позначення:  $\beta_{кп}$  – планове значення масової долі заліза в концентраті;  $v_n$  – планове значення витрат заліза у відходах;  $q_n$  – планове, або нормативне значення питомих витрат електроенергії;  $M_k$  – плановий обсяг виробництва концентрату;  $E_{d\ min}$ ,  $E_{d\ n}$ ,  $E_{d\ max}$  – відповідно мінімально, номінально та максимально допустимі витрати динамічної складової електричної енергії.  $E_A$  – аварійний рівень електроспоживання.

①②③④⑤⑥⑦⑧⑨ – умовні зони результатів роботи оперативно-диспетчерського персоналу за звітний період, наприклад місяць.

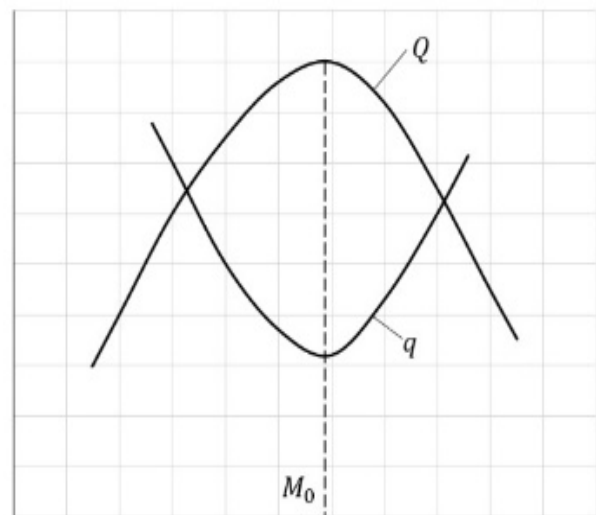
Джерело: власна розробка авторів



**Рис. 10. Технологічна схема подрібнювального агрегату**

Позначення: Б – бункер з рудою; К – конвеєр; КМ – кульовий млин; СК – спіральний класифікатор; ЕД – електричний двигун млина; М – млинар; З – завантажувач руди; Q – продуктивність млина; АА – акустичний давач завантаження млина рудою.

Джерело: власна розробка авторів



**Рис. 11. Статичні характеристики подрібнювального агрегату**

Позначення:  $q$  – питомі витрати електроенергії;  $M_0$  – оптимальне завантаження млина рудою.

Джерело: власна розробка авторів

нологічна схема подрібнювального агрегату наведена на рис. 10. Статичні характеристики подрібнювального агрегату наведені на рис. 11.

При коливаннях властивостей руди коливається режим роботи млина. Електрична потужність електричного двигуна млина ЕД складає тисячі кВт. Таких млинів на одній секції три – чотири, а на збагачувальній фабриці десятки. Електрична енергія, що споживається млинами складає десятки або сотні тисяч кВт. Динамічна складова електричної енергії залежить від завантаження млина рудою. Млинар повинен підтримувати оптимальне завантаження млина  $M_0$ , за допомогою сигналу акустичного давача завантаження та завантажувача рудою. Цей процес може бути автоматизований, або здійснюватися вручну. У зв'язку із відсутністю коштів та інвестицій на автоматизацію, цей процес реалізується здебільш вручну.

Аналіз статичних характеристик млина показує, що при підтримуванні оптимального завантаження  $M_0$  досягається мінімальне значення питомих витрат електроенергії. Підтримування режиму роботи млина в області оптимума дозволяє стабілізувати технологічний процес подрібнення та його електроспоживання, що поліпшує динаміку електроспоживання збагачувальної фабрики та зменшує динамічну складову електричної енергії. Крім того стабілізація електроспоживання технологічного процесу зменшує коливання

масової долі заліза концентраті, що підвищує прибуток гірничо-збагачувального комбінату.

**Висновки.** Проведені дослідження дозволяють засвідчити, що:

– енергетична складова собівартості залізородного концентрату залежить від динаміки постачання руди в бункер збагачувальної фабрики, зокрема від параметрів періоду завантаження і його тривалості;

– розробляючи програми й плани енергозбереження необхідно передбачити заходи для забезпечення ритмічності роботи підприємства з метою зниження дисперсії коливань активної потужності, що споживається електрообладнанням;

– організаційне керування з метою зменшення витрат електроенергії на збагачувальній фабриці можливе за рахунок раціональних методів завантаження бункерів рудою;

– розроблено систему матеріального стимулювання оперативно-диспетчерського персоналу збагачувальної фабрики, яка враховує економію електричної енергії за рахунок управління завантаженням рудою бункерів збагачувальної фабрики та напруженість роботи персоналу.

Подальший розвиток проведених досліджень передбачає розробку посадових інструкцій для диспетчерського персоналу рудозбагачувальної фабрики та впровадження системи матеріального стимулювання працівників.

#### Список літератури:

1. Афанасьєв М.В., Салашенко Т.І. Стратегія підвищення енергоефективності промислового регіону: теоретико-методичні аспекти формування. Харків : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014.
2. Белкінка І.А. Моделювання впливу обсягів партій поставок руди на собівартість концентрату. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2012. № 3. С. 52–53. URL: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1239/1237>
3. Гаренко А.А., Кочура С.В. Формування собівартості продукції дробарних фабрик в умовах багатозонального тарифу на електроенергію : моногр. М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет». Дніпро : НГУ, 2012. 112 с.
4. Касьянова Н.В. Впровадження стратегії енергозбереження на промислових підприємствах. *Ефективна економіка*. 2017. № 2. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5916>
5. Кравець В.Г., Темченко О.А., Темченко Г.В. Економіко-технологічні передумови формування програми енергозбереження на гірничорудних підприємствах. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво»*. 2015. № 27. С. 66–76. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_gir\\_2015\\_27\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_gir_2015_27_12)
6. Ліп В.Е., Письменна У.Є. Економічний механізм реалізації політики енергоефективності в Україні. Київ, 2010. 208 с.
7. Максимов С.В., Темченко Г.В. Дослідження енергомісткості витрат гірничорудних підприємств. *Економічний вісник Національного гірничого університету*. 2012. № 2. С. 52–58. URL: [https://ev.nmu.org.ua/docs/2012/2/EV20122\\_052-058.pdf](https://ev.nmu.org.ua/docs/2012/2/EV20122_052-058.pdf)
8. Темченко О.А., Тютюнник Ю.М. Визначення ключових факторів розвитку підприємств гірничо-металургійного комплексу України. *Економічний вісник Національного гірничого університету*. 2015. № 1. С. 89–97. URL: [https://ev.nmu.org.ua/docs/2015/1/EV20151\\_089-096ua.pdf](https://ev.nmu.org.ua/docs/2015/1/EV20151_089-096ua.pdf)
9. Bazaluk O., Ashcheulova O., Mamaikin O., Khorolskyi A., Lozynskyi V. & Saik P. Innovative activities in the sphere of mining process management. *Frontiers in Environmental Science*. 2022. № 10. С. 878–977. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878977>
10. Diachenko G.G., Aziukovskyi O.O. Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovyi Visnyk*. 2020. № 1. С. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-1/080>

#### References:

1. Afanasyev M. V., Salashchenko T. I. (2014) *Strategy for increasing energy efficiency of the industrial region: theoretical and methodological aspects of formation* [Stratehiia pidvyshchennia enerhoefektyvnosti promyslovoho rehionu: teoretyko-metodychni aspekty formuvannia]. Kharkiv: Ed. HNEU named after S. Kuznetsia. (in Ukrainian)
2. Belkinka I. A. (2012) Modeliuvannia vplyvu obshiahv partii postavok rudy na sobivartist kontsentratu [Modeling of the impact of volumes of ore supply batches on the cost of the concentrate]. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, no. 3, pp. 52–53. Available at: <https://visnyk.vntu.edu.ua/index.php/visnyk/article/view/1239/1237> (in Ukrainian)

3. Harenko A. A., Kochura E. V. (2012) *Formation of the cost price of products of crushing factories in the conditions of a multi-zonal tariff for electricity* [Formuvannya sobivartosti produktsii drobarnykh fabryk v umovakh bahatozonalnoho taryfu na elektroenerhiu]; monogr. Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, State University "National Mining University". Dnipro: NSU, 112 p. (in Ukrainian)
4. Kasyanova N. V. (2017) Vprovadzhennia stratehii enerhozberezhennia na promyslovykh pidpriemstvakh [Implementation of energy saving strategy at industrial enterprises]. *Effective Economy*, no. 2. Available at: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5916> (in Ukrainian)
5. Kravets V. G., Temchenko O. A., Temchenko G. V. (2015) Ekonomiko-tekhnologichni peredumovy formuvannia prohramy enerhozberezhennia na hirnychorudnykh pidpriemstvakh. [Economic and technological prerequisites for the formation of an energy saving program at mining enterprises]. *Bulletin of NTUU "KPI". Series «Mining»*, no. 27, pp. 66–76. Available at: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI\\_gir\\_2015\\_27\\_12](http://nbuv.gov.ua/UJRN/VKPI_gir_2015_27_12) (in Ukrainian)
6. Lear V. E., Pismenna U. E. (2010) The economic mechanism of energy efficiency policy implementation in Ukraine [Ekonomichniy mekhanizm realizatsii polityky enerhoefektyvnosti v Ukraini]. Kyiv. 208 p. (in Ukrainian)
7. Maksimov, S.V., Temchenko, G.V. (2012). Doslidzhennia enerhomistkosti vytrat hirnychorudnykh pidpriemstv [Study of the energy consumption of mining enterprises]. *Economic Bulletin of the National Mining University*, no. 2, pp. 52–58. Available at: [https://ev.nmu.org.ua/docs/2012/2/EV20122\\_052-058.pdf](https://ev.nmu.org.ua/docs/2012/2/EV20122_052-058.pdf) (in Ukrainian)
8. Temchenko O. A., Tyutyunnyk Yu. M. (2015) Vyznachennia kliuchovykh faktoriv rozvytku pidpriemstv hirnycho-metalurhiinoho kompleksu Ukrainy [Determination of key factors in the development of enterprises of the mining and metallurgical complex of Ukraine]. *Economic Bulletin of the National Mining University*, no. 1, pp. 89–97. Available at: [https://ev.nmu.org.ua/docs/2015/1/EV20151\\_089-096ua.pdf](https://ev.nmu.org.ua/docs/2015/1/EV20151_089-096ua.pdf) (in Ukrainian)
9. Bazaluk O., Ashcheulova O., Mamaikin O., Khorolskyi A., Lozynskyi V. & Saik P. (2022) Innovative activities in the sphere of mining process management. *Frontiers in Environmental Science*, no. 10, pp. 878–977. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.878977>
10. Diachenko G. G. & Aziukovskyi O. O. (2020) Review of methods for energy-efficiency improvement in induction machines. *Natsional'nyi Hirnychiy Universytet. Naukovi Visnyk*, no. 1, pp. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-1/080>

## ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF COST DYNAMICS OF ENERGY CONSUMPTION OF THE ENRICHMENT FACTORY

The purpose of the work is to establish the dependence of electricity costs on the dynamics of energy consumption from the dynamics of ore supply to the beneficiation plant bunker, namely from the loading period and its duration, and to develop, on the basis of the identified patterns of organizational, technical and economic measures to reduce the energy component of the cost of production of iron ore concentrate at the mining enrichment enterprises. Economic-mathematical methods were used to develop models of the formation of electricity costs on the dynamics of energy consumption, namely: the theory of impulse processes for the development of a model of ore supply to the bunker of the beneficiation factory; operational calculation methods, ore beneficiation theory and power supply theory for the development of a dynamic beneficiation process line model and power consumption model; methods of spectral analysis to identify the dynamic component of active power and electrical energy consumed by the ore beneficiation process; Cost analysis methods were used to calculate electricity costs; economic-mathematical modeling of energy consumption dynamics was performed by computer modeling using the Mathcad software package. An economic-mathematical model of the energy consumption dynamics of the enrichment factory was developed. The regularities of influence of ore loading parameters of beneficiation factory bunkers on the dynamics of the formation of electricity costs during the production of iron ore concentrate have been revealed. Mathematical dependencies of costs for the dynamic component of electrical energy on the time parameters of the process of loading ore into the hopper of the beneficiation factory, namely on the period and time of loading, were obtained. Organizational and economic measures have been developed to load the bunkers of the beneficiation factory, which ensure the saving of electricity. The regularities of influence of ore loading parameters of beneficiation factory bunkers on the dynamics of the formation of electricity costs during the production of iron ore concentrate have been revealed. The principles of building a system of financial incentives for operational and dispatching personnel for saving electricity based on the results of economic and mathematical modeling have been developed. For the first time, it was established that the energy component of the production cost of iron ore concentrate depends not only on the quantity and quality of ore, but also on the dynamic parameters of the process of loading ore into the bunkers of the beneficiation factory, while this established dependence has a non-linear nature on the period and time of loading. The proposed measures to save electricity due to the implementation of rational modes of loading bunkers of the beneficiation factory with ore can be used in the development of energy saving plans and programs and the development of job instructions for the dispatching staff of the ore beneficiation factory, which will allow to reduce the energy component of the production cost of iron ore concentrate. A system of financial incentives for operational dispatching staff of the beneficiation factory has been developed, which takes into account the saving of electrical energy due to the management of the ore loading of the bunkers of the beneficiation factory and the intensity of the staff's work.

**Key words:** energy saving, production cost of iron ore concentrate, minimization of electricity costs, economics of ore beneficiation.