METHOD OF DISCRETENESS SUBSTANTIATION OF QUALITATIVE CHARACTERISTICS TESTING DURING IRON ORE RAW MATERIALS EXTRACTION

Volodymyr Azarian¹

Received: 2021-06-11

Accepted: 2021-07-02

DOI: <http://doi.org/10.46489/gpj.2021-1-2-1>

Abstract. The article aims to substantiate the periodicity of the definition of the maintenance of a valuable component in faces. Information about the content of the valuable component is necessary to comply with the requirements of the enrichment complex while ensuring the process of the total cargo flow formation. Traditionally, in iron ore quarries, technical control services measure the content of the valuable component every shift, but the testing period requires determination. We aimed to justify the period of testing the quality characteristics of iron ore. To achieve the aim, we explored the quarry № 3 of the PJSC "ArcelorMittal Kryvyi Rih" Mining Department based on the provisions of the mining theory and using mathematical modelling and mathematical statistics methods. We developed a method of substantiating the period of testing the qualitative characteristics of the faces, which we checked based on data from the existing enterprise. Using our method, we proved the possibility of increasing the test period without losing the necessary information about the iron content and without reducing the quality characteristics of the formed final ore flow. Increasing the test period will help companies decrease costs by reducing the number of visits of technical control specialists to test the quarry face. The proposed technique can be helpful to any mining company that supports the data collection and maintain the statistical database of measurements of the valuable component content.

Keywords: valuable component content, ore freight flow, iron ore quality management, mining industry, testing period

¹ Volodymyr Azarian, D.Sc. (Technical Sciences), Professor, Professor of Department of Opencast Mining, Kryvyi Rih National University, Pushkina Str., 37, Kryvyi Rih, 50000, Ukraine, astp165@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9045-509X>

ВСТУП

Формування загального рудопотоку із заданими показниками якості здійснюється на підставі розподілу обсягів видобутку між забоями з різними показниками вмісту корисного компонента (Byzov, V.F., Vilkul, Ju.G., Maksimov, I.I., 1982). При розв'язанні шихтувального завдання першим припущенням є те, що забої починають роботу одночасно та працюють всю зміну без зупинок. Другим припущенням є константне значення вмісту корисного компонента в забої впродовж всієї зміни. Насправді, в реальних умовах за період виробничої зміни відбуваються суттєві відхилення від початкового розрахунку, які впливають на формування якісних характеристик загального інтегрованого рудопотоку та амплітуду їх коливань. Зумовлюються ці відхилення багатьма факторами: неодноразовістю початку роботи по забоях, поломками устаткування та природною динамікою зміни вмісту корисного компонента в кожному видобувному забої. Для усунення дисбалансу між розрахунковими і фактичними значеннями якості необхідно періодично виконувати коригувальний перерахунок у шихтувальному завданні. Після цього навантаження на забої перерозподіляються з урахуванням поточного значення вмісту корисного компонента та працездатності обладнання.

Фактичні значення вмісту корисного компонента в кожному забої визначаються методами оперативного контролю. Для отримання своєчасної та достовірної інформації про стан якісних характеристик у забоях необхідно, з урахуванням динаміки зміни вмісту корисного компонента, обґрунтувати інтервал опробування.

У залізрудних кар'єрах служби технічного контролю виконують

опробування у забоях щозміни, використовуючи наявну апаратну базу пристроїв. При цьому виходять, перш за все, з технічних можливостей цих пристроїв по контролю якості. Але сам період зняття інформації про вміст корисного компонента (дискретність опробування) – математично і технологічно не обґрунтований (Babij, E.V., Sinenko, M.A., 2010). Тому метою досліджень визначено розробку методики обґрунтування дискретності опробування якісних характеристик залізрудної сировини на основі існуючих статистичних даних. Визначений період опробування дозволить отримувати більш достовірну та своєчасну інформацію про фактичні значення вмісту корисного компонента в забоях, які в подальшому будуть використані для розрахунку змінно-добового завдання з метою формування загального інтегрованого рудопотоку з відповідними показниками якості.

Для обґрунтування дискретності опробування якісних характеристик залізрудної сировини в забоях з використанням статистичних даних було застосовано теорії гірничої справи, методи математичного моделювання, математичної статистики та графічний аналіз.

Для проведення розрахунку використовувались результати вимірів вмісту заліза магнітного в руді кар'єру № 3 Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» екскаваторами №№ 56, 23 та 97.

РЕЗУЛЬТАТИ

Похибка вимірювання, як і особливості технологічних процесів при видобутку залізної руди, вказують на можливість обліку зміни вмісту корисного компонента з визначеною дискретністю. Це приводить до висновку про можливість вимірювання якості в забоях з певним періодом, та

розглядати рудний вантажопотік як дискретний часовий ряд.

Згідно із загальним підходом для чисельного аналізу вмісту корисного компонента в руді, виміри цього вмісту $c(t)$, як безперервного в часі, необхідно здійснювати через деякий фіксований інтервал Δ . Отримані таким чином дискретизовані значення будуть потім

використовуватися для подальших обчислень змінно-добових завдань.

Дискретизовані значення можна розглядати як результат множення початкового безперервного часового ряду $c(t)$ на часовий ряд $i(t)$, що складається з нескінченної низки дельта-функцій (Rodionov, I.B., 2011):

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - n\Delta), \quad (1)$$

$$\text{де } \delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0 \\ \infty, & t = 0 \end{cases}.$$

Це дає можливість відобразити часовий ряд корисного компонента в руді: імпульсно-модульований вміст

$$c_i(t) = c(t)i(t). \quad (2)$$

Користуючись теоремою про формули (2) в частотній області: згортку, знаходимо подання

$$C_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(f-g)I(g)dg, \quad (3)$$

де $C(f), I(f)$ – перетворення Фур'є від $c(t)$ та $i(t)$, відповідно. Враховуючи, що

$$I(g) = \frac{1}{\Delta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(g - \frac{n}{\Delta}\right), \quad (4)$$

формула (3) перетвориться до вигляду

$$C_i(f) = \int_{-\infty}^{\infty} C(f-g) \frac{1}{\Delta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(g - \frac{n}{\Delta}\right) dg = \frac{1}{\Delta} \sum_{n=-\infty}^{\infty} C\left(f - \frac{n}{\Delta}\right). \quad (5)$$

Рівність (5) показує, що імпульсно-модульований вміст корисного компонента в руді $c_i(t)$ є перетворенням Фур'є з періодом $1/\Delta$. Якщо $c(f)$ обертається на нуль при $|f| \geq 1/(2\Delta)$, то

$c_i(f)$ є періодично повторюваною функцією $c(f)$. Це означає, що можна відновити $c(f)$ за $c_i(f)$, помноживши $c_i(f)$ на $H(f)$, де

$$H(f) = \begin{cases} \Delta, & |f| \leq \frac{1}{2\Delta} \\ 0, & |f| > \frac{1}{2\Delta} \end{cases}. \quad (6)$$

Функція (6) є спектральним вікном і вона знаходиться, як перетворення

Фур'є від часового вікна

$$h(t) = \frac{\Delta}{\pi \cdot t} \sin\left(\frac{\pi \cdot t}{\Delta}\right). \quad (7)$$

Так як множенню в частотній області відповідає згортка в часовій

області, то, з урахуванням (7), отримуємо

$$c(t) = \frac{\Delta}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{u} \sin\left(\frac{\pi \cdot u}{\Delta}\right) \cdot c_i(t-u) du. \quad (8)$$

Частота $f_N = 1/(2\Delta)$ називається частотою Найквіста-Котельникова і є

найвищою частотою, яку можна виявити за даними, отриманими з інтервалом відліку Δ .

Для аналізу часового ряду, складеного з вмісту корисного компоненту в руді, з метою обґрунтування періоду вимірювання якості у забоях кар'єру, треба дослідити спектральні властивості цього ряду, що спираються на властивості

автокореляційної функції і нормованого спектра.

Відомо, що автокореляційна функція є залежністю взаємозв'язку між функцією та її здвинутою копією від величини часового здвигу. Якщо автокореляційна функція оцінюється за формулою

$$r_k = \frac{d_k}{d_0}, \quad (9)$$

$$\text{де } d_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (c_i - \bar{c})(c_{i+k} - \bar{c}), \quad \bar{c} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_i,$$

$k = 0, 1, 2, \dots, K$, то вибіркового нормованого

спектр визначається за допомогою автокореляцій (9) наступним чином

$$S(f) = 2(1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} r_k \cos(2\pi \cdot f \cdot k)), \quad 0 \leq f \leq 0,5 \quad (10)$$

Відомо, що вибіркового нормованого спектра – це косинус-перетворення Фур'є вибіркової автокореляційної функції. Аналізуючи графік, побудований за допомогою вибіркового нормованого спектра (10), можна оцінити розподіл дисперсії часового ряду за частотами (Gmurman, V.E., 1975).

На рис. 1 наведено результати вимірів вмісту заліза магнітного в руді, що добувається в кар'єрі № 3 Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» екскаваторами №№ 56, 23 та 97. Опробування видобувних забоїв виконувалися зі стандартним інтервалом у 12 годин.

Рис. 1. Результати вимірів вмісту $Fe_{\text{магн.}}, \%$ в кар'єрі № 3 Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»: 1 – екскаватор № 56, 2 – екскаватор № 23, 3 – екскаватор № 97

Якщо значення дисперсії будуть сконцентровані на низьких частотах, що менші за частоти Найквіста-Котельникова f_N , то дискретність опробування можна збільшити.

Розглянемо приклад обґрунтування періоду опробування забоїв кар'єру на підставі наявної статистики вимірів

вмісту корисного компоненту кар'єру № 3 Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

У табл. 1 наведені значення вибірових автокореляційних функцій, розрахованих за формулою (9) для забоїв екскаваторів №№ 56, 23 та 97

кар'єру № 3 Гірничого департаменту

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

Таблиця 1

Значення вибірових автокореляційних функцій для забоїв екскаваторів №№ 56, 23 та 97 кар'єру № 3 Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

№ екскаватора	93	56	23
1	0,67	0,57	0,73
2	0,41	0,42	0,51
3	0,37	0,42	0,36
4	0,15	0,34	0,19
5	0,04	0,33	0,21
6	-0,21	0,43	0,20
7	-0,24	0,50	0,04

На рис. 2, 3 та 4 наведено графіки вибірових автокореляційних функцій вмісту заліза магнітного в забоях

екскаваторів, що побудовані на основі даних табл. 1.

Рис. 2. Вибіркова автокореляційна функція вмісту заліза магнітного в забої екскаватора № 93

Рис. 3. Вибіркова автокореляційна функція вмісту заліза магнітного в забої екскаватора № 56

Рис. 4. Вибіркова автокореляційна функція вмісту заліза магнітного в забої екскаватору № 23

В табл. 2 наведено значення розраховані за формулою (10) на основі вибірових нормованих спектрів, що даних табл. 2.

Таблиця 2

Значення вибірових нормованих спектрів

№ екскаватора	93	56	23
0	6,76	19,31	10,97
0,1	4,548	2,62	2,41
0,2	1,167	0,03	1,29
0,3	0,032	0,45	0,38
0,4	0,853	0,00	0,32
0,5	0,04	0,00	0,23

Аналіз вибірових нормованих спектрів, який буде виконано далі, дозволить зробити висновки про те, на яких частотах і як концентрується дисперсія рядів, що досліджуються.

На рис. 5, 6 та 7 наведено графіки вибірових нормованих спектрів, розрахованих згідно з даними табл. 2.

Рис. 5. Вибірковий нормований спектр вмісту заліза магнітного в забої екскаватору № 93

Графічний аналіз вибірових нормованих спектрів, що представлені на рис. 5, 6 та 7, дозволяє зробити висновок, що дисперсія досліджуваних рядів концентрується в основному на низьких частотах, а саме – від 0 до 0,3.

В подальшому, при використанні даної методики, зона концентрації дисперсії приймається як найбільш доцільна для аналізу.

Рис. 6. Вибірковий нормований спектр вмісту заліза магнітного в забої екскаватору № 56

Рис. 7. Вибірковий нормований спектр вмісту заліза магнітного в забої екскаватору № 23

Таким чином, для можливості виділення частот, що пов'язані зі зміною вмісту заліза в руді, досить вибрати частоту $f=0,3/4$, або позначити період

$$T = \frac{10 \cdot \Delta}{3} \quad (11)$$

Спираючись на те, що згідно з існуючою дискретністю вимірюванням у забоях вмісту заліза магнітного в руді, які здійснюються з інтервалом 12 годин, отримуємо можливість математично

$$T = \frac{10 \cdot 12}{3} = 40 \text{ годин}$$

Отримане значення періоду опробування якості у видобувних

отримання інформації про вміст корисного компонента в забоях кар'єру у наступному вигляді:

обґрунтувати період опробування забой, що дозволить розрізняти максимальні частоти зміни вмісту корисного компоненту:

забоях (11) вказує на можливість збільшення існуючого періоду в більше

ніж у три рази без втрати необхідної інформації про динаміку зміни вмісту корисного компонента.

Наявність такої інформації дозволить формувати загальний інтегрований рудний вантажопотік кар'єру з потрібними показниками якості, що вплине на показники прибутку гірничовидобувного підприємства [5].

Слід зазначити, що з точки зору математичної статистики, чим за більший період буде застосовані дані про розподіл якості у забоях, тим вірогіднішим буде розрахунок періоду вимірювання.

Враховуючи стохастичний характер розподілу якості в межах родовища, доцільно проводити уточнюючі розрахунки, тому що з підвищенням коливань вмісту корисного компонента в забоях період опробування буде скорочуватися.

Дану методику може бути застосовано на всіх залізрудних підприємствах, де є відповідний статистичний матеріал про вміст

корисного компонента у видобувних забоях за певний період вимірювань.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована методика обґрунтування дискретності опробування якісних характеристик залізрудної сировини дозволяє обґрунтовано визначити період проведення вимірів вмісту корисного компоненту у забоях.

2. Розрахунками на прикладі кар'єру № 3 Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» доведено можливість збільшення періоду опробування без втрати необхідної інформації про вміст заліза та без зниження якісних характеристик сформованого фінального рудопотоку.

3. Зміна періоду опробування у бік збільшення дозволить знизити витрати підприємства, зменшуючи кількість рейсів фахівців відділу технічного контролю на опробування забоїв кар'єру.

References

Byzov, V.F., Vilkul, Ju.G., Maksimov, I.I. (1982). Ob usrednenii kachestva rud pri ob#edinenii gruzopotokov. Metallurgicheskaja i gornaja promyshlennost', 2, 64–65.

Babij, E.V., Sinenko, M.A. (2010). O kachestve rudnogo potoka pri tehnologii predobogashhenija rudy v kar'ere. Visnyk Kryvorizkoho natsionalnoho universytetu, 25, 3–8.

Rodionov, I.B. (2011). Teorija i sistemnyj analiz, Retrived from <http://eidos.ru/journal/1998/0781.htm>.

Gmurman, V.E. (1975). Rukovodstvo k resheniju zadach po teorii verojatnostej i matematicheskoy statistike. Moskva: Vysshaja shkola

Azarjan, V.A. (2015). Issledovanie vlijanija kachestva rudopotoka zhelezorudnogo kar'era na pribyl' gorno-obogatitel'nogo kombinata. Hirnychi visnyk, 100, 58-62