

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF FUNCTIONING OF SPATIAL AND HIERARCHICAL RELATIONSHIPS OF TECHNOLOGICAL SCHEMES OF COAL MINES

A. Khorolskyi^{1}, O. Mamaikin², V. Hrinov¹, V. Sulaev², O. Koshka²*

¹Institute for Physics of Mining Processes the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

²Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

**Corresponding author: khorolskiyaa@ukr.net*

Abstract. The purpose of this paper is to develop new approaches for optimizing the technological flows at coal mines. Based on analysis, the area of the presented approaches application has been outlined for decision-making in mining. The concept is to use graph theory methods and network models for balancing the flows incoming to the mine in the form of resources and the output flows in the form of coal, rock, gas, and water. This improves the overall efficiency of functioning the mining enterprise. A new model is proposed that describes the production activity of the underground mining complex for the delivery of three production components to the surface. These components from the viewpoint of rational resource and environmental management can be considered as factors that may have a negative impact on the level of technological scheme in terms of investing advisability, as well as on the environment. These components are coal, rock, methane gas and mine water. Given their stochastic nature, it is accepted for the mathematical description of the movement processes of coal (*C*), rock (*R*), methane gas (*G*) and water (*W*) to represent them in the form of flows within some technological system of converters, and including the diversification of mining production. The presented approach can be applied not only at the stage of designing, but also to assess the existing state of the coal mines. Special attention is focused on the development of software for decision-making.

Keywords: process flow, network, optimization, parameter, software.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРОСТОРОВО-ІЄРАРХІЧНИХ ЗВ'ЯЗКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПОТОКІВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

А. Хорольський^{1}, О. Мамайкін², В. Грінюв¹, В. Сулаєв², О. Кошка²*

¹Інститут фізики гірничих процесів Національної академії наук України, Дніпро, Україна

²Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

**Відповідальний автор: khorolskiyaa@ukr.net*

Анотація. Метою статті є розробка нових підходів щодо оптимізації технологічних потоків вугільних шахт. Було проведено аналіз та наведено область застосування наведених підходів щодо прийняття рішень в гірництві. Ідея полягає в застосуванні методів теорії графів та мережевих моделей для збалансування потоків, що входять в шахту у вигляді ресурсів та вихідних потоків у вигляді вугілля, породи, газу, води. Це дозволяє підвищити загальну ефективність функціонування гірничовидобувного підприємства. Запропоновано нову модель, яка описує виробничу діяльність підземного комплексу гірничих робіт з доставки на поверхню трьох продуктивних компонентів, які з позицій раціонального ресурсо- і природокористування можуть бути розглянуті як чинники, які можуть робити негативний вплив на рівень технологічної схеми з точки зору доцільності інвестування, а також негативний вплив на навколишнє середовище. Цими компонентами є вугілля, порода, газ метан і шахтна вода. Враховуючи їх стохастичний характер, прийнято для математичного опису процесів переміщення вугілля (*C*), породи (*R*), газу метану (*G*) та води (*W*) уявити їх у вигляді потоків в деякій технологічній системі перетворювачів і в тому числі при диверсифікації гірничого виробництва. Наведений підхід може бути застосований не тільки на стадії проектування але і для оцінки існуючого стану вугільних шахт. Особливу увагу приділено розробці програмного забезпечення для прийняття рішень.

Ключові слова: технологічний потік, мережа, оптимізація, параметр, програмне забезпечення.

1. Вступ

Загальні тенденції щодо кризових явищ у вугільній галузі по усьому світу ставлять нові виклики, які пов'язані, наразі не зі збільшенням видобутку або нарощуванням прибутків, а в першу чергу, зі збереженням життєдіяльності підприємства. Це пояснюється тим, що вугільна галузь потребує великої кількості ресурсів, а на стадії проектування слід враховувати параметри, які не зовсім пов'язані між собою. Окрім цього, існує проблема, того, що шахту розглядають на стадії проектування, як підприємство з видобутку вугілля, а не як ланку в системі генерації електроенергії, металу, при цьому, сама шахта є споживачем цих ресурсів. На наше переконання для подолання більшості негативних явищ потрібно збалансувати потоки вхідних ресурсів у вигляді матеріалів, обладнання та вихідний у вигляді виробленої продукції. При цьому, в запропонованій моделі слід врахувати, не тільки вугілля, але і попутні продукти у вигляді породи, газу, води. Це дозволить в комплексі поглянути на проблему пошуку оптимального рішення на стадії проектування, а також при оцінці перспектив вугільного підприємства. Окрім цього, необхідно шахту розглядати, як ланку в системі «вугілля-кокс-метал» або «вугілля-електроенергія». Важливо й те, що технологічні потоки вугільних шахт суттєво впливають на навколишнє середовище, тому цю особливість також варто враховувати. Зазначене коло проблем потребує відповіді на питання: – Що необхідно зробити для стабілізації стану вугільного підприємства? Яким чином здійснити баланс технологічних потоків підприємства? Які інструменти та яка процедура реалізації? Саме відповіді на ці питання буде дано відповідь у наведеному дослідженні.

Умовно підходи по прийнятті рішень у гірничому виробництві можна розділити на інформаційні та оптимізаційні [1]. Такий розподіл здійснено на основі кінцевого результату. Інформаційний підхід дає відповідь на питання – яке рішення є найбільш переважним та базується на експертних оцінках. А оптимізаційний підхід дає відповідь на питання – яке рішення є найбільш доцільним з економічної або технологічної точки зору. Найбільшого поширення на стадії прийняття рішень у гірництві з поміж інформаційних підходів отримали методи багатокритеріальної оптимізації MCDMA побудовані на аналізі ієрархій АНР (Kursunoglu N., Onder M. [2], Ataei, M. [3]) та їх різновиди: PROMETHEE (Bogdanovic D. [4]), ELECTRE (Iphar M. [5]), VIKOR (Hayati M. [6]), Grey-АНР (Huang, W. [7]), Fuzzy-АНР (Naghadehi, M. Z. [8]), WPM (Balusa B. C. [9]). Кожен із наведених вище підходів [2–9] передбачає виділення критеріїв на стадії проектування, проведення експертної оцінки та порівняння варіантів між собою. В результаті отримуємо відповідь на те, яке із рішень є переважним, проте невідомо, наскільки воно буде «переважним», якщо будуть інші критерії оптимальності. Також існує проблема суб'єктивності на стадії оцінки. Окрім цього не завжди співвідношення між переважним та недопустимим рішенням є пропорційним [10]. Наведена група підходів [2–9] дієва на стадії проектування, проте для діючих підприємств необхідно застосувати більш «чутливі» інструменти.

Оптимізаційні підходи діляться, в першу чергу, за цільовою функцією критеріїв на методи математичного програмування, які розрізняються процедурою прийняття рішень на лінійне [11], квадратичне [12], цілочисельне [13], геометричне [14], стохастичне [15], динамічне програмування [16]; детерміновані моделі, ймовірнісні моделі. Якщо методи математичного програмування дають відповідь на те яке рішення є оптимальним, то детерміновані моделі демонструють співвідношення між параметрами, що формує спосіб відображення – або це кореляційні співвідношення [17–20] або графічне [10, 21]. Ймовірнісні моделі базуються на понятті «надійність» [20], тобто здатності системи відтворювати заданий рівень продуктивності у часі у відповідності до накладених обмежень.

Група оптимізаційних підходів [11–21] дієва на стадії оперативного управління виробництвом, проте необхідно із цього багатоманіття обрати найбільш переважний, з точки зору, можливості його візуалізації, а також формування «банку проектних рішень». На нашу думку для цього можуть бути застосовані графи та мережеві моделі [22]. Наведемо декілька

переваг – наочність, простота, можливість реалізації на усіх платформах, універсальність, можливість формування «банку проектних рішень». Окрім цього, саме визначення «граф» та мережева модель вже передбачає структурованість та впорядкованість, а це є головною вимогою на стадії управління технологічними потоками. Таким чином, необхідно розробити модель яка враховує співвідношення технологічних потоків, а також запропонувати підхід щодо прийняття рішень. Вирішення цих питань висвітлено в даній роботі.

2. Методика

Як відомо результатом виробничої діяльності підземного комплексу гірничих робіт є доставка на поверхню трьох продуктивних компонентів, які з позицій раціонального ресурсо- і природокористування можуть бути розглянуті як чинники, які можуть робити негативний вплив на доцільність інвестування. Цими компонентами є вугілля, порода і газ метан. Враховуючи їх динамічний характер, доцільно для математичного опису процесів переміщення вугілля (C), породи (R), газу метану (G) та води (W) уявити їх у вигляді потоків в деякій технологічній системі перетворювачів. При цьому метою перетворень є отримання основних і додаткових ресурсів сировини, а також мінімізація екологічного збитку [16].

Основним методом дослідження моделі є метод багатовимірний статистичний аналіз. З урахуванням цих вимог введемо такі позначення

$$K_s = \left\{ \frac{D_{pi}}{D_{Di}}, \frac{\alpha_{Di}}{\alpha_{pi}}, \frac{\sum \Pi_i}{\sum Z_i}, \frac{V_{Pi}}{V_i}, \frac{\sum Z_{Pi}}{\sum Y_{Pi}}, \frac{Q_{Bi}}{Q_i}, \frac{\sum Z_{Bi}}{\sum Y_{Bi}}, \frac{D_{Bi}}{V_i} \right\} \quad (1)$$

де α – показник якості вугілля (зольність), %;

$$K_{\phi i} = \{Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, Z_{i4}, Z_{i5}, Z_{i6}, Z_{i7}, Z_{i8}\} \quad (2)$$

де $K_{\phi i}$ – характеристика стабільності кожної діагностичної ознаки;

Z_{ij} – коефіцієнт стабільності i -ї ознаки, визначається, як коефіцієнт варіації параметра вихідного потоку, що входить до складу $K_{\phi i}$

Таким чином, результативну ознаку для i -ої шахти можна представити шляхом підстановки (1) в (2):

$$K_s = \left\{ \frac{D_{pi}}{D_{Di}} Z_{i1}, \frac{\alpha_{Di}}{\alpha_{pi}} Z_{i2}, \frac{\sum \Pi_i}{\sum Z_i} Z_{i3}, \frac{V_{Pi}}{V_i} Z_{i4}, \frac{\sum Z_{Pi}}{\sum Y_{Pi}} Z_{i5}, \frac{Q_{Bi}}{Q_i} Z_{i6}, \frac{\sum Z_{Bi}}{\sum Y_{Bi}} Z_{i7}, \frac{D_{Bi}}{V_i} Z_{i8} \right\} \quad (3)$$

Вираз (3) дозволяє урахувати стабільність технологічних потоків, а також якість продукції, що надходить із шахти.

Для того, щоб можна було порівняти результат дії певного параметра на обсяг значення X_{ij} зводяться в матриці у вигляді стандартизованих ознак. Стандартизація проводиться загальноприйнятими методами за допомогою середньоарифметичних значень і середньоквадратичних відхилень.

З точки зору комплексності оцінки роботи шахт, обсяг видобутку відіграє досить важливу роль, але не визначальну. Особливо це проявляється в плані якісних характеристик вугілля і значить в обсягах товарної продукції і в співвідношенні видаваної і переробленої (залишеної в шахті) породи. На жаль, попутний видобуток метану протягом останніх років практично не ведеться. Ця обставина не підвищує рейтинг технологічних схем шахт регіону.

Вхідними параметрами, зовнішніми умовами такої системи є наступні.

Для потоку C (вугілля):

D_i – обсяг видобутку кожної i -ї шахти з урахуванням витрат (т/рік);

D_m – обсяг товарної продукції, т/рік;

A_i – якість вугілля, що видобувається (зольність, %);

Для потоку R (порода):

V_i – обсяг породи, що видається на поверхню, т;

V_n – обсяг породи, що переробляється, т.

Для потоку G (газ):

Q_i – прогнозний (можливий) обсяг виходу метану, м³/рік;

Q_n – обсяг метану, що переробляється, м³/рік.

Цільовою функцією такої системи буде максимізація вихідних параметрів (відносин перетворень) з оптимальним їх розподілом усередині системи (відносин зв'язків).

Умова оптимальності для відношення перетворень:

$$K_{OP} = \max\{D, A, V, Q\} \quad (4)$$

Крім того, як указувалося вище для дослідження відносин зв'язку слід виконувати їх оптимізацію, що в окремому випадку є задачею пошуку оптимального розподілу потоків вугілля між шахтами і збагачувальними фабриками.

З урахуванням викладених вище умов можна сформулювати основні вимоги до моделі, що формалізується:

- рішення моделі повинне дозволяти виробляти порівняння результативності роботи всіх шахт регіону;

- як критерій результативності використовується комплексний показник економічної K_e і функціональної K_{Φ} ефективності;

$$x_i = K_e \cdot K_{\Phi i} \quad (5)$$

де $i = 1, 2, \dots, m$ – індекс шахти (порядковий номер);

Показник K_e повинен враховувати умову максимізації вихідних параметрів потоків C, R, G ;

Показник функціональної ефективності $K_{\Phi i}$ повинен відображати характеристику працездатного стану системи. Основним методом дослідження моделі є метод багатовимірного статистичного аналізу.

З урахуванням цих вимог введемо наступні позначення:

$$K_{e i} = \{D, A, V, Q\} \quad (6)$$

$$K_{\Phi i} = \{Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, Z_{i4}, Z_{i5}, Z_{i6}, Z_{i7}\} \quad (7)$$

де $K_{\Phi i}$ – характеризує стабільність кожної діагностичної ознаки;

Z_{ij} – коефіцієнт стабільності i -ї ознаки, визначається як коефіцієнт варіації параметра вихідного потоку, що входить до складу $K_{e i}$.

Таким чином, результативну ознаку для i -ої шахти регіону можна представити у вигляді:

$$x_i = \{D, A, V, Q\} \times \{Z_{i1}, Z_{i2}, Z_{i3}, Z_{i4}, Z_{i5}, Z_{i6}, Z_{i7}, Z_{i8}\} \quad (8)$$

Процедура багатовимірного порівняльного аналізу починається з формування початкової матриці вигляду:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11}, & x_{12}, & \dots, & x_{1n} \\ x_{21}, & x_{22}, & \dots, & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1}, & x_{m2}, & \dots, & x_{mn} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де i – індекс шахти ($i = 1, 2, \dots, m$);

k – індекс певного параметра ($k = 1, 2, \dots, n$);

x_{ij} – значення j -го параметру для i -ї шахти.

Для того, щоб можна було порівняти результат дії певного параметра на обсяг, значення x_{ij} зводяться в матриці у вигляді стандартизованих ознак. Стандартизація виробляється загальноприйнятими методами за допомогою середньоарифметичних значень і середньоквадратичних відхилень [23].

Важливим етапом обробки скоректованих значень x_{ij} є їх розмежування по важливості за допомогою коефіцієнтів ієрархії. Алгоритм оцінки наступний:

1) Спочатку необхідно діагностичні ознаки шахт (видобуток вугілля, кількість породи, газу, метану) звести в одну матрицю. Індеси діагностичних ознак k приймають наступні значення: річний видобуток вугілля по шахті 1, обсяг товарної продукції 2, зольність гірської маси 3, обсяг породи, що видається 4, обсяг переробленої породи 5, обсяг використання метану 6, співвідношення витрат з охорони довкілля 7, обсяг використаної шахтної води 8. Для відібраної сукупності шахт обрано 4 ознаки, оскільки будь-яких значних робіт у напрямку використання метану або шахтної води поки не ведеться.

2) Для того, щоб можна було порівнювати між собою значення різних діагностичних ознак, їх необхідно перетворити до однієї і тієї ж розмірності. Для цього здійснюємо, так звану, "стандартизацію", в результаті якої значення ознак виражаються в частках середніх квадратичних відхилень.

$$z_{ik} = \frac{x_{ik} - \bar{x}_k}{S_k} \quad (10)$$

де x_{ik} – значення діагностичної ознаки k для шахти i ;

\bar{x}_k – середнє арифметичне значення діагностичної ознаки k визначають за формулою

$$\bar{x}_k = \frac{\sum_{i=1}^w x_{ik}}{w} \quad (11)$$

де S_k – стандартне відхилення діагностичної ознаки k знаходять за формулою:

$$s_k = \left[\frac{1}{w} \sum_{i=1}^w (x_{ik} - \bar{x}_k)^2 \right]^{1/n} \quad (12)$$

З метою використання скоректованих стандартизованих значень діагностичних ознак їх розмежовуємо за важливістю (тобто по їх впливу на відхилення значень діагностичних ознак аналізованих шахт) за допомогою так званого коефіцієнту ієрархії. Для цього формують матрицю відстаней між діагностичними ознаками, елементи якої характеризують усереднене відхилення діагностичної ознаки k від ознаки l , розраховуємо за формулою:

$$b_{kl} = \left[\frac{1}{w} \sum_{i=1}^{iw} (z_{ik} - z_{il})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

де $k, l = 1/n$ – індекс діагностичної ознаки;

z_{ik}, z_{il} – стандартизоване значення діагностичної ознаки відповідно k і l для шахти i .

Стандартизоване значення діагностичних ознак шахти-еталона характеризуються якнайкращими значеннями діагностичних ознак аналізованих підприємств. Вибір значень ознаки для шахти-еталона залежить від характеру його дії на результат діяльності шахти. Наприклад, для показників зольності гірничої маси, співвідношення видачі вугілля і породи вибирають їх мінімальні значення.

Відхилення значення діагностичних ознак шахти i від відповідних значень діагностичних ознак шахти-примірника ρ_i визначаємо наступним чином:

$$\rho_{i0} = \left[\sum_{l=1}^m (z'_{ik} - z'_{0k})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Далі знаходимо середнє арифметичне значення відхилення діагностичних ознак шахт від відповідних значень діагностичних ознак шахти-еталона.

$$\bar{\rho}_0 = \frac{1}{w} \sum_{i=1}^w \rho_{i0} \quad (15)$$

Розбіг значень відхилень діагностичних ознак від значень діагностичних ознак шахти-еталону характеризується стандартним відхиленням.

$$S_0 = \left[\frac{1}{w} \sum_{i=1}^w (\rho_{i0} - \bar{\rho}_0)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

Максимально припустиме значення відхилення діагностичних ознак по всіх шахтах визначаємо:

$$\rho_0 = \bar{\rho} + 2S_0 \quad (17)$$

У кінцевому підсумку знаходимо показник стану шахти за формулою:

$$d_i = \frac{\rho_{i0}}{\rho_0} \quad (18)$$

Чим ближче цей показник до одиниці, тим більше відхилення значень діагностичних ознак шахти i від діагностичних ознак шахти-еталона. Тобто фізичний зміст кількісної оцінки полягає в наступному – показники виробничої діяльності у безрозмірних характеристиках прямують до нуля, тим самим досягається стабільність діяльності. Це реалізується шляхом більшого залучення підприємства у економіку регіону та системи генерації енергії, металу та ін.

3. Результати та обговорення

Із наведеної вище моделі видно, що для збалансування потоків необхідно використати на повну потенціал шахти. Це реалізується шляхом аналізу співвідношень у ланцюжках «вугілля-кокс-метал» або «вугілля-збагачувальні фабрики-електроенергія». Нами було побудовано фактичну структуру зв'язків вугілля-електроенергія в Донецькій області, а також «вугілля–кокс–метал» [24]. У представлених моделях відображено кількісне співвідношення шахт S_n з видобутку вугілля марок M_n , збагачувальних фабрик V_n та електростанцій E_n .

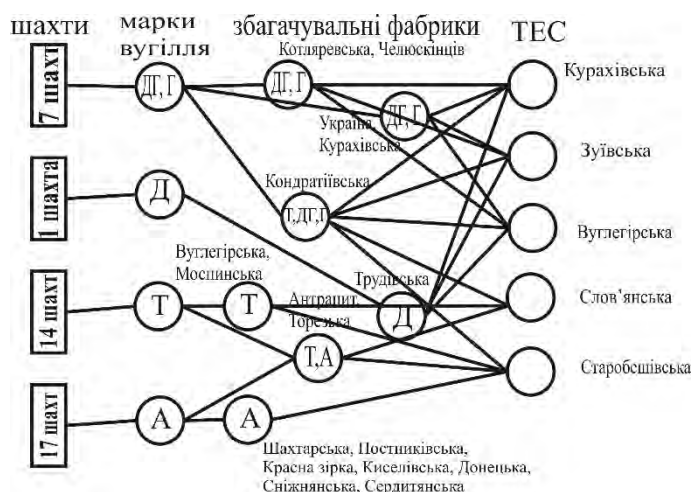


Рис. 1. Фактична структура взаємозв'язків «вугілля-електроенергія» в Донецькій області

Тоді для знаходження оптимальних зв'язків у системі «вугілля–електроенергія» необхідно пронумерувати кожен вершину, а ребрам мережевої моделі (відрізки, що з'єднують вершини) присвоїти значення параметру за яким слід оптимізувати мережеву модель. Для цього необхідно:

- означимо вершини мережевої моделі як «не зафарбовані», тобто відстань від першої вершини до інших не визначена; по мірі знаходження найкоротших маршрутів між вершинами вони будуть «зафарбовуватися», тобто будуть виключатись із подальших розрахунків;

- після цього слід перейти до пошуку найкоротшого маршруту між вершинами (i, j) , якому присвоюється значення $d(x)$, тобто найкоротший маршрут від точки i до точки j знайдено;

- покладемо $d(i) = 0; d(x) = \infty$, тобто якщо найкоротший маршрут між точками (i, j) знайдено, то довжина маршруту від точки j , яка відповідає порядковому номеру оптимальної вершини, до точки i , яка відповідає початковій вершині дорівнює $d(x)$, а до інших вершин (не оптимальних) $d(x) = \infty$;

- аналогічно визначимо відстань між іншими точками з урахуванням раніше визначеного найкоротшого маршруту $d(x)$: $d(x) = \min\{d(x), d(y) + a(y, x)\}$, де $d(y)$ – остання вершина для, якої знайшли найкоротший маршрут, $a(y, x)$ – значення параметру;

- при цьому коли порядковий номер вершини y до якої слід знайти оптимальний маршрут дорівнює $y = t$, де t – кількість вершин – розрахунки слід завершити, тобто отримали оптимальну структуру «вугільна–шахта–збагачувальна фабрика–електростанція» з найменшим значенням параметру, який слід мінімізувати.

Розглянуті в даній роботі ситуації та їх вирішення є інтерпретаціями вже відомих задач динамічного програмування [25], проте, з розвитком інформаційних технологій вдається отримати нові алгоритми наближених і точних методів обчислень, а також істотно збільшити розмірність завдань.

Наведена в роботі методологія є універсальною та може бути застосована не тільки при вирішенні задачі стабілізації стану промисловості у регіоні але і при організації транспортних перевезень між підприємствами, для зниження вартості на ремонт та обслуговування обладнання та ін. Однак, при застосуванні ручного перебору або методів лінійного програмування процес пошуку ускладнений великою розмірністю задач відповідно зростають часові витрати, також важко інтерпретувати результат із матричного представлення у зрозумілий для проектувальника вигляд. Саме тому в Інституті фізики гірничих процесів було розроблено відповідне програмне забезпечення (Рис. 2), яке дозволяє автоматизувати процес пошуку оптимальних зв'язків, підвищити розмірність задач, інтерпретувати результати, створювати звіти [26].

Подальше застосування методів на мережах та графах дозволяють знайти структуру виробництва вугілля та електроенергії з найменшими витратами.

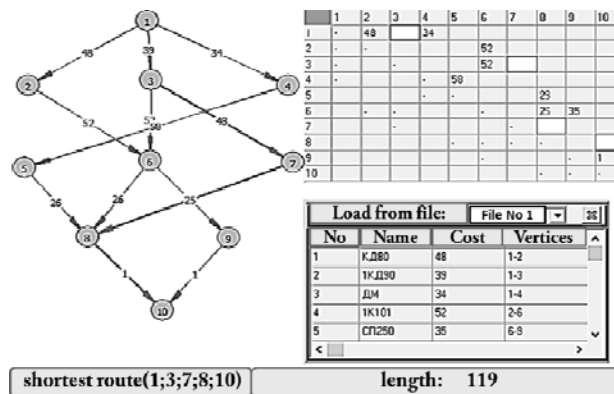


Рис. 2. Фрагмент робочого вікна програми

Таким чином в роботі запропонована модель, яка враховує співвідношення між потоками вхідних та вихідних ресурсів у системі «вугілля–електроенергія» із застосуванням декомпозиційних методів, які враховують відносини між шахтами та збагачувальними фабриками, збагачувальними фабриками та електростанціями; шахтами та електростанціями.

4. Висновки

В результаті проведеного дослідження було встановлено, що для ефективної діяльності підприємства та збереження життєдіяльності необхідно збалансувати технологічні потоки вугільних шахт. Це передбачає комплексне урахування видобутку вугілля, видачі породи, газу метану та води. Для вирішення цієї проблеми було запропоновано комплексний критерій включає в себе наступні складові частини:

1. Співвідношення видобутого вугілля до реалізованого. Характеризує не тільки якісні характеристики вугілля та потребу в ньому ринку, а і збутову діяльність підприємства. У ідеальному варіанті цей параметр повинен наближатися до одиниці.

2. Слід відмітити, що найбільш важливим показником, який характеризує якість вугілля є його зольність. У зв'язку з цим у моделі запропоновано співвідношення зольності видобутого до зольності реалізованого вугілля.

3. Дуже важливим у процесі реструктуризації шахт є комплексне використання природних ресурсів. Для шахт даного регіону було введено співвідношення обсягів породи, що видається з шахт та тої частини, яка шахта переробляє для закладки, виготовлення будматеріалів тощо.

Запорукою підвищення показників підприємства є комплексний розгляд діяльності шахти як складової ланцюжку «вугілля-кокс-метал» або «вугілля-збагачувальна фабрика-електроенергія» це дозволить організувати промислові зв'язки в регіоні та підвищити якість кінцевої продукції у вигляді електроенергії, металу.

Для підвищення якості видобутої сировини та зниження питомої собівартості необхідно скористатись мережевими моделями та графами, а застосування наведеного у статті програмного забезпечення дозволить автоматизувати процес прийняття рішень.

Вдячність

Дослідження виконано в рамках досліджень науково-дослідних робіт Національної академії наук України серед молодих вчених. Назва проекту «Ресурсозберігаючі способи підтримки виробок в складних гідрогеологічних умовах», договір №29-04/06-2020; № державної реєстрації 0119U102370.

The study has been carried out within the framework of research project of the NAS of Ukraine for young scientists “Resource-saving techniques to support mine workings under the complex hydrogeological conditions”; Agreement #29-04/06-2020; official registration # 0119U102370.

References

1. Хорольський, А. О., & Грін'юв, В. Г. (2020). Оцінка і вибір параметрів при розробці родовищ корисних копалин. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (22), 118-140. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.009>
- Khorolskyi, A., & Hrinov, V. (2020). Otsinka i vybir parametriv pry rozrobsi rodovyshch korysnykh kopalyn. *Fyzyko-tekhnycheskye problemy hornoho proyzvodstva*, (22), 118-140. <https://doi.org/10.37101/ftpgp22.01.009>
2. Kursunoglu, N., & Onder, M. (2015). Selection of an appropriate fan for an underground coal mine using the Analytic Hierarchy Process. *Tunnelling and Underground Space Technology*, (48), 101-109.
3. Ataei, M., Jamshidi, M., Sereshki, F., & Jalali, I. (2008). Mining method selection by AHP approach. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 108(12), 741-749.
4. Bogdanovic, D., Nikolic, D., & Ilic, I. (2012). Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 84(1), 219-233.
5. Iphar, M., & Alpay, S. (2019). A mobile application based on multi-criteria decision-making methods for underground mining method selection. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 33(7), 480-504.
6. Hayati, M., Rajabzadeh, R., & Darabi, M. (2015). Determination of Optimal Block Size in Angouran Mine Using VIKOR Method. *J. Mater. Environ. Sci.* 6(11), 3236-3244.
7. Huang, W. et al. (2015). Stability assessment of underground mined-out areas in a gold mine based on complex system theory. *Geotechnical and Geological Engineering*. 33(5), 1295-1305.
8. Naghadehi, M.Z., Mikaeil, R., & Ataei, M. (2009). The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran. *Expert Systems with Applications*, 36(4), 8218-8226.
9. Balusa, B., & Singam, J. (2018). Underground mining method selection using WPM and PROMETHEE. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series D*. 99(1), 165-171.
10. Hrinov, V. & Khorolskyi, A. (2018). Improving the Process of Coal Extraction Based on the Parameter Optimization of Mining Equipment. In *E3S Web of Conferences, Ukrainian School of Mining Engineering*. (Vol. 60. p. 00017). EDP Sciences. doi.org/10.1051/e3sconf/20186000017

11. Kulshreshtha, M., & Parikh J. (2002). Study of efficiency and productivity growth in opencast and underground coal mining in India: a DEA analysis. *Energy Economics*. 24(5), 439-453.
12. Li, P. et al. (2011). Time series prediction of mining subsidence based on a SVM. *Mining Science and Technology (China)*. 21(4), 557-562.
13. Bakhtavar, E., Shahriar, K., & Mirhassani, A. (2012). Optimization of the transition from open-pit to underground operation in combined mining using (0-1) integer programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 112(12), 1059-1064.
14. Erdogan, G. et al. (2017). Implementation and comparison of four stope boundary optimization algorithms in an existing underground mine. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. 31(6), 389-403.
15. Dimitrakopoulos, R., & Ramazan, S. (2008). Stochastic integer programming for optimising long term production schedules of open pit mines: methods, application and value of stochastic solutions. *Mining Technology*. 117(4), 155-160.
16. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Kaliushenko, O. (2019). Network models for searching for optimal economic and environmental strategies for field development. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 6(3), 463-471.
17. Fomychov, V., Mamaikin, O., Demchenko, Y., Prykhorchuk, O., & Jarosz, J. (2018). Analysis of the efficiency of geomechanical model of mine working based on computational and field studies. *Mining of Mineral Deposits*, 12(4), 46–55. <https://doi.org/10.15407/mining12.04.046>
18. Saik, P., Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Sai, K., & Merzlikin, A. (2018). Innovative Approach to the Integrated Use of Energy Resources of Underground Coal Gasification. *Solid State Phenomena*, 277, 221–231. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/ssp.277.221>
19. Sadovenko, I., Inkin, O., Dereviahina, N., Hriplivec, Y. (2018). Analyzing the parameters influencing the efficiency of underground coal gasification. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27(2), 332-336. <https://doi.org/10.15421/111857>
20. Sadovenko, I., Puhach, A., & Dereviahina, N. (2019). Investigation of hydrogeomechanical parameters of loess massifs in conditions of technogenic underflooding and development of technical recommendations for strengthening of bases of foundations. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(1), 173-179. <https://doi.org/10.15421/111918>
21. Salli, S., Pochepov, V., & Mamaykin, O. (2014). Theoretical aspects of the potential technological schemes evaluation and their susceptibility to innovations. In *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining* (pp. 491-496)
22. Khorolskyi, A., Hrinov, V., & Mamaikin, O. (2019). Models and methods to make decisions while mining production scheduling. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 53-62. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.053>
23. Грін'юв, В. Г., & Хорольський, А. О. (2019). Оптимальне проектування параметрів гірничозбагачувальних підприємств для раціонального освоєння цінних родовищ України. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва. Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (21), 128-145. <https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.008>
- Hrinov, V., & Khorolskyi, A. (2019). Оптимальне проектування параметрів гірничозбагачувальних підприємств для раціонального освоєння цінних родовищ України. *Фізико-технічні проблеми горного виробництва*, (21), 128-145. <https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.008>
24. Грін'юв, В. Г., Хорольський, А. О., & Мамайкін, О. Р. (2019). Декомпозиційний підхід при побудові систем генерації енергії у вуглепромислових регіонах. *Вісті Донецького гірничого інституту*, 44, 116-126. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-116-126>
- Hrinov, V., Khorolskyi, A., & Mamaikin, O. (2019). Dekompozitsiyni pidkhid pry pobudovi system generatsii enerhii u vuhlepromyslovykh rehionakh. *Visti Donetskoho hirnychoho instytutu*, (44), 116-126. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2019-1-116-126>
25. Bellman, R., & Dreyfus, S. (1965). *Prykladnie zadachy dynamycheskogo programyrovannya*. M.: Nauka.
26. Grinyov, V., Khorolskiy, A., & Kaliushhenko, O. (2019). Rozroblennja ekologichnyh scenariiv efektyvnogo osvojennja cinnyh rodovyshh korysnyh kopalyn. *Mineralni resursy Ukrainy*, (2), 46-50. <https://doi.org/10.31996/mru.2019.2.46-50>