ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 622.22.553.4:519.85 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.171

© А.О. Хорольський[1]
[1] Відділення фізики гірничих процесів Інституту геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова Національної академії наук України, Дніпро, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ В ОЧИСНОМУ ВИБОЇ НА ОСНОВІ ЗАСТОСУВАННЯ КОЛЬОРОВИХ МЕРЕЖ ПЕТРІ

© A. Khorolskyi[1], https://orcid.org/0000-0002-4703-7228
[1] Branch for Physics of Mining Processes of the M.S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics the National Academy Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine

MODELING THE DYNAMICS OF PRODUCTION PROCESSES IN A LONGWALL FACE BASED ON THE APPLICATION OF COLORED PETRI NETS

Мета. Створити новий підхід з оцінки надійності виробничих процесів в очисному вибої та визначення топологічних меж масштабування видобувних ланок.

Методика. Для розробки підходу при формалізації задачі оцінки надійності виробничих процесів в очисному вибої було застосовано теорію масового обслуговування. Для оцінки динаміки виробничих процесів застосовано кольорові мережі Петрі. Методика дослідження передбачала створення розрахункової моделі взаємодії обладнання з масивом гірських порід; формалізований опис технологічних зв'язків в очисному вибої; групування гірничо-геологічних, гірничотехнічних факторів за інтенсивністю відмов та впливом на процеси всередині та поза межами очисного вибою.

Результати. На основі кольорових мереж Петрі було досліджено динамічні показники надійності. Встановлено, що для шахт із високим рівнем адаптивності технологічних схем різниця склала 22,7% для коефіцієнту готовності та 27,6% для коефіцієнту машинного часу. Для шахт із низьким рівнем адаптивності це відхилення значно більше: 48,3% – для коефіцієнту готовності; 52,7% – для коефіцієнту машинного часу. При збільшенні надійності зменшується різниця між розрахунковими (нормативними) та фактичними показниками надійності. Встановлено, що для шахт із високим рівнем адаптивності технологічних схем збільшення кількості очисних вибоїв не призводить до суттєвого зменшення показників надійності (для шахти ім. «Героїв Космосу» зафіксовано зниження коефіцієнту готовності на 20,8% та зниження коефіцієнту машинного часу на 16,0%; для шахти «Лісова» зниження на 30,4% та 40,9% – відповідно). Встановлено, що для кожної топологічної мережі снує критичний поріг надійності, після якого відбувається лавинообразне зменшення коефіцієнту готовності.

Наукова новизна. Вперше встановлено закономірності впливу рівня адаптивності технологічних схем на динамічні показники надійності в залежності від масштабування фронту очисних робіт, що виражається зменшенням коефіцієнту готовності (в середньому у 2,1 рази) та коефіцієнту машинного часу (в середньому в 1,9 разів).

Практична значимість. Дослідження динаміки виробничих процесів в очисному вибої виявило диференційований вплив топологічної складності на ефективність шахт, що дозволило рекомендувати мінімалістичну структуру (одно- вибійну) для шахт з низьким рівнем адаптивності.

***Ключові слова**: надійність, коефіцієнт готовності, коефіцієнт машинного часу, стійкість, мережа Петрі.*

Вступ. В багатьох задачах планування гірничого виробництва ефективність діяльності вугледобувного підприємства оцінюють величиною річного (або добового) видобутку, собівартістю вилучення тони корисної копалини із надр, кількістю залучених ресурсів, тощо. Однак, метод оцінок на основі кількісних показників є неповним в ринкових умовах. Якщо розглядати шахту, як об'єкт управління, то одразу виникає ряд обмежень, які обумовлені специфікою об'єкту дослідження:

– По-перше, шахта є монопрофільним підприємством, хоча, якщо розглядати сучасні моделі управління виробництвом, то для досягнення ефективності необхідно вилучати та переробляти усі наявні ресурси із тони гірничої маси. В роботах [1–3] наведено результати досліджень із комплексного використання ресурсного потенціалу підприємств видобувного комплексу.

– По-друге, переважна більшість підприємств знаходиться у державній формі власності, і як наслідок, органи управління, а не колектив підприємства обирає стратегію розвитку. В практичній площині це виражається обмеженим горизонтом планування – замість стратегічних та оперативних задач вирішуються виключно тактичні задачі, які пов'язані зі зниженням собівартості, забезпеченням планових показників видобутку, скороченням часу вводу нових очисних вибоїв. Варто зауважити, що розробці стратегії передує процес визначення місії, яка в свою чергу, узгоджується з метою, але не має чисельного виміру [4]. Станом на другу половину 2026 року в Україні відсутні реальні, відповідні поточному стану галузі, плани реформування, дорожні карти трансформації вугледобувного комплексу.

– По-третє, Україна на шляху до Європейського Союзу взяла на себе зобов'язання, щодо поступового скорочення вугільної генерації [5], однак через активні військові дії будь-які процеси реформування галузі «поставлені на паузу» [6]. Досвід закриття шахт Німеччини, Румунії, Чеської Республіки [7] свідчить про те, що цей процес є тривалим (в середньому 30–50 років) і не може бути завершеним без активної участі Кабінету міністрів.

Аналізуючи вищеозначені обставини можна зробити висновок про те, що вугледобувні підприємства знаходяться на стадії доробки промислових запасів. В короткостроковій перспективі єдиною умовою виживання буде підвищення надійності технологічних схем видобутку, транспортування, переробки вугілля. Для цього слід обґрунтувати оптимальні параметри видобувного обладнання, раціоналізувати навантажувально-доставочні роботи, визначити обсяг вилучення корисної копалини із надр. Цим задачам присвячено роботи [8–10], а в роботах [11–13] наведено верифікацію. Зазначені роботи [1–3, 8–13] пропонують методичні та програмні рішення, але не враховують динаміку виробничих процесів, яка пов'язана і формується надійністю технологічних схем.

Аналіз попередніх досліджень. Надійність технологічних схем гірничого виробництва, зазвичай, прийнято оцінювати виходячи із параметрів обладнання. В роботі [14] наведено результати комплексного аналізу несправностей обладнання, а в [15] проаналізовано методи моделювання та усунення простоїв обладнання. Для моделювання застосовують теорію масового обслуговування,

марківські процеси, метод Монте-Карло [16]. Ці підходи [14–16] базуються на імітації реальної поведінки елементів технічних систем в залежності від генерації випадкових чисел, які описують взаємодію і втручання в роботу системи [17]. Переважна більшість досліджень присвячена моделюванню процесів взаємодії обладнання з масивом гірських порід [18, 19], однак не враховують взаємодію обладнання в межах усього комплексу з видобутку, транспортування, переробки корисної копалини. Невирішеною є проблема моделювання динаміки виробничих процесів. Зокрема, в роботах [20, 21] зазначено про необхідність моделювання нерівномірності надходження корисної копалини на транспортне обладнання всередині очисного вибою. Більшість наявних інструментів і підходів [14–21] дозволяють оцінювати надійність в локальний момент часу, однак не враховують динаміку зміни надійності в часі.

В цьому дослідженні запропоновано для моделювання динаміки виробничих процесів в очисному вибої застосувати мережі Петрі [22]. Відоме застосування цього підходу для моделювання процесів транспорту в кар'єрах [23, 24], відмови транспортного обладнання в підземному просторі [25], оцінки стійкості систем вентиляції [26], підвищення безпеки праці [27], оцінки ризиків [28]. Найбільшого поширення мережі Петрі отримали при моделюванні газодинамічних явищ на викидонебезпечних вугільних пластах [29, 30].

На основі проведено аналізу встановлено, що для дослідження надійності технологічних схем вугільних шахт застосовують методи теорії масового обслуговування, які базуються на імітації зміни параметрів системи і характеристик елементів системи. Мережі Петрі є перевіреним інструментом, проте для моделювання динаміки виробничих процесів в очисному вибої ще не застосовувались.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Як зазначалось раніше, динаміка виробничих процесів в очисному вибої формується надійністю технічної системи «вугільна шахта». Умовою забезпечення надійності є синхронність процесів, які відбуваються в підсистемах «видобуток», «транспорт», «підготовчі роботи», «тощо». Умова синхронності може бути сформована як задача із визначення вірогідності потрапляння випадкової величини характеристики першого процесу x на деяку задану ділянку, яка є характеристикою другого, суміжного першому процесу. Якщо розглядати очисний вибій, як складову підсистеми з видобутку вугілля, то ідеальним буде процес коли із вибою надходить безперервний однорідний потік. При масштабуванні на комплекс підземного транспортного обладнання задача розширюється до забезпечення безперервності потоку, який надходить на магістральний конвеєр, а далі, і безпосередньо в пристовбуровий двір.

Безперервність і однорідність потоку залежить від узгодження обладнання, вчасної ліквідації простоїв, зменшення часових витрат на кінцеві операції, схем транспорту. Виходячи із умов надійності можна виділити невирішену частину проблеми, яка полягає у створенні підходу, який дозволяє оцінити динаміку виробничих процесів в очисному вибої, а також оцінити топологічні межі масштабування видобувних ланок шахт за показником динамічної готовності.

Метою роботи є створення нового підходу, щодо оцінки надійності технологічних процесів в очисному вибої та визначення топологічних меж масштабування видобувних ланок.

Основна частина. Динаміка процесу з видобутку вугілля залежить від ряду чинників, серед яких можна виділити: коливання обсягів видобутку; зміни швидкості посування лінії очисного вибою; величина хвилинного вантажопотоку, що надходить із очисного вибою на системи дільничого, магістрального, загальношахтного транспорту; протяжність і стан виробок; порядок відпрацювання горизонтів, блоків, поверхів, панелей. Загальні положення, щодо врахування динаміки процесів наведено в «Нормах технологічного проєктування вугільних та сланцевих шахт» [31].

Розглянемо модель оцінки надійності процесів видобутку в очисному вибої та відповідну схему (рис. 1).

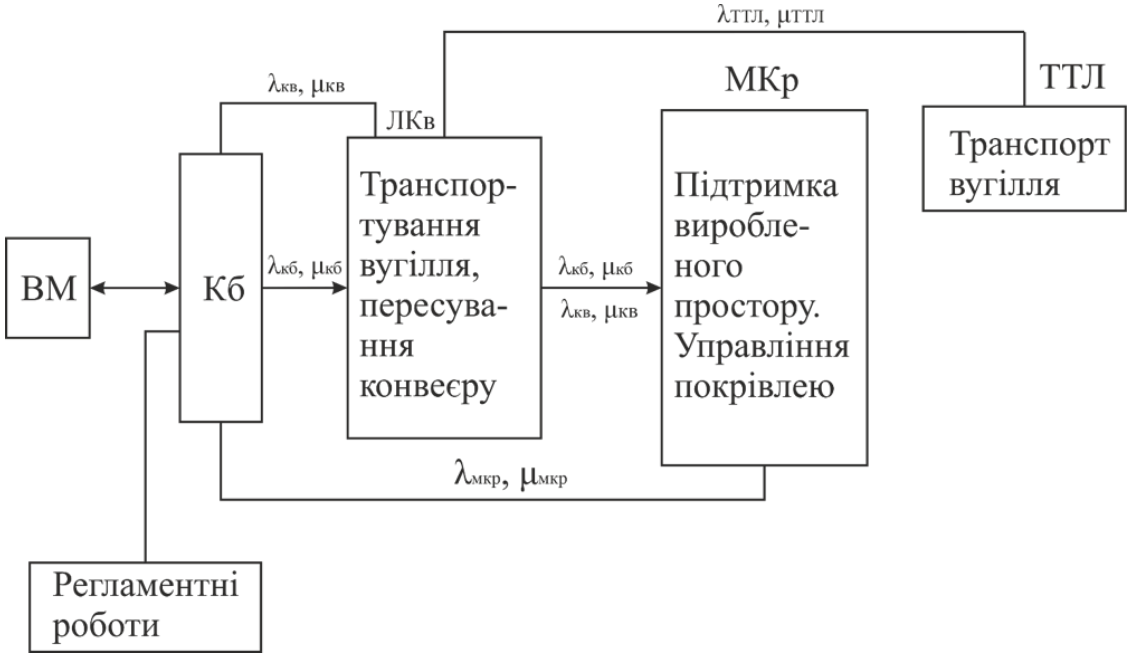


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення надійності процесів в очисному вибої

Як видно із рис. 1 процес видобутку починається з вилучення вугілля із масиву та подальшим навантаженням його на конвеєр. Цей процес здійснюється парою «комбайн (Кб) – вугільний масив (ВМ)». Пара (Кб+ВМ) представляє собою жорсткий зв'язок елементів. Елемент по якому відбувається пересування комбайну та транспортування вугілля на рис. 1 позначено ЛКв (лавний конвеєр). Далі за передвижкою ЛКв відбувається пересування секцій механізованого кріплення (на рис. 1 позначено як МКр). На відміну від конвеєру та комбайну елемент МКр може бути не одиничним, а груповим.

Як зазначалось раніше, ідеальним, з точки зору надійності, буде процес, коли буде надходити постійний та неперервний потік вугілля із очисного вибою. Джерелом відмов може бути пара (ВМ+Кб), через взаємодію обладнання з масивом гірських порід. Ці відмови групуються за гірничотехнічними та гірничо-геологічними факторами.

Інтенсивність відмов обладнання може бути описана показовим законом, при наявності породних включень в пласт

$$F(\tau_{вкл} < t) = 1 - e^{-\lambda_{вклt}}, \quad (1)$$

де $\tau_{вкл}$ – випадковий час між відмовами внаслідок включень породи в вугільний пласт; $\lambda_{вкл}$– середня інтенсивність відмов внаслідок включень породи у вугільний пласт.

Аналогічно можна записати інтенсивність відмов через гірничо-геологічні порушення пласта, газоносність (обмеження швидкості), обслуговування:

$$F(\tau_{гірн} < t) = 1 - e^{-\lambda_{гірнt}}, \quad (2)$$

$$F(\tau_{газ} < t) = 1 - e^{-\lambda_{газt}}, \quad (3)$$

$$F(\tau_{обсл} < t) = 1 - e^{-\lambda_{обслt}}, \quad (4)$$

де $F(\tau_{гірн} < t)$, $F(\tau_{газ} < t)$, $F(\tau_{обсл} < t)$ – інтенсивність відмов обладнання внаслідок гірничо-геологічних порушень пласта, обмеження швидкості за газовим фактором, обслуговуванням відповідно; $\tau_{гірн}$, $\tau_{газ}$, $\tau_{обсл}$ – випадковий час між відмовами внаслідок гірничо-геологічних порушень пласта, обмеження швидкості за газовим фактором, обслуговуванням відповідно; $\lambda_{гірн}$, $\lambda_{газ}$, $\lambda_{обсл}$ – середня інтенсивність відмов внаслідок гірничо-геологічних порушень пласта, обмеження швидкості за газовим фактором, обслуговуванням відповідно.

З урахуванням (1–4) час відмов внаслідок включень, гірничо-геологічних порушень, обмежень за газовим фактором, якістю обслуговування приймаємо:

$$F(t_{вкл} < t) = 1 - e^{-\mu_{вклt}}, \quad (5)$$

$$F(t_{гірн} < t) = 1 - e^{-\mu_{гірнt}}, \quad (6)$$

$$F(t_{газ} < t) = 1 - e^{-\mu_{газt}}, \quad (7)$$

$$F(t_{обсл} < t) = 1 - e^{-\mu_{обслt}}, \quad (8)$$

де $t_{вкл}$, $t_{гірн}$, $t_{газ}$, $t_{обсл}$ – випадковий час тривалості перерви очисного комбайну внаслідок наявності включень породи, гірничо-геологічних порушень пласта, обмежень за газовим фактором, недосконалістю обслуговування; $\mu_{вкл}$, $\mu_{гірн}$, $\mu_{газ}$, $\mu_{обсл}$ – інтенсивність відновлення безвідмовної роботи очисного комбайну після відмови внаслідок включень породи, гірничо-геологічних порушень пласта, обмежень за газовим фактором, недосконалістю обслуговування.

Геологічні порушення часто є такими, які можна передбачити.

Для пари «лавний конвеєр – механізоване кріплення» інтенсивність відмов буде:

$$F(\tau_{пконв} < t) = 1 - e^{-\lambda_{пконвt}}, \quad (9)$$

$$F(\tau_{пмех} < t) = 1 - e^{-\lambda_{пмехt}}, \quad (10)$$

$$F(\tau_{пвідмов} < t) = 1 - e^{-\lambda_{пвідмовt}}, \quad (11)$$

де $F(\tau_{пконв} < t)$, $F(\tau_{пмех} < t)$, $F(\tau_{відомв} < t)$ – інтенсивність відмов обладнання внаслідок відставання процесів передвижки конвеєру, відставання секцій механізованого кріплення, технологічних та експлуатаційних відмов обладнання відповідно; $\tau_{пконв}$, $\tau_{пмех}$, $\tau_{відмов}$ – випадковий час між відмовами внаслідок відставання процесів передвижки конвеєру, відставання секцій механізованого

кріплення, технологічних та експлуатаційних відмов обладнання відповідно; $\lambda_{пконв}$, $\lambda_{пмех}$, $\lambda_{відмов}$ – середня інтенсивність відмов внаслідок відставання процесів передвижки конвеєру, відставання секцій механізованого кріплення, технологічних та експлуатаційних відмов обладнання відповідно.

З урахуванням цього час відмов внаслідок відставання процесів передвижки конвеєру, відставання секцій механізованого кріплення, технологічних та експлуатаційних відмов обладнання відповідно приймаємо на основі (9–11):

$$F(t_{пконв} < t) = 1 - e^{-\mu_{пконвt}}, \quad (12)$$

$$F(t_{пмех} < t) = 1 - e^{-\mu_{пконвt}}, \quad (13)$$

$$F(t_{відмов} < t) = 1 - e^{-\mu_{відмовt}}, \quad (14)$$

де $t_{пконв}$, $t_{пмех}$, $t_{відмов}$ – випадковий час тривалості перерви очисного комбайну внаслідок відставання процесів передвижки конвеєру, відставання секцій механізованого кріплення, технологічних та експлуатаційних відмов обладнання відповідно; $\mu_{пконв}$, $\mu_{пмех}$, $\mu_{відмов}$ – інтенсивність відновлення безвідмовної роботи очисного комбайну після відмови внаслідок відставання процесів передвижки конвеєру, відставання секцій механізованого кріплення, технологічних та експлуатаційних відмов обладнання відповідно.

Умовою ідеального процесу є синхронність процесів пересування секцій механізованого кріплення, лавного конвеєру відповідно до швидкості подачі очисного комбайну. Потік вимог для розподілу за Пуассоном буде

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad (15)$$

де k – випадкове число потреб за проміжок часу t; λ – інтенсивність потоку вимог.

Час обслуговування складе

$$f(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad (16)$$

де μ – інтенсивність обслуговування однієї вимоги.

Для M каналів вірогідність зупинки очисного комбайну складе

$$P_{>N}(M) = \sum_{n=N}^{\infty} P_n(M), \quad (17)$$

де n – кількість вимог до надійності для одного каналу; N – загальна кількість вимог для усіх M каналів.

В загальному виразі вплив факторів відмов в середині очисного вибою та поза межами очисного вибою можуть бути виражені коефіцієнтом машинного часу, який визначиться за наступним виразом

$$K_M = \frac{1}{K_{рп}[1 + Q_{тл}(K_{рпо} + K_{гф} + K_{прф}) + \sum_{i=1}^{n} K_{ні} + \sum_{j=1}^{m} a_j K_{нj}] + \sum_{k=1}^{p} K_{нк}}, \quad (18)$$

де $K_{рп}$ – коефіцієнт, який враховує періодичні простої обладнання внаслідок регламентних робіт, а також перерви між змінами, вихідні дні, тощо; $Q_{тл}$ – неперервний годинний або добовий потік вугілля, породи, або інший потік в межах підсистеми; $K_{рпо}$ – коефіцієнт, який враховує регламентні перерви в межах пев-

ного обсягу потоку, в нашому випадку видобутку вугілля; ці перерви безпосередньо не пов'язані з самим процесом, а включають перерви між виймальними циклами, завантаженням вугілля; $K_{гф}$ – коефіцієнт, який враховує несправності, а також простої, які виникають внаслідок обмежень за газовим фактором; $K_{прф}$ – коефіцієнт, який враховує несправності через вплив природних факторів (наприклад включення прошарків породи); $K_{ні}$ – коефіцієнт несправності *i*-го елементу або процесу всередині очисного вибою, тобто всередині системи «видобуток вугілля»; n – число елементів, або процесів всередині очисного вибою; $K_{нj}$ – коефіцієнт несправності *j*-го елементу або процесу поза очисним вибоєм, тобто поза системою «видобуток вугілля»; m – число елементів, або процесів поза межами очисного вибою; $K_{нк}$ – коефіцієнт несправності обладнання, який враховує зупинки часу, які мають випадкову тривалість часу, до цих зупинок відноситься вихід обладнання внаслідок наробки на відмовлення; p – число елементів, або процесів, які мають випадкову тривалість часу.

Варто зазначити, що коефіцієнт машинного часу $K_м$ не в повній мірі може описати надійність технологічної схеми. Варто враховувати і коефіцієнт готовності обладнання $K_г$, який враховує можливість обладнання перебувати в робочому стані і бути готовим до виконання функцій з видобутку, транспортування корисної копалини. Коефіцієнт машинного часу не може бути більшим за коефіцієнт готовності, тобто $K_M \le K_г$.

При моделюванні і дослідженні показників надійності коефіцієнт готовності є базовим, адже на відміну від коефіцієнту машинного часу враховує і рівень організації, а не тільки рівень обладнання.

В роботі [32] методику розрахунку коефіцієнту готовності для вугільних шахт, в [33] наведено методику визначення коефіцієнту готовності вугільних шахт.

Для дослідження динаміки і топологічної стійкості застосовано мережі Петрі, які представляють собою двочастковий орієнтований граф виду:

$$N = (P, T, G, \Omega), \tag{19}$$

$$N = (\{p_1, p_2, \ldots, p_n\}, \{t_1, t_2, \ldots, t_m\}, \{G_{p-t}, G_{t-p}\}, \{\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_k\}), \tag{20}$$

де $\{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$ – множина n позицій; $\{t_1, t_2, \ldots, t_m\}$ – множина m переходів; $\{G_{p-t}, G_{t-p}\}$ – множина дуг виду $G_{p-t} = (p \times t)$ та $G_{t-p} = (t \times p)$, які відповідно йдуть від позицій p до переходів t та від переходів t до позицій p відповідно; $\{\omega_1, \omega_2, \ldots, \omega_k\}$ – множина ваг відповідних k дуг.

Для опису реальної технологічної схеми було введено два визначення: λ – інтенсивність відмов; μ – інтенсивність відновлення, яка дорівнює відношенню адаптивності системи s до часу затраченого на простої t_p, тобто [32]

$$\mu = \frac{s}{t_p}. \tag{21}$$

Тоді, можна сформувати умову працездатності технологічної мережі вугільної шахти

$$K_г > 0 \text{ при } \lambda \to 0, \mu \to \infty. \tag{22}$$

При $K_г$ = 1,0 мережа є ідеальною, тобто впродовж усього часу роботи відсутні стани простоїв та ремонту. Відмова – це стан, коли фішка «токен» не може переміститись, тобто відбувається перехід із стану «робота» в стан «ремонт» [33]. Кожна позиція в певний момент часу має певну кількість маркерів (фішок). Коли неможливо здійснити перехід із однієї позиції в іншу, то виникає ситуація функціонального розриву. Коефіцієнт готовності та коефіцієнт машинного часу можна визначити на основі імітації реального очисного вибою. В середовищі CPN IDE було створено ідентичну рис. 1 мережу Петрі (рис. 2).

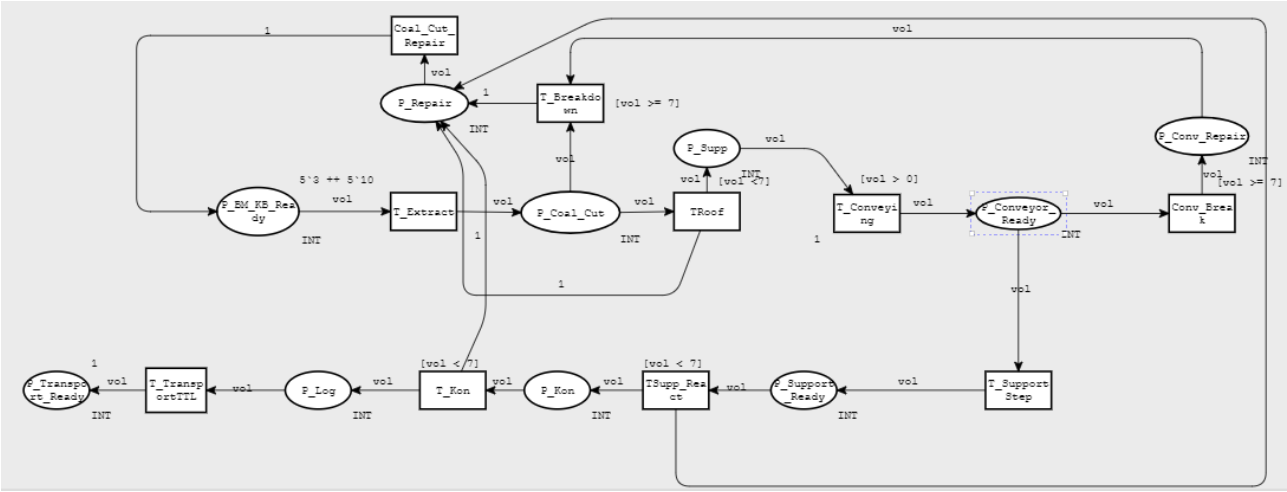


Рис. 2. Мережа Петрі очисного вибою

Мережа представляє собою сукупність станів (овали) та умов переходу (прямокутники). Наведена мережа містить не тільки функціональні зв’язки між обладнанням (рис. 1), а також і блоки аварійних простоїв (рис. 3).

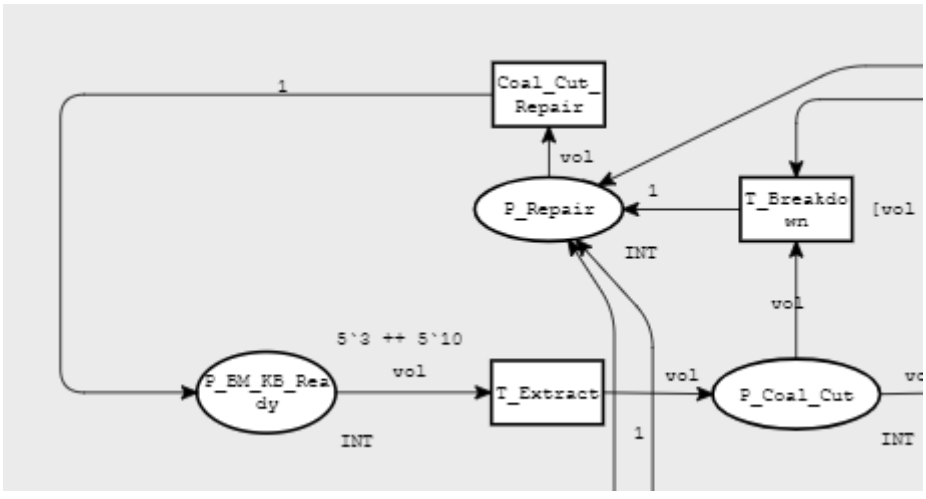


Рис. 3. Фрагмент мережі Петрі, який демонструє аварійний стан

Як видно із рис. 3 на початку у нас є вугільний масив, який готовий до вийняння (позиція P_BM_KB_Ready) умовою переходу в інший стан, який відповідає руйнуванню масиву гірських порід очисним комбайном (позиція

P_Coal_Cut) є перехід «T_Extracr». Якщо умова працездатності виконується, то відбувається перехід із позиції «P_BM_KB_Ready» в позицію «P_Coal_Cut», інакше відбувається перехід в позицію аварійної зупинки (P_Repair). Умовою переходу із позиції аварійної зупинки є досягнення умови відновлення працездатного стану в переході Coal_Cut_Repair.

Умовою працездатності є безперервне переміщення токенів із початкової позиції в кінцеву. Про надійність процесу судять за кількістю токенів в кінцевій точці (P_Transport_Ready), яка відповідає потоку вугілля, який надходить із очисного вибою на магістральний конвеєр (рис. 4).

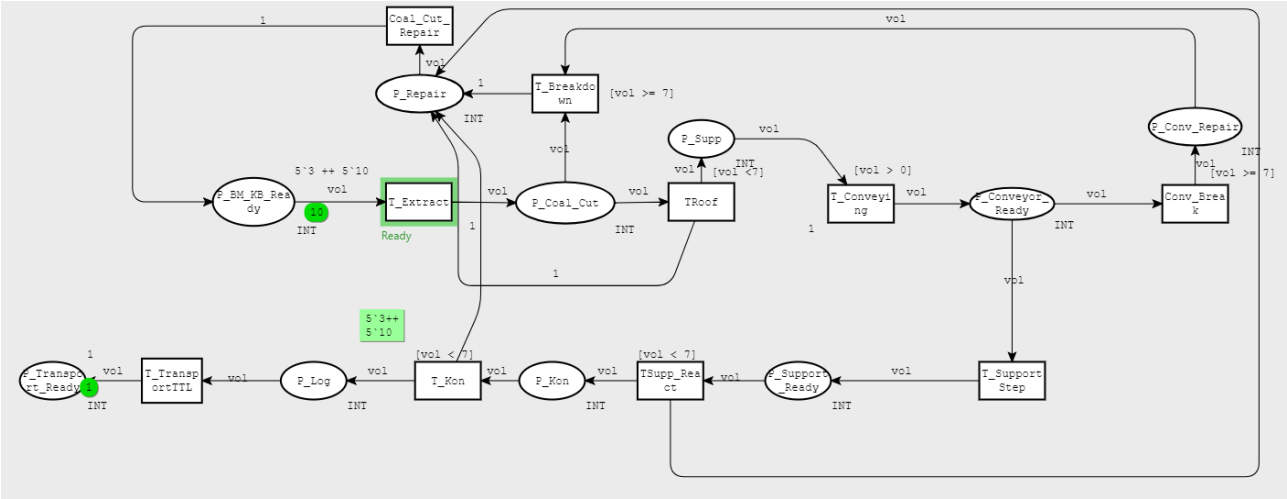


Рис. 4. Фрагмент мережі Петрі на першому кроці виконання програми

Як видно із рис. 4 в момент початку виймання комбайн ефективно вийняв першу порцію вугілля і токен перейшов в іншу позицію «P_Conveyor_Ready», яка відповідає готовності транспортувати вугілля за допомогою конвеєру, адже механізоване кріплення ефективно підтримує вироблений простір і виконується умова переходу «T_Roof» (рис. 5).

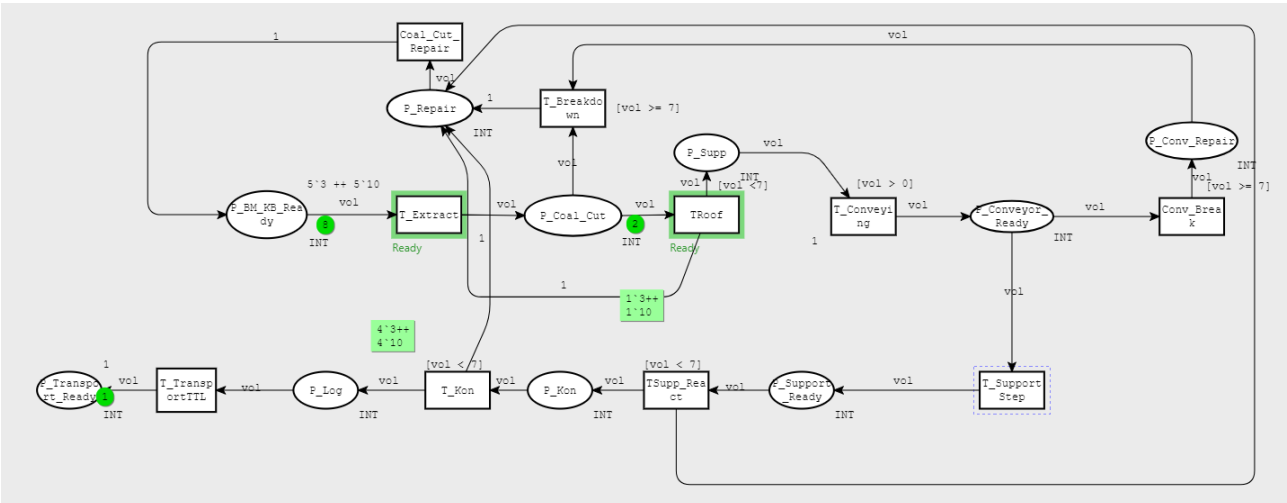


Рис. 5. Фрагмент мережі Петрі на другому кроці виконання програми

Мережі Петрі дозволяють досліджувати динаміку процесу для довільної кількості кроків. На основі наведеної методики та алгоритму моделювання створено програмну реалізацію. В середовищі програмування Python 3.12 за допомогою класу PetriNetSimulator можна автоматично обчислити час робочого процесу, час простоїв, а також розрахувати коефіцієнти машинного часу та коефіцієнти готовності. Для розрахунку динаміки показників та топологічної стійкості варто обрати швидкість подачі очисного комбайну, ширину захвату очисного комбайну, крок пересування секції механізованого кріплення, а також схему транспорту (рис. 6). Програма дозволяє визначити динамічні та статичні показники коефіцієнту машинного часу, коефіцієнту готовності для різних технологічних схем і різної кількості очисних вибоїв.

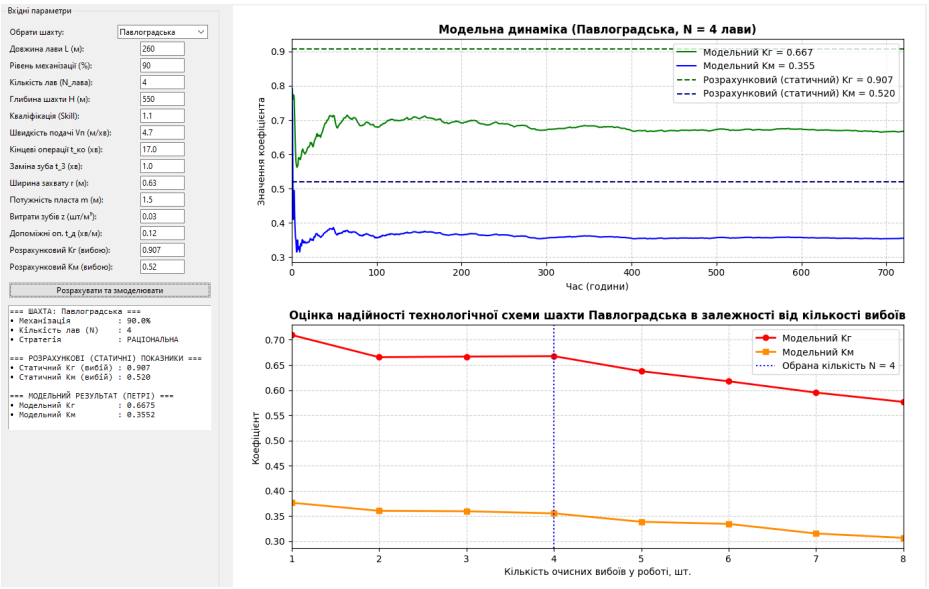


Рис. 6. Робоче вікно програми для оцінки динаміки виробничих процесів

У якості прикладу розглянуто дві протилежні за техніко-економічними показниками шахти («ім. Героїв Космосу», «Лісова»). За результатами моделювання показників надійності встановлено, що шахта ім. «Героїв Космосу» (рис. 7) має значно вищі динамічні показники надійності ($К_г$=0,705, $К_м$=0,381) ніж у шахти «Лісова» (рис. 8) з $К_г$=0,438, $К_м$=0,209. Однак, якщо порівнювати нормативні (модельні) значення, то різниця є несуттєвою (для шахти ім. «Героїв Космосу» $К_г$=0,912, $К_м$=0,526; для шахти «Лісова» $К_г$=0,847, $К_м$=0,442). Усі нормативні (модельні) значення відповідають нормативним [34].

Аналіз рис. 7–8 наочно показує різницю між динамічними показниками надійності вугільних шахт, проте нормативні показники практично не відрізняються. Це обумовлено тим, що реальні (динамічні) показники надійності формуються на 4–5 добу (найбільші піки припадають на проміжок часу 20–50 год.).

Застосування наведеного підходу дозволяє моделювати топологічні межі масштабування видобувних ділянок. Для шахти ім. Героїв Комсому було визначено показники коефіцієнту готовності та коефіцієнту машинного часу в залежності від кількості очисних вибоїв (рис. 9).

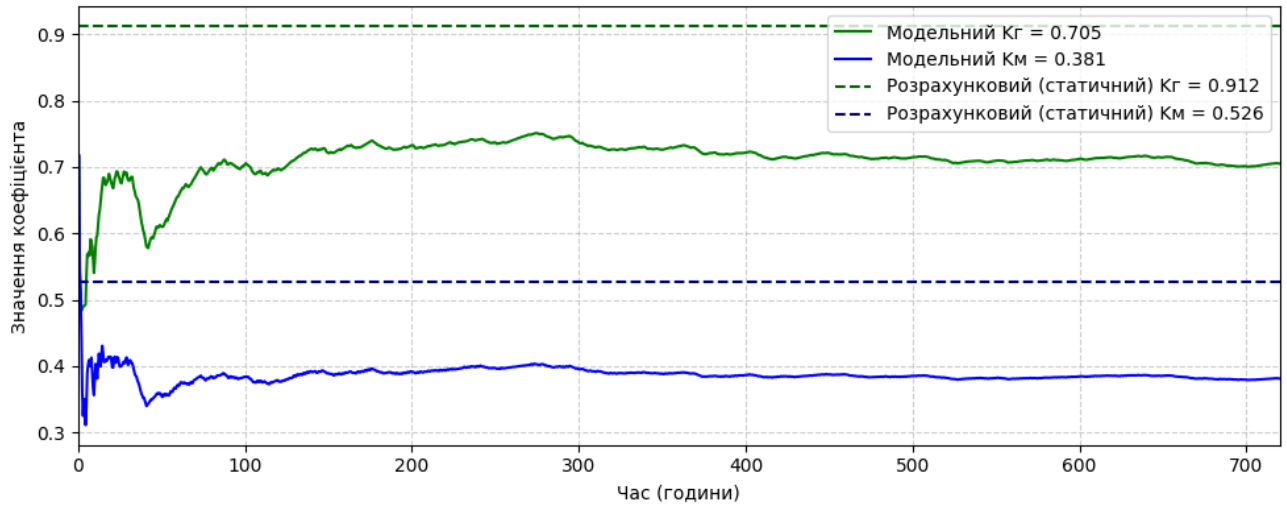


Рис. 7. Динаміка зміни показників надійності шахти ім. «Героїв Космосу»

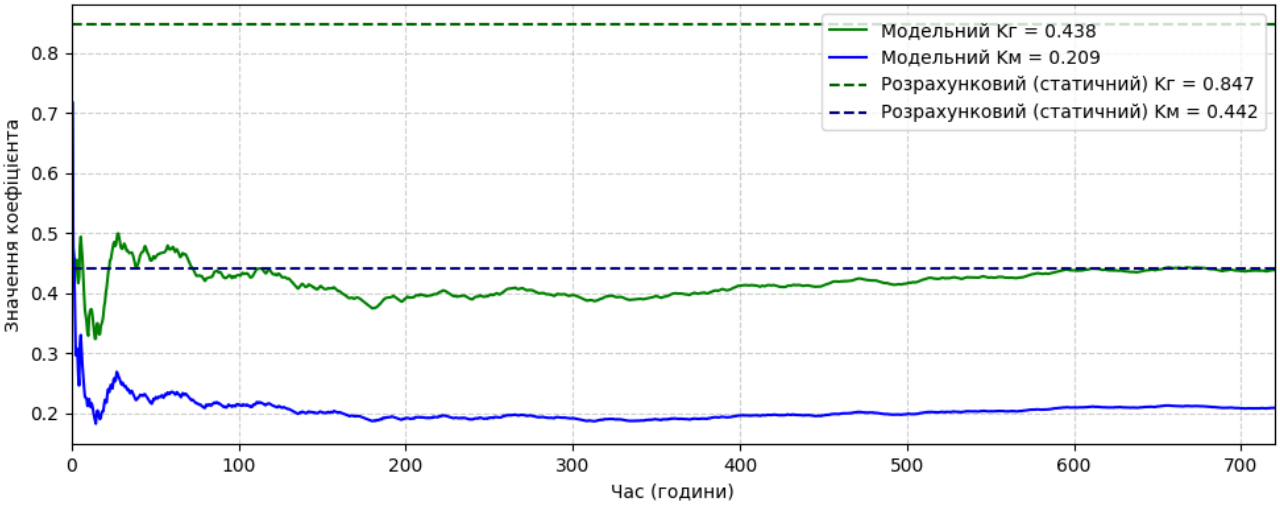


Рис. 8. Динаміка зміни показників надійності шахти «Лісова»

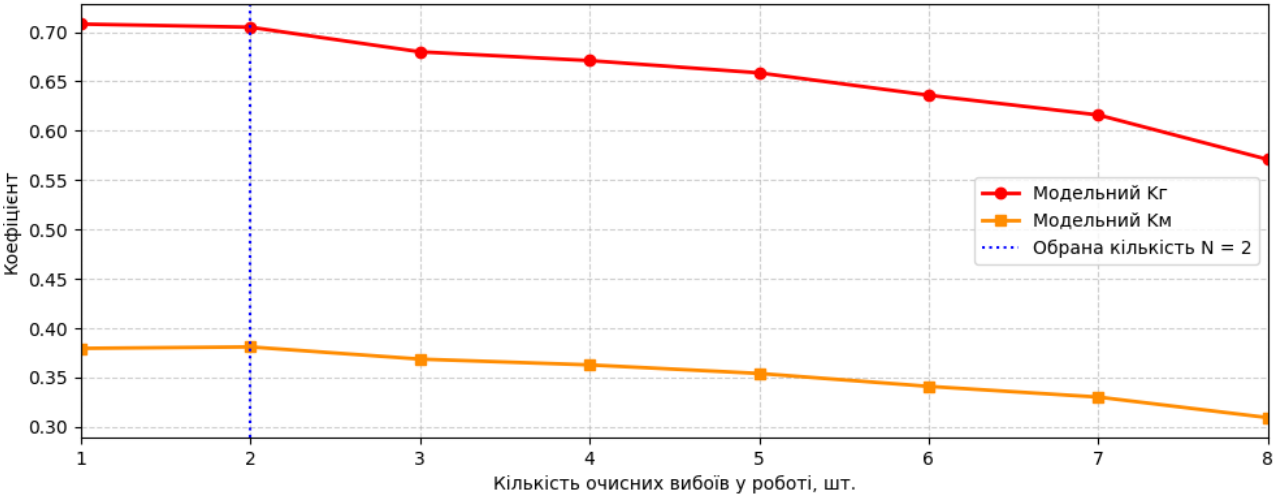


Рис. 9. Динаміка зміни показників надійності шахти ім. «Героїв Космосу» в залежності від кількості очисних вибоїв

Як видно із рис. 9 для шахт із високим рівнем адаптивності технологічних схем збільшення кількості очисних вибоїв не призводить до суттєвого зменшення показників надійності. Вказана обставина свідчить про те, що масштабування фронту очисних робіт прямо пропорційна надійності її транспортної мережі. Для кожної топологічної мережі снує критичний поріг надійності, після якого відбувається лавинообразне зменшення коефіцієнту готовності. В залежності від рівня адаптивності цей поріг різний, наприклад для шахти ім. «Героїв Космосу» погіршення відбувається після вводу 5 очисного вибою, а для шахти «Лісова» після вводу другого очисного вибою (рис. 10).

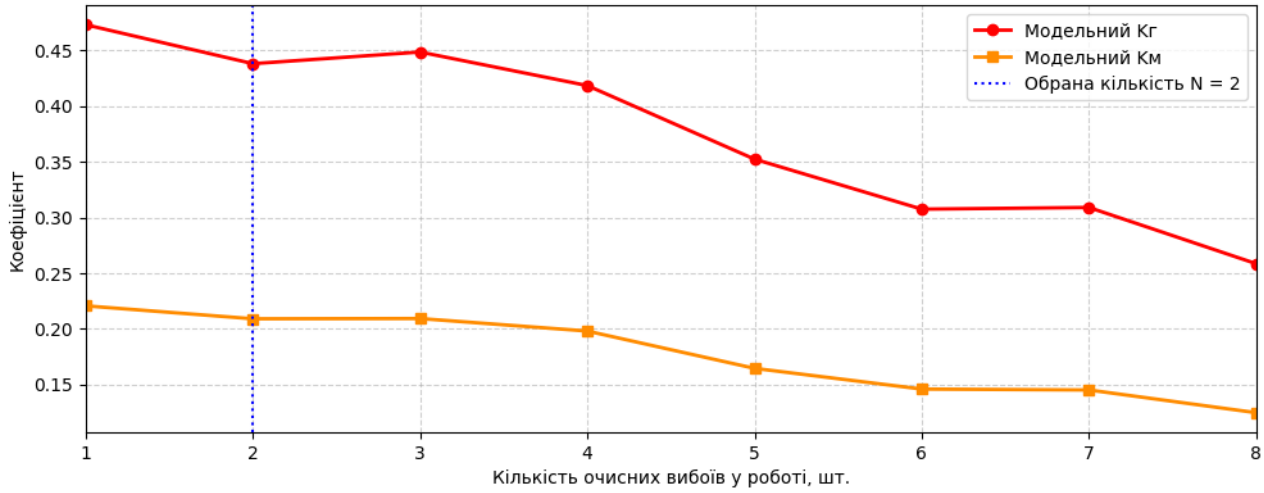


Рис. 10. Динаміка зміни показників надійності шахти «Лісова» в залежності від кількості очисних вибоїв

Слід зазначити, що при застосуванні схем транспорту з бункерами, розділенням транспортних потоків різниця динамічних показників надійності буде збільшуватись. Резервом підвищення надійності видобувного комплексу шахти є збільшення надійності систем транспорту за умови досягнення рівномірності потоку вугілля, що надходить із очисного вибою.

Висновки. Дослідження динаміки виробничих процесів в очисному вибої на основі розроблених мереж Петрі дозволили зробити висновок про суттєву різницю між розрахунковими та паспортними показниками надійності. Для шахт із високим рівнем адаптивності технологічних схем різниця склала 22,7 % для коефіцієнту готовності (розрахункове значення коефіцієнту готовності $К_г$ = 0,912, фактичне $К_г$ = 0,705) та 27,6 % для коефіцієнту машинного часу (розрахункове значення $К_м$ = 0,526, фактичне $К_м$ = 0,381). Для шахт із низьким рівнем адаптивності це відхилення значно більше: 48,3% – для коефіцієнту готовності (розрахункове значення $К_г$ = 0,847, фактичне $К_г$ = 0,438); 52,7 % – для коефіцієнту машинного часу (розрахункове значення $К_м$ = 0,381, фактичне $К_м$ = 0,209). При збільшенні надійності зменшується різниця між розрахунковими (нормативними) та фактичними показниками надійності.

Дослідження динаміки виробничих процесів в очисному вибої виявило диференційований вплив топологічної складності на ефективність шахт. Для підприємств з низьким рівнем адаптивності оптимальною є мінімалістична

структура (один вибій), тоді як для підприємств з високим рівнем адаптивності доцільною є мультивибійна структура, де ефект масштабу забезпечує самостабілізацію динамічного ККД.

Для шахт із високим рівнем адаптивності технологічних схем збільшення кількості очисних вибоїв не призводить до суттєвого зменшення показників надійності (для шахти ім. «Героїв Космосу» зниження $K_г$ на 20,8 % та зниження $K_м$ на 16,0 %; для шахти «Лісова» зниження $K_г$ на 30,4 % та зниження $K_м$ на 40,9 %). Вказана обставина свідчить про те, що масштабування фронту очисних робіт прямо пропорційна надійності її транспортної мережі. Для кожної топологічної мережі снує критичний поріг надійності, після якого відбувається лавинообразне зменшення коефіцієнту готовності.

Перелік посилань

1. Bondarenko, V. I., Kovalevska, I. A., Podkopaiev, S. V., Sheka, I. V., & Tsivka, Y. S. (2022). Substantiating arched support made of composite materials (carbon fiber-reinforced plastic) for mine workings in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1), Article 012026. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012026
2. Pavlychenko, A., Adamchuk, A., Shustov, O., & Anisimov, O. (2020). Justification of dump parameters in conditions of high water saturation of soils. *Technology Audit and Production Reserves*, 6(3(56)), 22–26. https://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.218139
3. Adamchuk, A., Shustov, O., Panchenko, V., & Slyvenko, M. (2019). Substantiation of the method of determination the open-cast mine final contours taking into account the transport parameters. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 59, 21–32. https://doi.org/10.33271/crpnmu/59.021
4. Khorolskyi, A., Mamaikin, O., Fomychova, L., Pochepov, V., & Lapko, V. (2022). Developing and implementation a new model optimizing the parameters of coal mines under diversification. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 17(16), 1544–1553.
5. Diachuk, O., Kholod, N., Podolets, R., Graham, N., Semeniuk, A., Evans, M., ... Zagoruichyk, A. (2025). Pathways for decarbonization of the buildings sector in Ukraine. *Energy and Climate Change*, 6, Article 100195. https://doi.org/10.1016/j.egycc.2025.100195
6. Lousada, S., Delehan, S., & Khorolskyi, A. (2024). Application of dynamic programming models for improvement of technological approaches to combat negative water leakage in the underground space. *Water*, 16(14), Article 1952. https://doi.org/10.3390/w16141952
7. Kolasinski, T. W., Tłuczak, A., & Wigier, M. J. (2025). Perspective on decarbonization in Ukraine: Selected issues. *Journal of International Studies*, 18(4). https://doi.org/10.14254/2071-8330.2025/18-4/1
8. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Zubko, S., Lozynskyi, V., & Sai, K. (2021). Instability assessment of hanging wall rocks during underground mining of iron ores. *Minerals*, 11(8), Article 858. https://doi.org/10.3390/min11080858
9. Хорольський, А. О., & Косенко, А. В. (2022). Розробка та реалізація моделі для обґрунтування оптимальних технологічних схем відпрацювання викидонебезпечних вугільних пластів. *Науковий вісник ДонНТУ*, 1(8)–2(9), 193–205. https://doi.org/10.31474/1999-981X-2023-1-97-108
10. Гріньов, В. Г., & Хорольський, А. О. (2020). Визначення раціонального обсягу вилучення корисних копалин із надр: маржинальний підхід. *Економіка промисловості*, 3(91), 82–95. https://doi.org/10.15407/econindustry2020.03.082
11. Kovalevska, I. A., Bondarenko, V. I., Symanovych, H. A., Sheka, I. V., & Tsivka, Ye. S. (2022). Modeling the rational parameters for innovative fastening systems in mine workings using composite materials. In *15th International Congress on Rock Mechanics and Rock Engineering & 72nd Geomechanics Colloquium – Challenges in Rock Mechanics and Rock Engineering* (pp. 1538–1543). CRC Press.

12. Liu, Y., & Ohara, H. (2017). Energy-efficient fluidized bed drying of low-rank coal. *Fuel Processing Technology*, 155, 200–208. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.06.008
13. Shukor, A. A. A., Newaz, M. S., Rahman, M. K., & Taha, A. Z. (2021). Supply chain integration and its impact on supply chain agility and organizational flexibility in manufacturing firms. *International Journal of Emerging Markets*, 16(8), 1721–1744. https://doi.org/10.1108/IJOEM-04-2020-0418
14. Odeyar, P., Apel, D. B., Hall, R., Zon, B., & Skrzypkowski, K. (2022). A review of reliability and fault analysis methods for heavy equipment and their components used in mining. *Energies*, 15(17), Article 6263. https://doi.org/10.3390/en15176263
15. Sahiner, S. F., & Golbasi, O. (2026). Mining equipment maintenance and reliability: A systematic review of modelling approaches, solution methods, and applications. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 1–29. https://doi.org/10.1080/17480930.2026.2662304
16. Ugurlu, O. F., & Kumral, M. (2020). Reliability-based performance analysis of mining drilling operations through Markov chain Monte Carlo and mean reverting process simulations. *Simulation*, 96(7), 593–604. https://doi.org/10.1177/0037549720923751
17. Ozdemir, B., & Kumral, M. (2019). Analysing human effect on the reliability of mining equipment. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*, 26(6), 872–887. https://doi.org/10.1504/IJHVS.2019.102716
18. Rahimdel, M. J., & Ghodrati, B. (2024). Reliability, maintainability, and availability of mining drilling. In *Exploring the World of Drilling* (p. 151). IntechOpen. https://doi.org/10.5772/intechopen.114938
19. Jakkula, B., Mandela, G. R., & Tripathi, A. K. (2024). Reliability analysis of complex repairable systems using artificial neural networks: A case study on underground mining machinery. *Precision Mechanics and Digital Fabrication*, 1(4), 189–200. https://doi.org/10.56578/pmdf010401
20. Rahmani, Z., Rahimdel, M. J., & Noferesti, H. (2023). Reliability analysis of a fleet of mining trucks (A case study in Iran). *Journal of Geomine*, 1(2), 68–74.
21. Jakkula, B., Mandela, G. R., & Tripathi, A. K. (2025). Effective maintenance planning for improving the reliability of underground mining equipment—A case study. *Journal of Engineering Management and Systems Engineering*, 4(4), 257–268. https://doi.org/10.56578/jemse040403
22. Liu, C., Li, H., Zeng, Q., Lu, T., & Li, C. (2020). Cross-organization emergency response process mining: An approach based on Petri Nets. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, Article 8836007. https://doi.org/10.1155/2020/8836007
23. Ozdemir, B., & Kumral, M. (2018). Appraising production targets through agent-based Petri net simulation of material handling systems in open pit mines. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 87, 138–154. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.06.008
24. Wang, G., Yan, X., Kou, Z., Deng, H., & Wang, K. (2023). Research on operation conflict of auxiliary transport locomotive in complex mine based on extended Petri net. *Machines*, 11(5), Article 552. https://doi.org/10.3390/machines11050552
25. Li, W. H., & Yan, S. C. (2019). Research on mine locomotive scheduling model and deadlock based on Petri net. In *2019 International Conference on Modeling, Analysis, Simulation Technologies and Applications (MASTA 2019)* (pp. 293–299). Atlantis Press. https://doi.org/10.1007/s43674-022-00039-7
26. Yinhui, W., Min, Y., Lijun, D., Keyi, Y., & Ke, G. (2026). Petri net based FPL-FPSN mine ventilation fault diagnosis method. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 1–14. https://doi.org/10.1007/s42461-026-01526-y
27. Li, W., Cao, Q., He, M., & Sun, Y. (2018). Industrial non-routine operation process risk assessment using job safety analysis (JSA) and a revised Petri net. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 533–538. https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.029
28. Henry, M. H., Layer, R. M., & Zaret, D. R. (2010). Coupled Petri nets for computer network risk analysis. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 3(2), 67–75. https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2010.05.002
29. Wang, R., Zheng, W., Liang, C., & Tang, T. (2016). An integrated hazard identification method based on the hierarchical Colored Petri Net. *Safety Science*, 88, 166–179. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2016.05.006
30. Chung, L. P., & Chang, C. T. (2011). Petri-net models for comprehensive hazard analysis of MOCVD processes. *Computers & Chemical Engineering*, 35(2), 356–371.

31. *ВНТП 1-86. Норми технологічного проектування вугільних і сланцевих шахт.* (1986). Міністерство вугільної промисловості України.
32. Хорольський, А. О. (2026). Застосування мереж Петрі для оцінки коефіцієнту готовності технологічних схем вугільних шахт. В *Потураївські читання – 2026* (с. 52–54). ІГТМ НАН України, НТУ «Дніпровська політехніка».
33. Хорольський, А. О. (2026). Методика визначення коефіцієнту готовності технологічних схем вугільних шахт. In *Матеріали XVI Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених «Наукова весна 2026»* (с. 413–414). НТУ «Дніпровська політехніка».
34. Гребенкін, С. С., & Агафонов, А. В. (2006). *Гірничі машини та комплекси для підземного видобутку вугілля*. *Монографія*. Норд-Прес.

ABSTRACT

Purpose. To develop a novel approach for evaluating the reliability of production processes at the longwall face and determining the topological boundaries for scaling extraction units.

Methodology. Queuing theory was applied to formalize the problem of assessing production process reliability at the longwall face. Colored Petri Nets were utilized to evaluate the dynamics of production processes. The research methodology involved constructing a computational model of equipment interaction with the rock mass, formalizing technological links at the longwall face, and grouping mining-geological and mining-technical factors according to failure rates and their impact on processes inside and outside the longwall face.

Findings. Dynamic reliability metrics were investigated using Colored Petri Nets. It was established that for mines with high adaptability of mining methods, the discrepancy reached 22.7% for the availability factor and 27.6% for the machine time factor. For mines with low adaptability, this deviation was significantly larger: 48.3% for the availability factor and 52.7% for the machine time factor. As reliability increases, the gap between estimated (standard) and actual reliability metrics diminishes. It was determined that for mines with high adaptability of mining methods, increasing the number of longwall faces does not lead to a significant drop in reliability indicators (for the "Heroiv Kosmosu" mine, a decrease in the availability factor of 20.8% and a decrease in the machine time factor of 16.0% were recorded; for the "Lisova" mine, the reductions were 30.4% and 40.9%, respectively). It was established that a critical reliability threshold exists for each topological network, beyond which a cascading decline in the availability factor occurs.

Originality. For the first time, regularities describing how the adaptability level of mining methods affects dynamic reliability metrics across different scales of the longwall mining front have been established, revealing a reduction in the availability factor (by an average factor of 2.1) and the machine time factor (by an average factor of 1.9.

Practical implications. The study of production process dynamics at the longwall face revealed a differentiated impact of topological complexity on mine performance, enabling the recommendation of a minimalist (single longwall) structure for mines with low adaptability levels.

Keywords: *reliability, availability factor, machine time factor, stability, Petri net.*

дата першого надходження статті до видання	10.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	20.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. A. Khorolskyi
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.