

ВСТУП

Кінцевою метою гірничих підприємств є видобуток корисних та отримання сировини для інших галузей з найменшими витратами. Одним з аспектів видобутку корисних копалин на відкритих гірничих роботах, який найбільше впливає на прибуток, є витрати на транспортування сировини. Тому вибір обладнання для кар'єрів є важливим фактором, що впливає на загальну вартість отриманої сировини під час видобутку корисних копалин. Загалом подібного роду задачі можна віднести до розділу лінійного програмування, тобто оптимізація транспортування матеріалів таким чином, щоб задовольнити потреби виробництва у сировині та мінімізувати загальні витрати.

Загалом, проблема вибору обладнання передбачає придбання відповідного обладнання для видобутку та транспортування гірничорудної сировини. Важливо, щоб усе наявне обладнання було сумісним як з робочим середовищем, так і з іншими типами операційного обладнання. Це обладнання також має відповідати виробничим обмеженням навіть після врахування сумісності, надійності обладнання та обслуговування.

Розглядаючи проблему вибору обладнання, як проблему оптимізації, корисно розглядати політику закупівлі та ліквідації протягом послідовності завдань або кількох періодів.

Розглянемо питання саме вибору обладнання для видобутку та транспортування видобутого матеріалу (екскаваторів та самоскидів), як порожньої породи у відвал, так і руди на збагачувальну фабрику протягом усього терміну експлуатації кар'єру. Важливою проблемою при цьому є оптимальний розподіл цього обладнання, тобто проблема визначення того, як і де має використовуватися обладнання. Ця проблема може мати величезний вплив на вартість експлуатації обладнання, а також кінцеву продуктивність кар'єру.

Отже, дослідження вибору сумісних, але не обов'язково однорідних одиниць обладнання для видобутку та транспортування (самоскидів та екскаваторів) на відкритих гірничих роботах є **актуальним науково-технічним завданням**.

Мета роботи - враховуючи графік видобутку, якого необхідно дотримуватися, і набір відповідних самоскидів та екскаваторів, створити інструмент вибору обладнання, який генерує політику закупівлі та утилізації, щоб мінімізувати загальну вартість видобутку сировини.

Об'єкт досліджень – процес видобутку та транспортування системою «екскаватор-самоскид» гірської маси на відкритих гірничих роботах.

Предмет дослідження – параметри системи «екскаватор-самоскид» на відкритих гірничих роботах.

Наукове положення.

1. Встановлено, що коефіцієнт відповідності, який включає час очікування та черги для вантажівок і навантажувачів, може використовуватися як критерій оцінювання оптимальності вибору парків навантажувачів та вантажівок при транспортуванні гірської маси на кар'єрах.
2. Встановлено, що більш містке обладнання (навантажувачі та вантажівки) для транспортування гірської маси на кар'єрах вважається надто дорогим і забезпечує економічну вигоду, лише якщо його можна повністю використовувати протягом усього його строку експлуатації, натомість обладнання помірної місткості може адаптуватися до мінливих вимог до продуктивності та часу циклу перевезення.

1. АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИБОРУ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ «ЕКСКАВАТОР-САМОСКИД»

1.1. Аналіз системи «екскаватор-самоскид»

Видобувні підприємства з технологією відкритих гірничих робіт містять один або декілька кар'єрів з корисними копалинами, які видобуваються з верхнього шару. Процес створення кар'єру є послідовним: (рис. 1.1) [9, 10]

- спочатку вибухівкою розпушують землю;
- потім землерийне обладнання знімає шари (або уступи) породи;
- ці уступи підривають, розкопують і знімають, що робить кар'єр ширшим та глибшим.

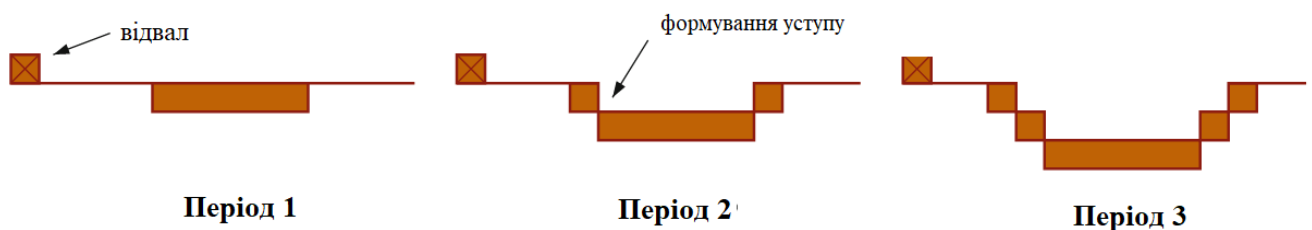


Рис. 1.1 Графік видобутку з плановими періодами.

У кожному плановому періоді рішення щодо планування кар'єру включають, який матеріал буде видобуто, а також де будуть розташовані виїмкове обладнання та відвали. Для довгострокового графіка ці періоди можуть тривати не один рік.

Проектувальники кар'єрів поділяють перспективний план (або графік видобутку) на планові періоди. Тривалість цих періодів може відрізнятися залежно від завдання планування: зазвичай рік для рішень щодо планування кар'єрів, частіше для рішень щодо планування парку обладнання та рідше для рішень щодо закупівлі обладнання.

План кар'єру визначає як час, так і спосіб переміщення матеріалу протягом стратегічного горизонту часу. Гірничодобувні компанії можуть розглядати тривалі графіки (наприклад, до 50 років) у стратегічному плануванні такого характеру. У цей проміжок часу обладнання для заміни може включати типи, відмінні від початкового вибору, як відображення нових технологій і змін у вимогах до

видобутку. Як правило, термін заміни обладнання досягає приблизно через 5 років для вантажівок і 10–15 років для навантажувачів (залежно від типу та використання). Вантажівки можуть бути обрані з пулу 5–25 типів, тоді як навантажувачі можуть бути обрані з більшого пулу (наприклад, 26 типів навантажувачів) в результаті різних варіантів, включаючи канатні та гідравлічні екскаватори та фронтальні навантажувачі [21].

Гірничі інженери класифікують видобутий матеріал на корисні копали та порожню породу з підкатегоріями, які залежать від якості або сорту корисних копалин.

Транспорт, найчастіше у вигляді самоскидів, транспортують цей матеріал у відвали або до збагачувальних фабрик, що мають обладнання для збагачення, склади та звалища хвостів. Руда очищається на комбінаті, а на складах зберігається додатковий матеріал, щоб гарантувати, що дробарки та млини отримують правильну суміш марок руди відповідно до потреб ринку. Довгостроковий план кар'єру оптимізує терміни розробки таким чином, щоб задовольнити ринковий попит і зменшити собівартість продукції. У плані з оптимізацією форми кар'єру передбачені необхідні показники продуктивності, послідовність уступів і форма кар'єру (включаючи висоту уступів). Висота лави може варіюватися від 4 до 60 метрів (м) і залежить від типу обладнання, яке її відпрацьовує [1-8].

Для переміщення матеріалів на кар'єрах використовують конвеєрний, залізничний та автомобільний транспорт, однак, з досвіду експлуатації відомо, що для великомасштабних відкритого видобутку корисних копалин, є кращим способом транспортування є саме автомобільний транспорт у поєднанні із завантаженням екскаватором. Однак у ролі навантажувальної машини крім екскаватору може виступати і ківшевий навантажувач.

У сучасних кар'єрах у якості навантажувальних машин використовуються (рис 1.2)[1-11]:

- екскаватори
 - канатні;
 - гідравлічні;

– ківшеві навантажувачі.



Рис. 1.2 – Навантажувальне обладнання: а – гідравлічний екскаватор; б - канатні екскаватори; в - фронтальні навантажувачі [24]

Перелічені різновиди навантажувальних машин відрізняються за такими ознаками:

- доступність — частка часу, протягом якого обладнання доступне для роботи [22];
- потреби в технічному обслуговуванні — частка часу, необхідного для загального технічного обслуговування, капітального ремонту та неочікуваного технічного обслуговування [33];
- сумісність з різними типами самоскидів — відповідність навантажувача висоті вантажівки та ковша навантажувача розміру лотка вантажівки [28];
- об'ємна ємність [14];
- вартість одиниці продукції [12].

Ці характеристики впливають на загальне можливе використання навантажувальних машин та парку самоскидів.

Тип навантажувача, обраного для використання в кар'єрі, залежить від типу корисної копалини, що видобувається, і характеристик середовища, наприклад висоти лави. У процесі вибору обладнання також потрібно враховувати інші чинники, зокрема сумісність навантажувачів із обраними парками самоскидів. Наприклад, деякі навантажувачі не можуть дістатися до верхньої частини кузова на великих самоскидів. Навпаки, вантажопідйомність деяких навантажувачів перевищує ємність деяких самоскидів.

Кар'єрні автосамоскиди, які транспортують породу, мають вантажопідйомність, в основному, від 36 до 315 тонн, але можуть бути набагато більшими. Розмір і вартість експлуатації кар'єрних самоскидів прямо пропорційні місткості кузова, тоді як швидкість, з якою вантажівка може рухатися, обернено пропорційна її місткості. Як і у випадку з навантажувачами, різноманіття типів самоскидів відрізняється за їхньою надійністю, вимогами до обслуговування, продуктивністю та експлуатаційними витратами.

Кар'єрне середовище значною мірою впливає на продуктивність самоскиду. Наприклад, тягове зусилля, яке є природним опором ґрунту крутному моменту шини і дорівнює добутку крутного моменту осі колеса на радіус колеса, впливає на рух самоскиду вперед. Виробники надають попередньо розраховані криві тягового зусилля для своїх самоскидів, щоб забезпечити задовільний розрахунок часу циклу самоскиду. Криві тягового зусилля відображають збільшення опору дороги, коли самоскид збільшує швидкість [14].

Крім того, м'якість дорожнього ґрунту створює ефект опору коченню (проти шин самоскиду), що знижує ефективність руху вантажівки вперед. Опір коченню, який суттєво змінюється по дорозі та з часом, як відомо, важко оцінити. Регулярний полив і пресування доріг може контролювати та зменшувати вплив опору коченню. Ухил вантажної дороги, який є нахилом вантажної дороги, може посилити вплив опору коченню та тягового зусилля. Ці параметри, крім пройденної відстані, є вирішальними для точного розрахунку часу циклу вантажівки [19].

Місця завантаження охоплюють будь-яку частину кар'єру, яка є джерелом матеріалу, наприклад місця кар'єрів, де відбуваються первинні виїмки, і склади, де тимчасово зберігається резервний матеріал. Місця призначення включають будь-яке місце, куди можна скинути матеріал, наприклад місця обробки матеріалів (включаючи дробарки), склади та відвали. Однак у проекті кар'єру часто трапляється кілька джерел, пунктів призначення або кар'єрів, і складність тут полягає в тому, що обладнання (зокрема вантажівки) може працювати на будь-якому з суміжних маршрутів цих місць. Оскільки можуть бути доступні кілька місць завантаження з різними вимогами до завантаження, можуть знадобитися

різні типи завантажувачів. Вибраний парк вантажівок має бути сумісним із вантажниками, призначеними для кожного періоду. Ця проблема сумісності є ускладнюючою характеристикою вибору обладнання для кар'єрних робіт, оскільки автопарки вантажівок можуть змінювати призначення завдань від періоду до періоду. Крім того, на момент придбання обладнання може існувати частковий парк, і через заміну окремих моделей після придбання часткового парку або деякі критерії оптимізації це також може призвести до змішаного типу (тобто, різномірні) парки [15].

В результаті підвищення ефективності після технічного обслуговування та капітального ремонту, експлуатаційні витрати обладнання є нелінійними функціями строки служби обладнання (рис. 1.3) [13]. На рис 1.4 позначено зростання експлуатаційних витрат, що відображає збільшення витрат на технічне обслуговування, а значне зниження витрат відбувається, коли проводиться технічне обслуговування, наприклад капітальний ремонт

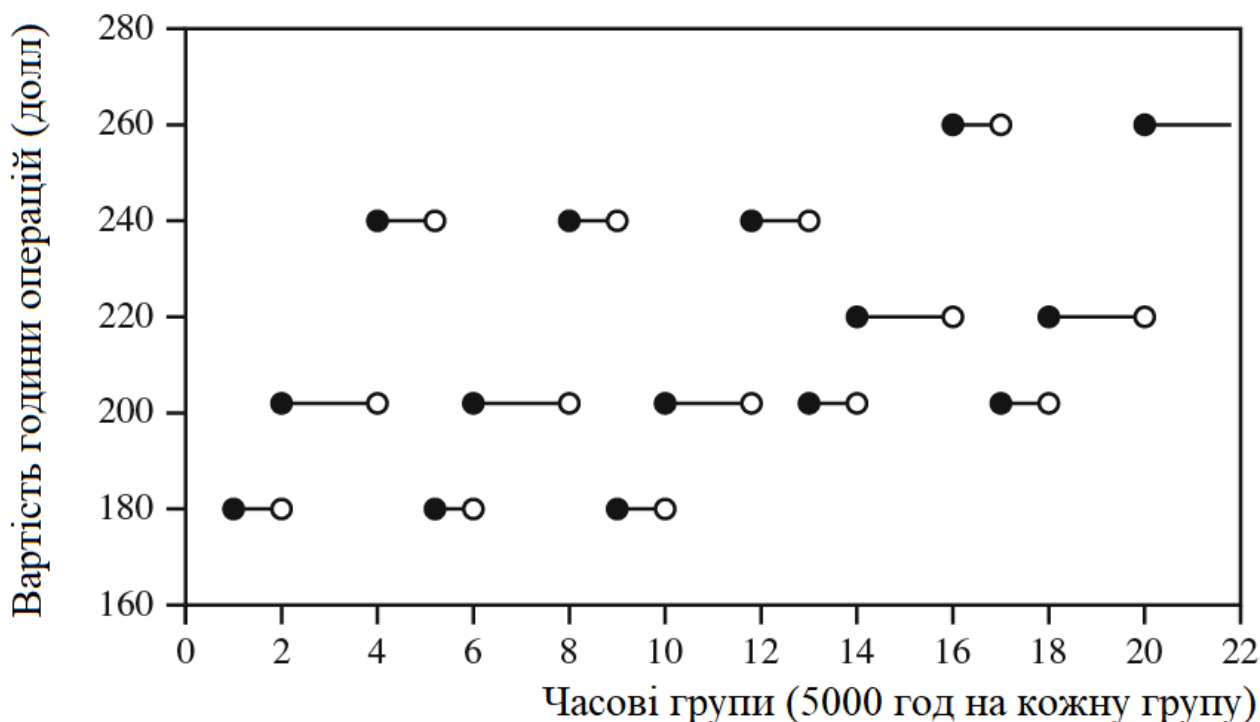


Рис. 1.3 - Дискретизована функція операційних витрат у часі [13].

Продуктивність обладнання також змінюється з часом, зазвичай через технічне обслуговування, капітальний ремонт обладнання, розмір робочого парку та кваліфікацію водіїв. Витрати є невизначеними, тому що вони зазвичай інкапсулюють невизначені процентні ставки, амортизацію та дохід. Наявність невизначеності ускладнює загальну проблему та може призвести до неможливості впровадження політики. Невизначені вхідні дані включають час циклу вантажівки, доступність обладнання, групування вантажівок та ін.

У контексті відкритого гірничого виробництва потрібна достатня кількість обладнання для підтримки очікуваних показників продуктивності, навіть якщо цикл вантажівки довгий, деяке обладнання не працює (на технічному обслуговуванні або сталася незапланована подія).

Оскільки витрати на придбання та експлуатацію гірничого обладнання такі високі — за деякими даними від 40 до 60 відсотків загальних витрат на переробку матеріалів, вибір надійного обладнання є рушійним фактором прибутковості гірничих робіт.

Вхідними даними для вибору обладнання є, як правило:

- довгостроковий графік видобутку, включаючи виробничі вимоги в ряді місць завантаження та скидання;
- набір типів навантажувачів і вантажівок, які можна придбати;
- інформацію про продуктивність обладнання та про те, як вона змінюється, коли обладнання працює з різними типами обладнання;
- інформацію про витрати, включаючи відсотки та амортизаційні ставки, придбання, обслуговування та експлуатаційні витрати.

Результатом вибору обладнання є стратегія або політика закупівель, а також допоміжна інформація, наприклад, як обладнання слід використовувати для виконання визначених завдань. Конкретним прикладом такої допоміжної інформації є графік розподілу робіт для обладнання протягом визначеного періоду.

Проблема вибору обладнання: потрібно розглянути набір усіх стратегій закупівлі вантажівок і навантажувачів, які є, з огляду на період попиту, вимог до балансування продуктивності між вантажівками та навантажувачами та обмежень

сумісності (з навколишнім середовищем і між типами обладнання). Отже, проблема вибору обладнання полягає у виборі політики мінімальних витрат із цього можливого набору.

В ідеалі ця проблему має розв'язуватися у поєднанні з проблемою розподілу обладнання, оскільки спосіб використання обладнання має величезний вплив на вартість і строк служби обладнання.

Вибір обладнання може бути вирішено під час стратегічного планування, у цьому випадку вхідними даними є довгостроковий план видобутку, або пізніше під час видобутку, коли потрібне нове обладнання. В останньому випадку середньострокові графіки виробництва можуть використовуватися, як вхідні дані замість довгострокового плану з більшою роздільною здатністю. У будь-якому випадку вартість експлуатації обладнання залежить від завдань, які має виконувати обладнання. Складність розмірності полягає в зв'язуванні стратегічних і тактичних рішень щодо типів і кількості обладнання, а також часу придбання з рішеннями щодо оперативного планування протягом довгострокового графіка видобутку.

Ця невідповідність у часі між стратегічними, тактичними та оперативними рішеннями помітно впливає на ефективність обраного моделювання та підходу до рішення.

1.2. Аналіз показниками ефективності та стратегій з оптимального вибору обладнання «екскаватор-самоскид»

Розглянемо показники ефективності та стратегії з оптимального вибору обладнання «екскаватор-самоскид»

Існує багато способів розв'язати подібну проблему і кожен має свої переваги і недоліки. Наприклад, використання евристичних або наближених рішень можуть бути ефективними з точки зору обчислень, тоді як точні підходи можуть забезпечити вищий ступінь точності та оптимальності рішення, що прирівнюється до економії або підвищення продуктивності, але будуть дуже складними з точки зору розрахунків.

Час циклу вантажівки фігурує у всіх стратегіях вирішення проблеми вибору обладнання. Інші показники – продуктивність однокішшового навантажувача та коефіцієнта відповідності, що є показниками ефективності, які широко використовувалися через їх простоту та легкість застосування. Додатково до цих параметрів потрібно додати вартість обладнання, щоб отримати модель витрат. Загалом визначення оптимальних схем проводиться за допомогою методів лінійного програмування, цілочисельного програмування та змішано-цілочисельного програмування.

1.2.1. Тривалість циклу самоскиду

Час циклу вантажівки включає час завантаження, час перевезення (повний), час скидання, час повернення (порожній), час черги та під'їзд на навантаження (рис. 1.4).

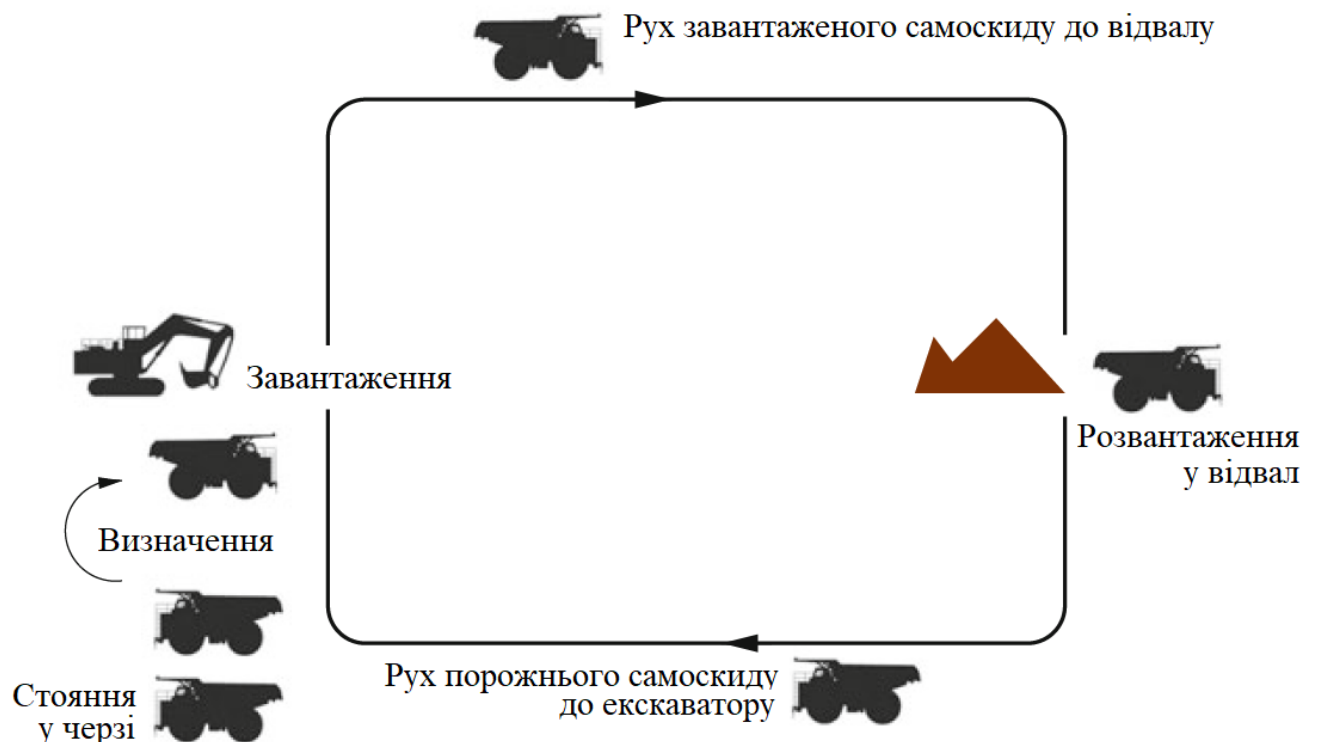


Рис. 1.4 - Цикл самоскиду [24]

Час циклу самоскиду вимірюється від моменту, коли самоскид заповнюється на екскаватором, їде до місця розвантаження, скидає вантаж і їде порожнім до

навантажувача, щоб приєднатися до черги та розташуватися для наступного вантажу. Він включає черги та час очікування на місці розвантаження та біля навантажувача.

Цикл може розпочатися на навантажувачі, де вантажівка отримує вантаж. Потім вантажівка їде до місця розвантаження за визначеним маршрутом. Місцем розвантаження може бути відвал або збагачувальна фабрика. Після скидання вантажу вантажівка розвертається і порожньою повертається до навантажувача, де приєднується до черги вантажівок, які потрібно завантажити. Акт маневрування вантажівки під навантажувачем, який обслуговується, називається спотінгом. Це може зайняти кілька хвилин. У великому кар'єрі загальна тривалість циклу вантажівки може становити близько 20–30 хвилин і може значно змінюватися з часом у міру переміщення відвалів і поглиблення кар'єру. Тривалість циклу також може змінюватися, якщо вантажівка повертається до іншого навантажувача з іншими специфікаціями або повертається до іншого місця розвантаження.

Додатково потрібно враховувати такі параметри кар'єру, як рельєф і опір коченню. Ці параметри суттєво впливають на час циклу вантажівки. Крім того, можна додатково врахувати тягове зусилля, висота підйому та відстань підйому. Однак довжина черги, який виникає в автопарку, залежить від кількості вантажівок, що працюють з кожного навантажувачем. Це ускладнює точну оцінку часу циклу вантажівки.

У промисловості поширеним методом оцінки часу циклу вантажівок є оцінка швидкості вантажівок із використанням інструкцій продуктивності від виробників. Ці рекомендації є результатами моделювання, які враховують потужність двигуна, ефективність трансмісії двигуна, вагу вантажівки, вантажопідйомність, тягове зусилля, а також ухили та умови дороги. Це поєднується з топографічною інформацією, щоб отримати оцінку маршруту транспортування [31].

Рекомендації також слід використовувати в поєднанні з оцінками опору коченню для визначення будь-якої затримки в тривалості циклу. Одні з варіантів - метод визначення оцінки опору коченню.

1.2.2 Продуктивність одноковшового навантажувача

Здатність передбачити продуктивність парку вантажівок і навантажувачів є важливою проблемою для гірничої промисловості, оскільки продуктивність парку невід’ємно залежить від вибору обладнання.

Проблема продуктивності одноковшового навантажувача - підбір обладнання (як за типом, так і за розміром парку), щоб максимізувати продуктивність усього парку на основі коефіцієнту збігу та теорії групування.

Коефіцієнт збігу — це відношення швидкості прибуття вантажівки до часу обслуговування навантажувача, що показує ефективність парку.

Теорія групування вивчає природну дисперсію часу циклу вантажівки через групування швидших вантажівок за повільнішими. Методи визначення продуктивності одноковшового навантажувача включають у рішення як коефіцієнт відповідності, так і ідеї групування. Ці методи використовують багато припущень, значні експертні знання/досвід і покладаються на евристичні методи вирішення для досягнення рішення [20, 25, 28, 32].

1.2.3. Коефіцієнт відповідності

Коефіцієнт відповідності сам по собі є показником продуктивності парку маши. Його можна використовувати для порівняння швидкості прибуття вантажівки та швидкості обслуговування навантажувачем. Цей коефіцієнт не залежить від потужності обладнання та потенційної продуктивності, оскільки також включає час завантаження в цикл вантажівки [18].

Розглянемо залежність, яка визначає відповідну кількість вантажівок M_b , щоб збалансувати потужність навантажувача. Ця формула є відношенням продуктивності навантажувача до продуктивності вантажівки, але оскільки вона використовує потужність обладнання, вона враховує потенційну продуктивність обладнання.

Тобто, якщо навантажувач потенційно вдвічі продуктивніший за обраний тип вантажівки, то потрібні дві вантажівки, щоб збалансувати рівень продуктивності. Нехай c_e позначає потужність обладнання типу $e \in X \cup X'$, а t_e означає час циклу обладнання типу e , де X — набір усіх типів вантажівок, а X' — набір усіх типів навантажувачів. Продуктивність обладнання типу e представлена P_e , а кількість вантажівок типу i у парку дорівнює x , де $i \in X$, типи навантажувачів i' , де $i' \in X'$. Ефективність обладнання позначимо E (відповідає пропорції часу, протягом якого обладнання фактично працює). Таким чином, продуктивність одного навантажувача

$$P_{i'} = \frac{c_{i'} E_{i'}}{t_{i'}} \quad \forall i' \in X', \quad (1.1)$$

Продуктивність цілого вантажного парку представлена:

$$P_i = \frac{c_i E_i x_i}{t_i} \quad \forall i \in X, \quad (1.2)$$

Баланс відповідності самоскидів та навантажувачів

$$M_b = \frac{P_{i'}}{P_i}. \quad (1.3)$$

Час циклу вантажівки визначається, як сума транзитного часу без затримки та включає час транспортування, скидання та повернення.

Слід зазначити, що баланс відповідності (2.3) враховує лише один навантажувач. Це просте співвідношення, яке можна використовувати для того, щоб парки вантажівок і навантажувачів не обмежували можливості один одного. Однак іноді необов'язково, щоб продуктивність парку вантажівок і навантажувачів ідеально відповідала. Простіший варіант співвідношення, званий коефіцієнт відповідності для вантажівки типу i , що працює з навантажувачем типу i' [29] :

$$MF_{i,i'} = \frac{t_{i,i'} x_i}{t_X y_{i'}}, \quad (1.4)$$

де x_i – кількість вантажівок типу i ; y_i – кількість завантажувачів i -го типу; $t_{i,i'}$ – час, витрачений на завантаження вантажівки типу i навантажувачем типу i' ; \bar{t}_x – середній час циклу для вантажівок без урахування часу очікування.

У цьому співвідношенні використовується фактична продуктивність обладнання, а не потенційна продуктивність, і тому досягається результат, відмінний від рівняння (1.3).

Коефіцієнт відповідності – це відношення фактичної швидкості прибуття вантажівки до часу обслуговування навантажувача. Він використовується як індикатор продуктивності, припускається, що час черги та очікування включено до часу циклу.

Коефіцієнт відповідності – це відношення продуктивності навантажувача до продуктивності вантажівки. Низький MF ($< 0,5$) свідчить про те, що навантажувач не працює на повну потужність, тоді як високий MF (> 1) свідчить про те, що парк вантажівок менший, ніж необхідно для підтримки балансу продуктивності між парками вантажівок і навантажувачів.

Враховуючи цю ідею часу циклу, коефіцієнт відповідності 1,0 представляє точку балансу, коли вантажівки прибувають до навантажувача з тією ж швидкістю, що й обслуговуються. Як правило, якщо коефіцієнт перевищує 1,0, це означає, що вантажівки прибувають швидше, ніж їх обслуговують. Наприклад, високий коефіцієнт збігу (наприклад, 1,5) вказує на надмірне перевезення. У цьому випадку навантажувач працює зі 100% ефективністю, тоді як вантажівки повинні стояти в черзі для завантаження.

Коефіцієнт нижче 1,0 вказує на те, що навантажувач може працювати швидше, ніж прибувають вантажівки. У цьому випадку очікується, що навантажувачі чекатимуть на прибуття вантажівок. Наприклад, низький коефіцієнт відповідності (наприклад, 0,5) корелює з низькою загальною ефективністю автопарку, а саме 50%, тоді як ефективність вантажівки становить 100% (рис. 1.5). Це випадок заниження продуктивності вантажівок; під час очікування ефективність навантажувача знижується. На жаль, на практиці теоретичний коефіцієнт відповідності 1,0 може не корелювати з фактичним коефіцієнтом

відповідності 1,0 через групування вантажівок. У цьому сенсі розраховане значення коефіцієнта відповідності є оптимістичним [15, 26, 32].

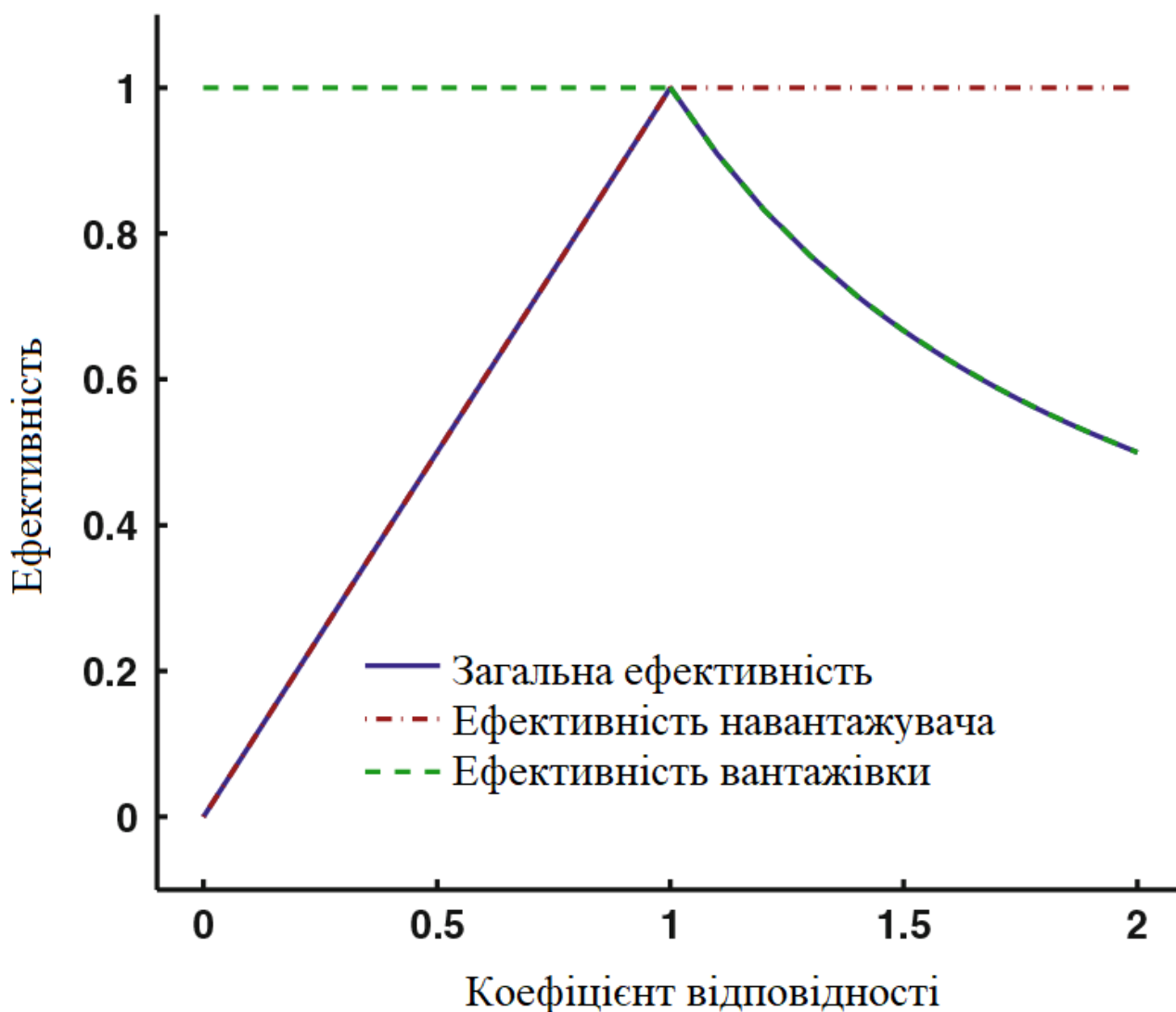


Рис. 1.5 - Коефіцієнт відповідності

Коефіцієнт відповідності використовувався визначення ефективності парку вантажівок або навантажувачів, а в деяких випадках використовувався для визначення відповідної кількості вантажівок для парку. Незважаючи на те, що це співвідношення можна використовувати для визначення показників ефективності або продуктивності, воно не враховує групування вантажівок.

Коефіцієнт відповідності був прийнятий як у гірничодобувній, так і в будівельній промисловості. Однак гірничодобувна промисловість може бути більш зацікавлена в нижчих рівнях коефіцієнта відповідності (що відповідає меншим

автопаркам вантажівок і збільшеному часу очікування для вантажників), оскільки це може корелювати з нижчими експлуатаційними витратами для автопарку. Це може статися, якщо обладнання з більшою продуктивністю, ніж вимагається, може виконувати завдання з меншими експлуатаційними витратами, ніж обладнання, яке повністю відповідає необхідному виробництву.

Коефіцієнт відповідності базується на припущенні, що діючі парки є однорідними. Тобто в загальному автопарку використовується тільки один вид техніки як для вантажівок, так і для навантажувачів. Коли ця формула використовується для визначення розміру парку вантажівок, ця формула ще більше спрощується, припускаючи, що в парку працює лише один навантажувач. Однорідні автопарки бажані для кар'єру, оскільки вони спрощують технічне обслуговування, навчання майстрів і перевезення запасних частин для різних типів обладнання. Однак різнорідні автопарки можуть забезпечити загальну економію коштів.

На практиці змішані автопарки та кілька навантажувачів є звичайними завдяки попередньому обладнанню або оптимальному вибору парку, який мінімізує вартість проекту. Ситуація з уже існуючим обладнанням може виникнути як на початку видобутку, так і тоді, коли необхідний новий вибір обладнання. Це підкреслює потребу у співвідношенні коефіцієнта відповідності, яке можна застосувати до різнорідних парків [28, 30, 32].

1.2.4. Вартість обладнання

Експлуатаційні витрати на гірниче обладнання домінують над загальними витратами на транспортування матеріалів з часом. Зазвичай ці витрати включають технічне обслуговування, ремонт, шини, запасні частини, паливо, мастило, споживання електроенергії та заробітну плату водія в одній оцінці.

Найкращий спосіб обліку експлуатаційних витрат обладнання для видобутку сам по собі є важливою проблемою. Деякі інструменти вибору обладнання використовують методи оцінки вартості життєвого циклу, щоб отримати

еквівалентну вартість одиниці обладнання. Ці витрати оцінюють середні життєві витрати за годину або тонну. Зрозуміло, що це непрактично, якщо розглядати можливість відновлення обладнання, коли воно вже непридатне або досягло кінця свого оптимального циклу заміни. Промисловість покращує оцінку еквівалентної вартості одиниці шляхом масштабування вартості залежно від строку служби обладнання. Тобто, якщо обладнання потребує повного технічного обслуговування при строці служби 25 000 годин, тоді цей діапазон витрат відобразить більші витрати через масштабований коефіцієнт вартості одиниці [23].

Вартість експлуатації обладнання сильно залежить від поточного строку служби обладнання. Тобто вартість тонни визначається продуктивністю. Продуктивність обладнання залежить від наявності обладнання, а доступність обладнання залежить від віку обладнання. На експлуатаційні витрати також може суттєво вплинути просте додавання одного навантажувача до парку навантажувачів. Хоча найбільш очевидною цільовою функцією для моделі вибору обладнання є мінімізація витрат, як функція використання та віку обладнання це додає значної складності до проблеми та має потенціал до нелінійності [23].

Будь-який видобуток корисних копалин є динамічним за своєю природою і може піддаватися значним змінам у плані видобутку. У багатьох випадках план вибору обладнання для багатоперіодного кар'єру може бути визнаний неадекватним, коли ці зміни виявляються. Однак мета інструментів оптимізації полягає в тому, щоб забезпечити найкраще можливе вихідне рішення з урахуванням інформації, доступної на той час. Щоб додати до цього змінного характеру виробничих параметрів, параметри витрат також можуть суттєво змінюватися і самі по собі є оцінками. Зокрема, дані про капітальні витрати, доступні на момент запуску інструменту вибору обладнання, можуть відрізнитися від часу придбання через [23]:

- укладення нових контрактів з відповідними постачальниками;
- покращені історичні дані (накопичені через обладнання, яке раніше було у власності), які можна об'єднати з наданими даними (від виробників обладнання);

- зміна попиту на вживане обладнання або металообробт, таким чином впливаючи на ліквідну вартість частини машини;
- зміни процентних ставок і ставок амортизації, що використовуються для розрахунку чистої приведеної вартості.

Як випливає з назви, чиста поточна вартість — це різниця між грошима, які є зараз, і вартістю цих грошей, якщо вони були інвестовані протягом встановленого періоду часу за певною відсотковою ставкою. У гірничодобувній промисловості це термін, який використовується в більш широкому сенсі для визначення зміни вартості грошей з часом. Це важливо, оскільки в довгостроковому плануванні (яке може бути заплановано протягом 50 років) потрібно мати можливість порівняти вартість рішення, прийнятого зараз, із рішенням, прийнятим у майбутньому. Цього можна досягти досить просто, помноживши витрати на такий вираз:

$$\frac{1}{(1 + I)^t},$$

де I — фіксована процентна ставка, а t — майбутній період часу (кількість років у майбутньому) для порівняння.

Цей вираз називається коефіцієнтом дисконтування, оскільки він дисконтує витрати до теперішнього часу для можливості порівняння. Одним із обмежень цього підходу з точки зору моделювання є те, що набагато зручніше, якщо відоме t , а не змінна в задачі. Це дозволяє просте лінійне формулювання проблеми вибору обладнання. З іншого боку, якби t було змінною, то цей вираз був би нелінійним і призводив би до більш заплутаного формулювання проблеми вибору обладнання.

Використовуючи ці приклади як обґрунтування, немає необхідності розглядати цільову функцію витрат у її найбільш природній і точній формі: нелінійній. Оскільки всі параметри цільової функції самі по собі є наближеннями, цільову функцію можна більш розумно розглядати в кусково-лінійному форматі. Звичайно, у промисловості це звичайна практика, де експлуатаційні витрати, наприклад, вважаються кусково-лінійною функцією вікової категорії, а не нелінійною функцією віку одиниці. Завдяки цим аргументам відносні параметри лінеаризованої цільової функції можна вважати достатньо точними. Використання

даних про вартість оренди є простою альтернативою використанню суміші виробничих витрат, наданих виробником, і реальних даних, але це не завжди можливо або практично.

1.2.5. Лінійна та цілочисельна оптимізація

Задачі оптимізації зосереджені на одній цільовій функції $f(x)$, метою якої є вимірювання якості рішення.

Математичні залежності дивляться на стан системи та її структуру, і, розглядаючи відповідну мету, визначають, як система може перейти в наступний стан [27].

Загальну математичну задачу можна сформулювати так:

$$\begin{aligned} \min \quad & f = c^T x \\ \text{subject to} \quad & Ax \leq b, \end{aligned} \tag{1.5}$$

$$x \geq 0, \tag{1.6}$$

$$x_j \in Z^{\geq 0} \quad \forall j \in J \subset \{1, 2, \dots, i\} | i \leq n. \tag{1.7}$$

Дані рівняння складаються з матриць $c(1 \times n)$, $A(m \times n)$ і $b(m \times 1)$, а також n змінних, значення яких потрібно визначити. Задача лінійного програмування, коли $i = 0$, і задача цілочисельного програмування, коли $i = n$. Якщо цільова функція $f = c^T x^2$, то маємо ситуацію квадратичного програмування.

1.3. Аналіз методів розв'язання проблеми вибору обладнання

У літературних джерелах обговорюються два підходи до вирішення проблеми вибору обладнання [17.]:

- розділити проблему та вирішити кожну секцію послідовно;
- розробити цілісні обчислювальні моделі.

Найпоширенішим підходом у літературі щодо вибору обладнання для кар'єрів є послідовний підхід (наприклад, спочатку оберають тип навантажувача, потім обирають тип вантажівки і, нарешті, визначають розміри автопарку). Однак, спостерігаючи за нещодавніми досягненнями у відповідних дослідженнях математичного програмування, особливо в додатках із подібною структурою задачі, гірничодобувна промисловість може бути в змозі розв'язати більш масштабні, складніші проблеми. Зокрема, ці досягнення можуть відвести планування кар'єрів від послідовного прийняття рішень щодо проблем, які по суті є взаємозалежними, і тому їх слід вирішувати цілісно [17].

Цільова функція з фіксованою оплатою є результатом розгляду рішень щодо купівлі, утилізації та обслуговування за сценарієм мінімізації витрат. Фіксована плата являє собою поступовий (розрізнений) стрибок у цільовій функції і зазвичай є результатом купівлі або інших бінарних рішень. Однак місткість навантажувачів і вантажівок має обмеження. Продуктивність навантажувачів може залежати від сполучення з певними типами вантажівок, а на продуктивність як вантажівок, так і навантажувачів впливає кількість завантажень (ковшів), необхідних для заповнення кузова. Ці фактори, у поєднанні з декількома шляхами потоку, які обладнання може пройти під час транспортування, призводять до проблеми зі структурою, подібною до проблеми багатотоварного потоку з фіксованою ємністю. Проте базова транспортна мережа та транспортна проблема, що виникає, часто дуже прості та складаються з невеликої кількості місць навантаження і відвалів, часто з кількома спільними маршрутами.

Основна проблема полягає у виборі відповідного вантажно-транспортного обладнання. Однак транспортні мережі дуже прості [17].

Проблема вибору методу видобутку — це підхід до вибору обладнання, який ґрунтується на передумові, що умови навколишнього середовища диктують використовуваний метод видобутку, а вибір типу вантажівки та навантажувача інтуїтивно впливає з прийнятого методу видобутку. Щоб спростити завдання вибору обладнання, а також вибору методу видобутку, підходи до вирішення цієї

проблеми зазвичай зосереджуються на виборі правильного методу видобутку для заданих умов.

Область дослідження продуктивності одноковшових навантажувачів зосереджена на оцінці та оптимізації продуктивності парку вантажівок і навантажувачів. Цій підхід, як правило, спирається на уявлення про те, що підвищення продуктивності призводить до скорочення витрат. Однак кількість вантажівок, які виконують завдання з перевантаження матеріалів, впливає на ефективність парку вантажівок. Таким чином, ці методи розширюються простим способом для пошуку можливих рішень для вибору обладнання.

Рішення проблеми вибору методу видобутку є попереднім кроком до вирішення вибору обладнання, за допомогою якого гірничі інженери вибирають відповідний метод видобутку на основі умов навколишнього середовища.

Вибір обладнання пов'язаний з управлінням активами, де пов'язані підпроблеми в цій категорії включають[16]:

- калькуляцію обладнання;
- послідовність виробництва;
- обладнання об'єктів і вибір машин у виробничих системах;
- планування мережі;
- заміна обладнання.

Вивчення подібності між різними проблемами (або структурою, яку вони демонструють) є важливим для адекватного вирішення такої складної проблеми, як вибір обладнання.

Евристичні методи, включаючи калькуляцію життєвого циклу, є найпростішими для реалізації з усіх підходів. Процес вирішення зазвичай також простий для розуміння. З цієї точки зору ці підходи практичні для гірничих інженерів. Практичність є бажаною характеристикою, оскільки кількість параметрів, необхідних для побудови проблеми, і різні часові масштаби рішень роблять проблему надзвичайно складною. Теорія масового обслуговування, штучний інтелект і література з моделювання намагаються вирішити ці складності ефективним і легким для розуміння способом, але їм не вистачає розв'язувальної

здатності, щоб мати справу з кількістю рішень, які повинні бути прийняті в різних часових горизонтах[17].

У літературі перевага точним підходам, зокрема, змішано-цілочисельному програмуванню є очевидною. Це може бути тому, що воно здатне обробляти більш масштабні моделі проблеми, такі як кілька періодів планування та закупівлі, неоднорідність парку та інші складні побічні обмеження. Проте в літературі щодо математичного програмування є багато інструментів моделювання та вирішення, які можуть покращити рішення вибору обладнання. За допомогою точних методів було вирішено багато складних, однаково структурованих і масштабних проблем. Крім того, обчислювальні складні методи, такі як підходи змішано-цілочисельного програмування, можуть ефективно забезпечувати якісні рішення.

Зрозуміло, що література містить дуже широкі визначення проблеми вибору вантажівок та навантажувача для відкритого гірничого виробництва. У деяких дослідженнях типи вантажівок і навантажувачів вибираються детерміновано, а розміри автопарку впливають із виробничих вимог. Розрив між цими двома форматами рішення вказує на еволюцію того, що можна вважати прийнятним визначенням проблеми. Однак у цій проблемі ще можна досягти додаткового прогресу, оскільки невизначеність у вхідних параметрах ще належним чином не врахована. Хоча певна невизначеність може вплинути лише на оптимальність рішення, як-от амортизація, відсоткові ставки та ціни на паливо, інші вхідні дані впливають на реалізацію парку, наприклад, час циклу вантажівки, доступність, групування та мінливість вантажівки. Невизначеність останнього набору параметрів повинна бути розглянута спочатку в нових дослідженнях. Щоб досягти цього за допомогою точного алгоритмічного підходу, проблема та наступна модель повинні контролюватися додатковими методами[17].

Попередня обробка є очевидною перевагою через залежність рішень від попередніх періодів, але слід уникати руйнування структури, яка може бути використана в техніках декомпозиції. Алгоритми апроксимації та евристики можуть отримати хороші початкові рішення, які потім можуть ініціалізувати алгоритм розгалужень і меж, щоб покращити час обчислення. Одним із підходів

може бути зосередження на вирішенні транспортної проблеми, що лежить в основі (за допомогою евристики наближення), а потім зробити висновок про необхідний вибір. Для цього можна використати апроксимаційний алгоритм Бінштока. Альтернативні евристики включають Savelsbergh і Sol і Zhang et al. Табу-пошук і методи на основі агентів також можуть забезпечити хороші вихідні рішення, як у Crainic et al. і van Dam et al [17].

Процедури поділу, доступні в літературі, можуть бути вигідними з точки зору обчислень у підході відгалуження та розрізу. Побудова мінімальних розрізів покриття з обмеження продуктивності (у формі обмеження ранця); розрізи на потоці; множини досяжності на потоці; і зняття обмежень пріоритету може призвести до покращення обчислень.

Розбіжність у точності часу може зменшитися, якщо розклад є циклічним,, хоча це може призвести до значної втрати деталей у моделі.

Найважливішим напрямком майбутніх досліджень є створення надійних рішень. Це може означати врахування невизначених параметрів у процесі моделювання або створення рішень, стійких до малоймовірних подій. Особливо важливим є необхідність врахування невизначеності ключових параметрів. Ще одним потенційним аспектом є включення групування в майбутні підходи до моделювання.

Підсумовуючи, розробка корисних копалин відкритим способом передбачає вилучення великої кількості матеріалу, що потребує обладнання для видобутку та транспортування. 50 років публікацій з цієї проблеми демонструють кольорову та авантюрну колекцію моделювання та підходів до вирішення. Незважаючи на це, в літературі відсутні задовільні надійні рішення. Щоб спрямувати майбутні прикладні дослідження, ми виділили літературу щодо математичного програмування, яка ілюструє досягнення, які можуть допомогти в ефективному вирішенні вибору обладнання [17].

1.4. Мета, об'єкт, предмет, завдання та методи дослідження

Мета роботи - враховуючи графік видобутку, якого необхідно дотримуватися, і набір відповідних самоскидів та екскаваторів, створити інструмент вибору обладнання, який генерує політику закупівлі та утилізації, щоб мінімізувати загальну вартість видобутку сировини.

Об'єкт досліджень – процес видобутку та транспортування системою «екскаватор-самоскид» гірської маси на відкритих гірничих роботах.

Предмет дослідження – параметри системи «екскаватор-самоскид» на відкритих гірничих роботах.

Задачі дослідження

1. Розробка методики коефіцієнтів відповідності парку навантажувачів і вантажівок;
2. Розробка методики для різнорідних парків вантажівок;
3. Розробка методики для різнорідних парків навантажувачів;
4. Застосування методики для планування перевезення з кількома локаціями;
5. Застосування методики для планування перевезення з багатьма локаціями;
6. Вибір оптимального парку обладнання для одного місця;
7. Вибір оптимального парку обладнання для кількох місць.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВИДОБУТИХ МАТЕРІАЛІВ У КАР'ЄРІ

2.1. Методика визначення коефіцієнтів відповідності парку навантажувачів і вантажівок

Гірничодобувна та будівельна галузі давно зацікавлені у визначенні продуктивності та ефективності обраного парку вантажівок і навантажувачів. Один із способів вивчити ефективність парку — порівняти ефективність парку вантажівок і парку навантажувачів.

Коефіцієнт відповідності - це відношення часу прибуття вантажівки до часу на обслуговування навантажувача.

Вищезазначені галузі протягом багатьох десятиліть використовували коефіцієнт відповідності як показник продуктивності.

Коефіцієнт відповідності $MF_{i,i'}$ для вантажівок типу i , що працюють з навантажувачами типу i' , визначається так

$$MF_{i,i'} = \frac{t_{i,i'} \cdot x_i}{\bar{t}_x \cdot x_{i'}} \quad (2.1)$$

де x_i — кількість вантажівок типу i ; $x_{i'}$ — кількість навантажувачів типу i' , $t_{i,i'}$ — час, витрачений на завантаження вантажівки типу i за допомогою навантажувача типу i' ; \bar{t}_x — середній час циклу для всіх вантажівок.

Це співвідношення базується на припущенні, що парки вантажівок і навантажувачів є однорідними. Тобто всі вантажівки одного типу, і всі навантажувачі одного типу. Насправді змішані парки є досить поширеними. Гетерогенні парки можуть виникати, коли типи обладнання списується, обладнання замінюється або просто коли змішаний парк дешевший, ніж однорідний парк. Неоднорідні парки можуть виникати, коли нове обладнання купується для роботи разом із уже наявним обладнанням. Також можливо, що гетерогенний парк може забезпечувати вибір обладнання з мінімальними витратами.

2.1.1. Різномірні парки вантажівок

Розглянемо різномірні парки вантажівок. Найбільш ймовірно, що неоднорідним буде парк вантажівок. Це пов'язано з великою кількістю вантажівок, необхідних для задоволення виробничих вимог, порівняно з відносно невеликою кількістю навантажувачів. Крім того, незважаючи на те, що в кар'єрі часто працюють різні типи навантажувачів, вони часто знаходяться в різних місцях і тому не можуть розглядатися як окремі парки.

Ми починаємо з розгляду швидкості прибуття вантажівок у випадку неоднорідного парку вантажівок з однорідним парком завантажень.

Швидкість прибуття вантажівок A для неоднорідного парку вантажівок з однорідним парком навантажувачів є відношення кількості вантажівок до часу циклу вантажівки:

$$A = \frac{\sum_i x_i}{\bar{t}_x} \quad (2.2)$$

де x_i — кількість вантажівок типу $i \in X$ (де X — множина всіх типів вантажівок), а \bar{t}_x — середній час циклу для всіх типів вантажівок.

На цьому етапі на цей показник не впливає кількість типів вантажівок, оскільки використовується середній час циклу вантажівки. Швидкість обслуговування навантажувача - це кількість вантажівок, які обслуговуються за секунду. Тривалість циклу навантажувача може відрізнятися залежно від типу вантажівки.

Норма обслуговування навантажувача, $D_{i'}$, для навантажувача типу i' визначається як

$$D_{i'} = \frac{x_{i'} \sum_i x_i}{\sum_i t_{i,i'} x_i} \quad (2.3)$$

де x_i — кількість вантажівок типу i ; $x_{i'}$ — кількість навантажувачів типу $i' \in X'$, а $t_{i,i'}$ — час, необхідний для завантаження вантажівки типу i з навантажувача типу i' .

Оскільки коефіцієнт відповідності є відношенням швидкості прибуття вантажівки до часу обслуговування навантажувача, коефіцієнт відповідності для неоднорідних парків вантажівок легко вивести з попередніх залежностей:

$$MF_{i'} = \frac{A}{D_{i'}} = \frac{\sum_i x_i}{\sum_i x_i x_{i'}} = \frac{\sum_i t_{i,i'} x_i}{\sum_i t_{i,i'} x_i} = \sum_i MF_{i,i'} \quad (2.4)$$

Зрозуміло, що якщо в автопарку працює тільки один тип вантажного автомобіля, то рівняння (2.4) дасть той самий результат, що й рівняння (2.1).

Інший спосіб виразити цей коефіцієнт відповідності для різнорідних парків вантажних автомобілів – це додати окремі коефіцієнти відповідності з кожного однорідного підпарку. Альтернативний метод підходить лише для випадку однорідних парків навантажувачів, які працюють із різнорідними парками вантажівок.

Іноді потрібно використовувати унікальний час циклу вантажівки для різних типів вантажівок у автопарку. Це може статися, коли вантажівки мають різні маршрути. Наприклад, коли для перевезення відходів використовується малі вантажівки обладнання, а для перевезення руди – більші вантажівки: відходи та руду можна відправляти в різні місця із значно різною довжиною циклу. Коли використовується індивідуальний час циклу вантажівки, час має бути усередненим, щоб отримати точний коефіцієнт відповідності. Рівняння (2.4) можна легко розширити для врахування унікального часу циклу вантажівки.

Середній час циклу \bar{t}_x визначається як:

$$\bar{t}_x = \frac{\sum_i t_i x_i}{\sum_i x_i} \quad (2.5)$$

де t_i — час циклу для вантажівки типу $i \in X$, а x_i — кількість вантажівок типу i .

Тепер, підставляючи цей новий час циклу вантажівки в рівняння (2.4) маємо наступну залежність.

Для різнорідних парків вантажівок з індивідуальним часом циклу вантажівок коефіцієнт збігу для однорідних парків навантажувачів типу $i' \in X'$ може бути представлений як

$$MF_{i'} = \frac{(\sum_i x_i)(\sum_i t_{i,i'} x_i)}{x_{i'} \sum_i t_{i,i'} x_i} \quad (2.6)$$

2.1.2. Різнорідні парки навантажувачів

Тепер розглянемо різнорідні парки навантажувачів, тобто випадок змішаних навантажувачів у парку, тоді як вантажівки залишаються однаковими за типом.

Час, необхідний для завантаження вантажівки, може бути різним для різних типів навантажувачів.

Коефіцієнт обслуговування навантажувача - це кількість обслужених вантажівок за певний період часу. У різнорідному автопарку час, необхідний для обслуговування вантажівки, може відрізнятися для різних типів навантажувачів.

Коефіцієнт обслуговування навантажувача для неоднорідних парків навантажувачів, що працюють з вантажіркою типу $i \in X$, визначається як

$$D_i = \sum_{i'} \frac{x_{i'}}{t_{i,i'}} \quad (2.7)$$

Норма обслуговування навантажувача - це відношення загальної кількості вантажівок до часу, необхідного для їх обслуговування. Ми маємо $t_{i,i'}$ для кількох типів навантажувачів i' та однієї вантажівки типу i . Кількість вантажівок типу i , обслужених навантажувачем типу i' за час $t_{i,i'}$ становить:

$$\frac{1}{t_{i,i'}} \quad (2.8)$$

Таким чином, загальна кількість вантажівок, обслужених усіма типами навантажувачів за одиницю часу визначається за (2.7).

Коефіцієнт збігу – це відношення швидкості прибуття вантажівки до швидкості обслуговування навантажувача. Норма прибуття вантажівки становить:

$$A_i = \frac{x_i}{t_i} \quad (2.9)$$

Для гетерогенних парків навантажувачів коефіцієнт відповідності для однорідного парку вантажівок типу $i \in X$ дорівнює

$$MF_i = \frac{x_i}{t_i \sum_{i'} \frac{x_{i'}}{t_{i,i'}}} \quad (2.10)$$

Коли в парку працює лише один тип навантажувача, залежність (2.10) зводиться до рівняння (2.1). У випадку кількох місць звалища або маршрутів, рівняння (2.10) можна розширити для врахування різного часу циклу вантажівки. По-перше, середній час циклу вантажівки:

$$\bar{t}_X = \frac{\sum_h t_{i,h} x_{i,h}}{x_i} \quad (2.11)$$

де $t_{i,h}$ — це час циклу для вантажівки типу i на маршруті h ; $x_{i,h}$ — кількість вантажівок типу i , що працюють на маршруті h .

Коефіцієнт збігу для неоднорідних парків навантажувачів, що працюють з вантажівками типу i (з індивідуальним часом циклу вантажівок для вантажівок на маршруті h), можна представити як

$$MF_i = \frac{x_i^2}{\left(\sum_{i'} \frac{x_{i'}}{t_{i,i'}} \right) \left(\sum_h t_{i,h} x_{i,h} \right)} \quad (2.12)$$

Для прикладу обчислимо коефіцієнт збігу гетерогенного парку навантажувачів. У таблиці 2.1 наведено набір обладнання.

Таблиця 2.1 - Приклад різнорідного парку навантажувачів із загальним часом циклу вантажівки

	Обладнання	Місткість (тони)	Тривалість циклу (с)
22	Вантажівка тип А	150	1500
1	Тип навантажувача В	60	35
1	Тип навантажувача С	42	35

Тривалість циклу для навантажувача - це час, необхідний для одного повного змаху ківша. Деяким вантажівкам може знадобитися кілька ківшів, щоб наповнити кузов. Першим кроком є визначення унікального часу завантаження для кожної

вантажівки. Якщо місткість вантажівки не є кратним місткості навантажувача, тоді потрібен ще один ківш, якщо залишилася місткість більше однієї третини розміру ківша навантажувача. Це пояснюється тим, що для переміщення частини ківша потрібно майже стільки ж часу, скільки й для переміщення повного ковша.

Вантажівка типу А та тип навантажувача В: $150/60 = 2,5$, тому потрібні 3 помахи: $3 \times 35 = 105$ секунд.

Вантажівка типу А та навантажувач типу С: $150/42 = 3,6$, тому потрібні 4 помахи: $4 \times 35 = 140$ секунд.

Це дає коефіцієнт відповідності:

$$MF_A = \frac{x_A}{\bar{t}_X \sum_i \frac{x_i}{t_{A,i}}} = \frac{22}{1500 \cdot \left(\frac{1}{150} + \frac{1}{140} \right)} = 0,88 \quad (2.13)$$

Це свідчить про те, що автопарк недовантажений. Якщо бажано мінімально завантажити автопарк, можна було б розумно очікувати, що недостатня кількість вантажівок забезпечить кращі рішення, ніж ідеальна відповідність парків із коефіцієнтом відповідності 1.

Розглянемо парки вантажівок і навантажувачів. Для різнорідних парків вантажівок і навантажувачів враховується час, необхідний кожному навантажувачу для обслуговування наявного парку вантажівок. Це дорівнює сумі кількості вантажівок типу i , помноженої на час, необхідний для обслуговування цього типу вантажівки. Ми називаємо це часом завантаження t_i , для кожного типу завантажувача i' .

Час t_i , необхідний навантажувачу типу i' для обслуговування всього парку вантажівок, дорівнює

$$t_i = \sum_i t_{i,i'} x_i \quad (2.14)$$

Отже, час, необхідний одному навантажувачу для обслуговування однієї вантажівки, становить:

$$\frac{t_i}{\sum_i x_i} \quad (2.15)$$

Норма обслуговування навантажувача для різномірних вантажівок і навантажувачів визначається за формулою

$$D = \sum_i \frac{x_i \sum_i x_i}{t_i} \quad (2.16)$$

Час циклу вантажівки вважається постійним для всього парку вантажівок протягом цього періоду.

Коефіцієнт збігу як для неоднорідних парків вантажівок, так і для навантажувачів можна представити за допомогою

$$MF = \left(\bar{t}_X \sum_i \frac{x_i}{t_i} \right)^{-1} \quad (2.17)$$

Тепер розглянемо швидкість прибуття вантажівок для всього парку

$$MF = \frac{A}{D} = \frac{\sum_i x_i}{\bar{t}_X} \times \frac{1}{\sum_i x_i \sum_i \frac{x_i}{t_i}} = \frac{1}{t_X \sum_i \frac{x_i}{t_i}} \quad (2.18)$$

Якщо є унікальний час циклу вантажівки, рівняння (2.18) можна легко розширити до:

$$MF = \frac{1}{\sum_i \frac{x_i}{t_i}} \sum_{i \in I} \frac{x_i}{t_{i,I} x_{i,I}} \quad (2.19)$$

де $t_{i,I}$ — унікальний час циклу вантажівки для вантажівок у підмножині $I \in X$.

Знайдемо вираз, еквівалентний рівнянню. (2.18), але це може бути простіше реалізувати в електронній таблиці, спочатку спостерігаючи, що швидкість обслуговування завантажувача може бути представлена таким виразом (де Π позначає продукт):

$$D = \frac{\sum_i x_i \sum_i x_i \prod_{h \neq i} (t_{i,h} x_i)}{\prod_{i,i'} (t_{i,h} x_i)} \quad (2.20)$$

Коефіцієнт збігу як для неоднорідних парків вантажівок, так і для навантажувачів можна представити за допомогою

$$MF = \frac{\prod_{i,i'} t_{i,i'} x_i}{\prod_{h \neq i} (t_{i,h} x_i) \sum_i x_i \bar{t}_X} \quad (2.21)$$

Розглянемо приклад, де визначається коефіцієнт відповідності різнорідного парку вантажівок і навантажувачів. Таблиця 1.2 представляє набір даних.

Таблиця 1.2 - Приклад даних для неоднорідного парку вантажівок і навантажувачів із загальним часом циклу вантажівки

	Обладнання	Місткість (тони)	Тривалість циклу (с)
15	Вантажівка тип А	150	1500
7	Вантажівка тип В	230	1500
1	Тип навантажувача С	60	35
1	Тип навантажувача D	38	30

Вантажівка типу А та навантажувач типу С: $150/60 = 2,5$, тому потрібно 3 зачерпування: $3 \times 35 = 105$ секунд

Вантажівка типу А та навантажувач типу D: $150/38 = 3,9$, тому потрібно 4 зачерпування: $4 \times 30 = 120$ секунд

Вантажівка типу В і навантажувач типу С : $230/60 = 3,8$, тому потрібно 4 зачерпування: $4 \times 35 = 140$ секунд

Вантажівка типу В і навантажувач типу D: $230/38 = 6,1$, тому потрібно 6 зачерпування: $6 \times 30 = 180$ секунд

Розраховуємо час завантаження, t_i , для кожного навантажувача типу i' .

$$t_C = 15 \times 105 + 7 \times 140 = 2555$$

$$t_D = 15 \times 120 + 7 \times 180 = 3060$$

$$MF = \frac{1}{\left[\frac{1}{2555} + \frac{1}{3060} \right] \times 1500} = 0,928$$

Це рішення близьке до теоретичного ідеального збігу 1.0. Це хороший результат з точки зору загальної ефективності та продуктивності автопарку. Однак слід пам'ятати, що вартість не враховується при визначенні коефіцієнта відповідності, тому можливо, що парк буде дешевшим в експлуатації, навіть якби коефіцієнт відповідності був нижчим.

2.2 Приклад перевезення з кількома локаціями

Метою моделювання є розробка математичної моделі оптимального вибору обладнання парку вантажівок і навантажувачів для залізорудного кар'єру, що працює за спрощеною системою перевезення вантажівок-навантажувачів.

Спрощена схема транспортування передбачає лише дві локації для видобутку та дві локації для постачання. Кожна локація видобутку постачає руду, яку потрібно доставити на дробарну фабрику, а пусту породу потрібно доставити у відвал. На рис 2.1 наведено два місця видобутку та чотири маршрути, які з'єднують їх із відвалом та збагачувальною фабрикою.

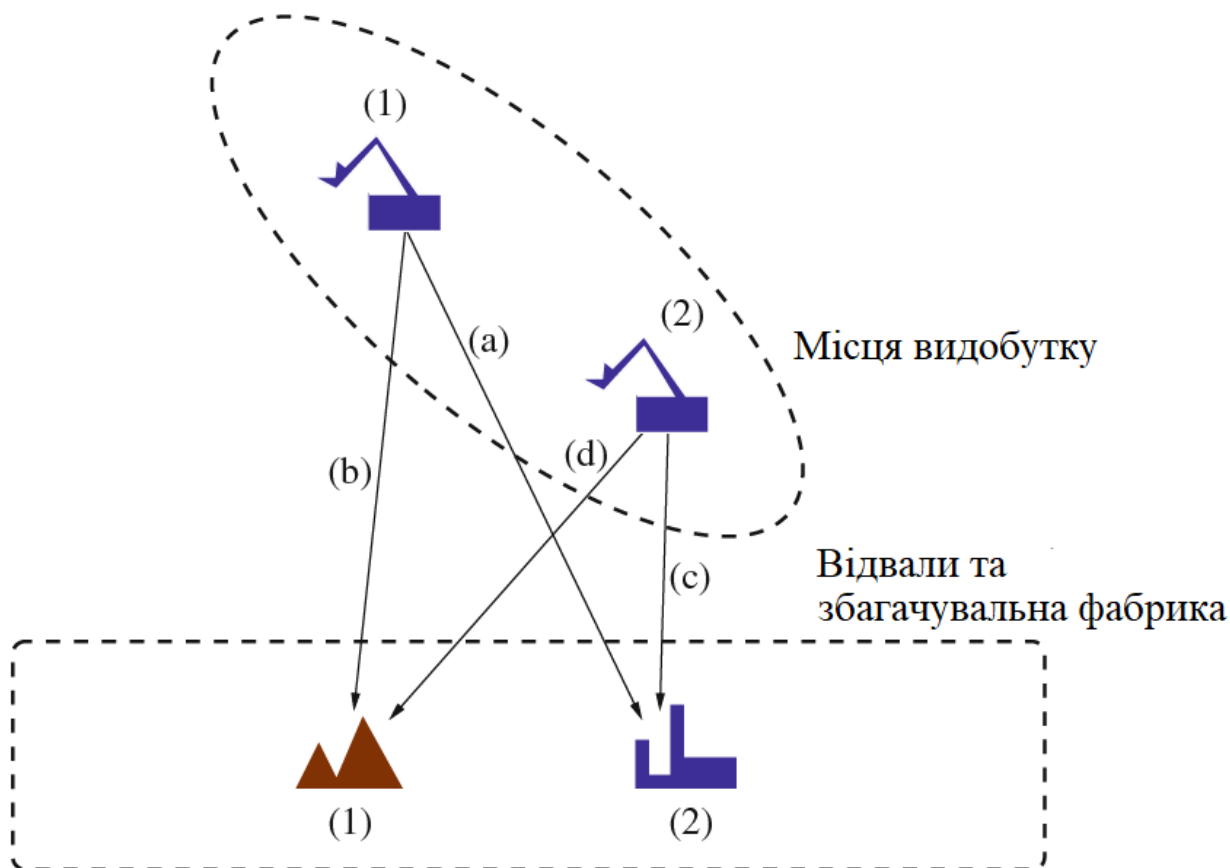


Рис. 2.1 - Спрощена схема транспортування

У прикладі розглядається кар'єр, який працює за системою перевезення вантажівок та навантажувачем і видобуває руду та пусту породу. Для цього прикладу $K = 9$ періодів, кожен з яких триває 1 рік. Цей кар'єр простий з точки зору

кількості місць для видобутку. Загальні потреби у виробництві різко змінюються в міру видалення розкривних порід і збільшення маршрутів (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 - Вимоги до виробництва для маршрутів для моделі з кількох місць

Маршрут	Період								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(a)	51701	668713	1602777	1463289	2227402	1657740	2031283	2230192	2474503
(b)	2082800	8843227	7294449	5837564	5356417	8051374	4582733	4666783	2001808
(c)	0	0	1189184	1120125	337101	1073245	1106596	455511	235810
(d)	0	9412391	9063476	10593225	11355932	4091566	530276	84354	94315
Разом (МТ)	2,13	18,92	19,14	19,01	19,27	14,87	8,25	7,43	4,80

Пояснення маршрутів

- (a) Місце видобутку (1) до комбінату
- (b) Місце видобутку (1) до місця відвалу (1)
- (c) Місце видобутку (2) до комбінату
- (d) Місце видобутку (2) до місця звалища (1)

Наприклад, у першому періоді потреби у виробництві становлять лише 2,13 мільйона тон. Це зросте приблизно до 19 мільйонів тон протягом наступних 3 років.

Розрахунковий час циклу вантажівки також демонструє велику мінливість від періоду до періоду та між місцями (Табл. 2.4).

Таблиця 2.4 - Час циклу вантажівки (хвилини) для прикладу з кількома місцями

Період	Маршрут			
	(a)	(b)	(c)	(d)
1	8,24	2,64	0	0
2	8,3	3,48	0	8,24
3	9,28	3,84	5,74	10,23
4	10,52	4,88	8,73	10,45
5	11,16	6,01	10,38	12,6
6	12,47	7,23	11,71	16,72
7	12,05	8,49	13,82	19,6
8	15,77	10,11	15,49	21,37
9	17,74	12,05	16,52	22,82

Наприклад, найменший час циклу вантажівки становить 2,64 хв, а найдовший — 22,82 хв.

Специфічні параметри для конкретного випадку

- Кар’єр вилучає руду та порожню породу та працює за системою навантажувач-вантажівка.
- Кар’єр працює 7604 год в кожному періоді (з урахуванням вибухових днів, святкових та інших неробочих днів).
- Навантажувачі вибираються з набору з 20 типів навантажувачів.
- Вантажівки вибираються з набору з 8 типів вантажівок.
- Всього $K = 9$ періодів, кожен тривалістю 1 рік.
- Довжина діапазону витрат, B_0 , становить 5000 год.
- Процентна ставка на всі періоди становить 8%.
- Норма амортизації встановлена 50%.
- Максимальне значення для будь-якої змінної вантажівки становить 30, тобто максимум 30 вантажівок даного типу в будь-якій віковій групі за будь-який період.
- Максимальне значення для будь-якої змінної завантажувача становить 10, тобто максимум 10 завантажувачів певного типу в будь-якій віковій групі за будь-який період.

2.3 Приклад перевезення з багатьма локаціями

Метою моделювання є застосування математичної моделі оптимального вибору обладнання парку вантажівок і навантажувачів для залізорудного кар’єру, що працює за складною структурою маршруту.

Кар’єр у такому випадку має вісім місць завантаження — чотири місця видобутку та чотири відвали, як показано на рис. 2.2.

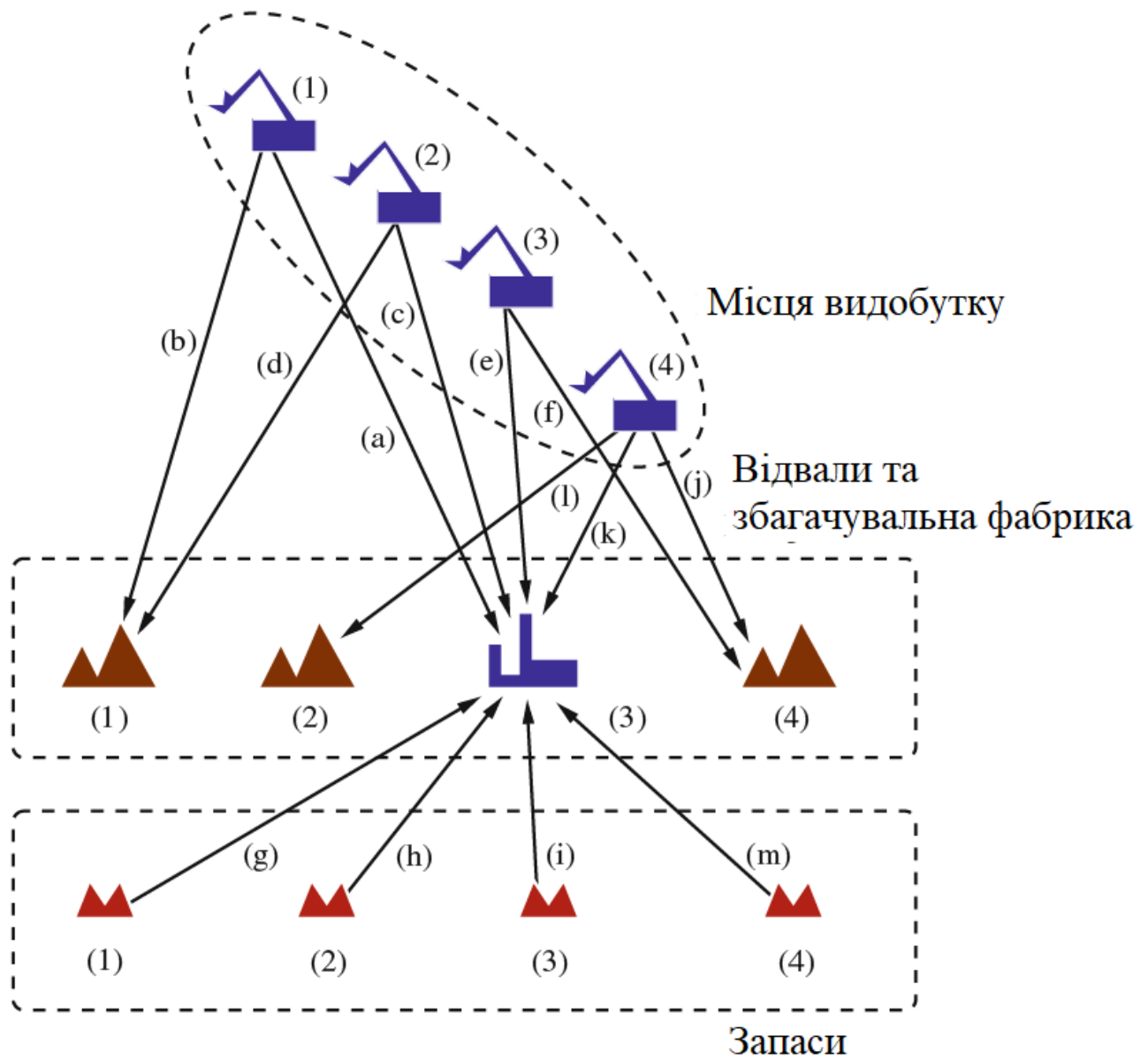


Рис. 2.2 - Маршрути від місць видобутку до місць звалищ для прикладу з багатьох місць

Обмеження змішування — це кількість різних сортів руди, необхідна для створення кінцевого сорту. Зазвичай кінцева оцінка визначається ринковим попитом. Обмеження змішування не враховуються в цій моделі, оскільки передбачається, що вони попередньо оптимізовані під час розробки плану кар'єру. Є чотири склади, в тому числі одна збагачувальна фабрика. З'єднують ці місця видобутку, відвали та склади загалом 13 маршрутів (код маршруту наведено в таблиці 2.5).

Таблиця 2.5 - Виробничі потреби (в тонах) для маршрутів вантажівок для 13-періодного аналізу багатьох місць.

Маршрут	Період												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
(a)	2598	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(b)	455	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(c)	203	10141	7659	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(d)	741	7060	2964	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(e)	221	827	5928	12797	9919	0	0	0	13990	13990	13990	5184	11
(f)	2592	22935	41035	26948	19873	0	0	0	8901	18191	12589	5572	32
(g)	0	650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(h)	0	270	809	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(i)	0	1142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(j)	0	0	0	737	4071	12990	12890	13990	0	0	0	7713	0
(k)	0	0	0	17051	24126	8984	8583	12836	0	0	0	6251	0
(l)	0	0	0	0	0	799	0	0	0	0	0	0	0
(m)	0	0	0	0	0	0	798	0	0	0	0	0	0

Ключ для маршрутів

Звалище (3) — це млин — ми розглядаємо його як звичайне звалище

- (a) Місце видобутку (1) до місця відвалу (3)
- (b) Місце видобутку (1) до місця відвалу (1)
- (c) Місце видобутку (2) до місця звалища (3)
- (d) Місце видобутку (2) до місця відвалу (1)
- (e) Місце видобутку (3) до місця звалища (3)
- (f) Місце видобутку (3) до місця відвалу (4)
- (g) Запас (1) до місця звалища (3)
- (h) Запас (2) до місця звалища (3)
- (i) Запас (3) до місця звалища (3)
- (j) Місце видобутку (4) до місця відвалу (1)
- (k) Місце видобутку (4) до місця відвалу (2)
- (l) Місце видобутку (4) до місця відвалу (3)
- (m) Запас (4) до місця звалища (3)

Таблиці 2.5 і 2.6 описують кількість матеріалу (в тонах), який необхідно перемістити з кожного місця до кожного місця звалища. Наш галузевий партнер також надав попередньо розрахований час циклу вантажівки для кожного маршруту, представлений у таблиці 2.7.

Таблиця 2.6 - Виробничі потреби (в тонах) для місць видобутку для 13-періодного дослідження багатьох місць

Маршрут	Період												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
M(1)	3053	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M(2)	944	17201	10624	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M(3)	2813	23762	46963	39746	29792	0	0	0	22891	32181	26579	10756	43
M(4)	0	650	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S(1)	0	270	809	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S(2)	0	1142	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
S(3)	0	0	0	17789	28197	22773	21474	26826	0	0	0	13964	0
S(4)	0	0	0	0	0	0	798	0	0	0	0	0	0

Ключ для місць

M(i) Місце видобутку i

S(j) Запас j

Графік виробничих потреб для кар'єру за всі періоди наведено на рис. 2.3.

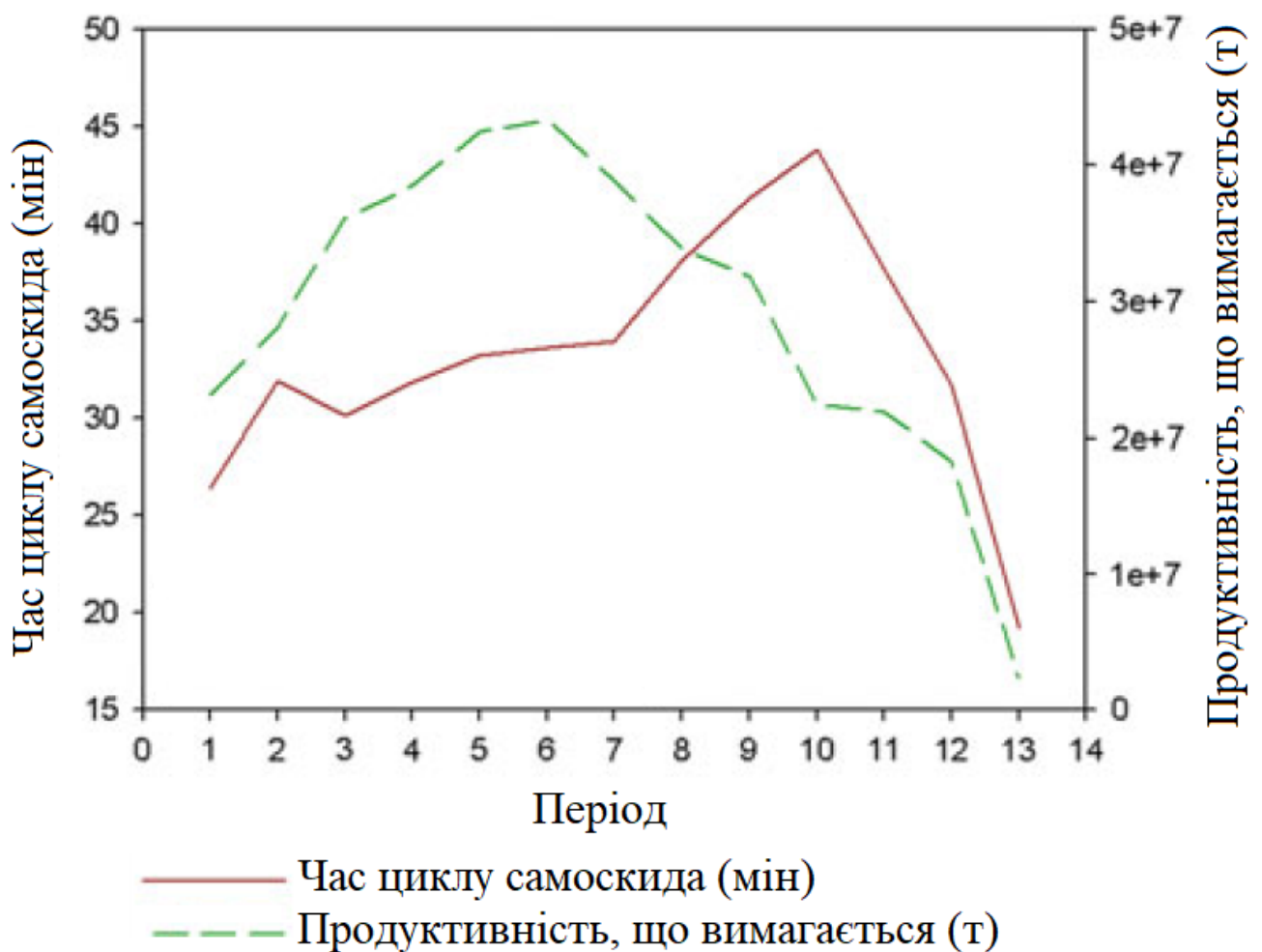


Рис. 2.3 - Виробничі вимоги та час циклу вантажівки для 13-періодного прикладу з багатьма місцями

Таблиця 2.7 Тривалість циклу вантажівки для прикладу з 13 періодів у багатьох місцях

Період	Маршрут												
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)	(h)	(i)	(j)	(k)	(i)	(m)
1	35.56	35.17	38.49	37.89	11.23	10.62	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2	0.0	0.0	38.03	37.42	14.97	17.23	16.05	60.00	20.00	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	40.09	40.77	25.02	22.08	0.0	60.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	27.18	25.09	0.0	0.0	0.0	34.39	34.27	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	28.58	26.25	0.0	0.0	0.0	26.57	27.38	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	32.20	33.51	37.43	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	34.48	35.71	0.0	15.00
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	37.66	38.76	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	32.64	29.41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	36.42	32.47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	38.53	36.49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	43.54	43.57	0.0	0.0	0.0	39.52	46.67	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	46.93	45.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Таблиця 2.8 - Попереднє обладнання для другого прикладу

ID обладнання	L_7^p	L_7^p	L_{17}^p	T_{12}^p	T_{12}^p	T_{12}^p
Кількість	1	1	1	3	2	6
Ємність, т	34	34	42	172	172	172
Термін, рік	16	17	16	7	8	11

Попереднє визначене обладнання кар'єру, переліченого в таблиці 2.8, яке включає одинадцять 172-тонних вантажівок різного віку в годинах; і три навантажувачі, а саме два гідравлічні екскаватори по 34 тони та один гідравлічний екскаватор по 42 тони.

Специфічні параметри:

- Кар'єр працює 7604 години в кожному періоді (з урахуванням днів вибухових робіт, свят та інших неробочих днів);
- Навантажувачі вибираються з набору з 20 типів навантажувачів;
- Вантажівки вибираються з набору з 8 типів вантажівок;
- Розділ витрат, V_0 , становить 5000 год;
- Графік розрахований на 13 років;
- Ставка дисконту для всіх періодів становить 8% (приблизна процентна ставка, яку можна отримати за інвестиціями).

Параметри розрахунку:

- Є К=13 періодів, кожен тривалістю 1 рік;
- Норма амортизації встановлюється на рівні 50% (ставка 40–60% є загальною для цього застосування через ненадійність на ринку вживаного обладнання);
- Максимальне значення для будь-якої змінної вантажівки становить 30, тобто максимум 30 вантажівок даного типу в будь-якій віковій групі за будь-який період;
- Максимальне значення для будь-якої змінної завантажувача становить 10, тобто максимум 10 завантажувачів певного типу в будь-якій віковій групі за будь-який період.

Таблиця 2.9 - Сумісність вантажівок з навантажувачами

Типи вантажівок	Типи навантажувачів																											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
1	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0
2	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	
3	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
4	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
5	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0
6	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0
21	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0
22	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1

Таблиця 2.10 - Наявність вантажівок і навантажувачів для кожної вікової категорії
5000 год

Вікова група											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Електрична канатна лопата	0.9	0.9	0.9	0.9	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	
Гідравлічна лопата	0.9	0.9	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84	0.82	0.8	
Фронтальний навантажувач	0.9	0.88	0.86	0.84	0.82	0.85	0.83	0.81	0.79	0.8	
Вантажні автомобілі	0.92	0.92	0.91	0.91	0.9	0.9	0.89	0.89	0.885	0.881	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Електрична канатна лопата	0.83	0.82	0.81	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
Гідравлічна лопата	0.78	0.76	0.74	0.72	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Фронтальний навантажувач	0.78	0.76	0.74	0.72	0.7	0.68	0.66	0.64	0.62	0.6	0.58
Вантажні автомобілі	0.877	0.873	0.869	0.865	0.861	0.857	0.853	0.849	0.845	0.841	0.837

Матриця сумісності наведена в таблиці 2.9 для всіх типів обладнання, де 0 означає, що тип вантажівки несумісний із навантажувачем, а а1 означає, що пара сумісна. Наявність обладнання за віковими категоріями наведено в таблиці 2.10.

Висновки до розділу 2

1. Для гірничодобувної промисловості коефіцієнт відповідності є важливим індикатором ефективності, який було розширено для кількох ймовірних обставин, включаючи неоднорідні парки вантажівок і навантажувачів із кількома маршрутами. Коефіцієнт відповідності можна використовувати для оптимізації часу циклу вантажівки з метою отримання максимальної ефективності від вибраного парку. Крім того, керівники проектів можуть використовувати формулу коефіцієнта відповідності, щоб визначити ідеальну кількість вантажівок у автопарку. Розроблені залежності, менш обмежені у виборі обладнання, дозволяють обирати змішані парки відповідно до вимог продуктивності та мінімізують витрати на транспортування матеріалів.
2. Встановлено, що коефіцієнт відповідності виключає час очікування та черги для вантажівок і навантажувачів. Це може бути тому, що час очікування парку вантажівок важко оцінити, попередньо не знаючи розміру парку вантажівок. Однак, якщо використовується коефіцієнт відповідності як індекс загальної ефективності парку, тоді прийнятно включати час очікування, який було оцінено іншими методами.
3. Розроблено залежності, що забезпечують більшу точність у випадках, коли змішані парки працюють разом, та які можна легко реалізувати в програмному забезпеченні для роботи з електронними таблицями.

3. ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ПАРКІВ ОБЛАДНАННЯ КАР'ЄРІВ

3.1. Вибір обладнання для одного місця

На основі розробленої математичної моделі проведемо вибір обладнання, вантажівки та навантажувачі для простого багатоперіодного кар'єру за мінімальних витрат. Кар'єр у цьому випадку має лише одну видобувну ділянку з єдиним маршрутом до одного відвалу (рис. 3.1).

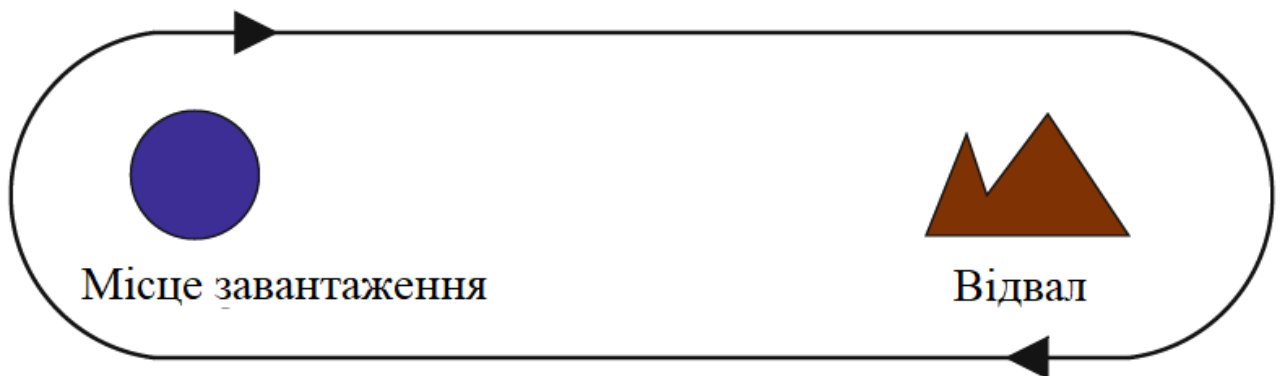


Рис. 3.1 - Спрощена модель кар'єру з одним розташуванням, одним відвалом і маршрутом, що з'єднує обидва

Обмежуючи модель одним місцем, узагальними вимоги до продуктивності для кар'єру лише в одному місці. Таким чином, ця модель є найбільш корисним інструментом для невеликих кар'єрів або для кар'єрів, де немає суттєвої різниці в місцях видобутку та довжині маршруту. Її також можна використовувати як інструмент для більших і складніших сценаріїв видобутку, де можна шукати наближене рішення для великої кількості періодів за відносно короткий час обчислень.

Потрібно врахувати всі часові періоди в розкладі видобутку, щоб переконатися, що вибраний парк зможе впоратися з довгостроковими змінами, а не просто задовольняти короткострокові вимоги. На додаток до цього допускається вже наявне обладнання. Через динамічну природу кар'єрів і наступні вимоги до них, як правило, графік видобутку суттєво змінюється лише через кілька років.

Коли це станеться, може знадобитися повторно вибрати обладнання. У цьому випадку буде значна кількість уже існуючого обладнання, деяке з якого може бути списано або замінено кращим обладнанням. Це також означає, що кар'єр може мати неоднорідні парки.

Крім закупівлі техніки, також розглядається закупівлю техніки з двох причин.

По-перше, кар'єри часто працюють довше, ніж стандартний строк служби обладнання. Таким чином, можна очікувати, що доведеться вивести з експлуатації частину обладнання протягом графіка. Зокрема, існуюче обладнання вже може бути близьким до списання.

По-друге, графіки видобутку іноді мають значні зміни у вимогах до продуктивності від періоду до періоду. Потрібно визначити, чи краще купувати обладнання в короткостроковій перспективі, щоб задовольнити підвищені потреби, чи орендувати обладнання в пікові періоди. Дозвіл на закупівлю дозволяє це дослідити.

Таким чином потрібно розробити цілочисельну програму з такими функціями:

- включення попередньо існуючого обладнання та різнорідних парків;
- багатоперіодний графік видобутку;
- лінійні обмеження сумісності, що забезпечують задоволення вимог продуктивності;
- калькуляція, яка розподілена на вік обладнання (відповідно до галузевих стандартів).

Багато аспектів представленої моделі, наприклад розгляд кількох періодів і вже існуючого обладнання, є новими для гірничодобувної промисловості та гарантують, що модель є як новим, так і передовим інструментом вибору обладнання.

Розглянемо модель. Вантажівки та навантажувачі надходять лише в окремих кількостях, тому їх доречно відстежувати за допомогою цілочисельних змінних. Цільова функція витрат може бути лінеаризована шляхом ретельного визначення змінних індексів, а обмеження продуктивності природно лінійні.

Тому задачу вибору обладнання для відкритих кар'єрів найкраще виразити як чисту цілочисельну програму.

Припущення та умови, щоб зробити модель розв'язною:

- Відомий графік видобутку — прийнятний розклад видобутку вже отримано, а метод видобутку вибрано. Процес підбору обладнання починається з набору вантажівок і навантажувачів, які підходять для кар'єру .
- Єдине місце видобутку — усі навантажувачі та вантажівки працюють як один парк. Тобто всі навантажувачі працюють в одному місці, і всі вантажівки можуть обслуговувати будь-які навантажувачі (за умови сумісності).
- Ліквідація — все обладнання підлягає ліквідації на початку кожного періоду за деякою амортизованою вартістю початкових капітальних витрат. Будь-яке наявне обладнання може бути закуплене на початку першого періоду.
 - Відсутність допоміжного обладнання — не розглядаємо допоміжне обладнання, таке як колісні навантажувачі та малі вантажівки. Хоча вартість експлуатації допоміжного обладнання може відрізнитися залежно від загального вибору парку, вважаємо цю вартість незначною. Вартість допоміжного обладнання при необхідності можна включити до складу операційних витрат.
- Відомі години роботи — години роботи шахти оцінюються з урахуванням запланованих простоїв, вибухових робіт і погодних умов.
- Час циклу вантажівки — це час, необхідний для того, щоб вантажівка була завантажена матеріалом, проїхала до місця звалища, скинула матеріал і повернулася до навантажувача для черги. Оскільки припускаємо одне місце видобутку, для всіх вантажівок використовується один цикл вантажівки. Тривалість циклу постійна протягом періоду часу і відома для всіх періодів. Він враховує фактори, які впливають на продуктивність вантажівки, такі як тягове зусилля, опір коченню, відстань під час перевезення та висоту підйому.
- Різні парки — різні типи обладнання можуть працювати пліч-о-пліч.

- Утримання автопарку — зберігаємо все обладнання на кінець останнього періоду.
- Повний період використання — все обладнання повністю використовується протягом усього періоду, протягом якого воно перебуває у власності.

Тривалість періоду часу, який використовується в моделі, можна налаштувати на будь-яку бажану тривалість, але для цілей прикладу ми встановили її на один рік.

Визначимо змінні рішення та позначення.

Нехай набір усіх типів вантажівок буде X , а набір усіх типів навантажувачів буде X' ; i та i' - позначення одного типу вантажівок та навантажувачів відповідно. Щоб спростити позначення, коли вирази застосовуються як до вантажівок, так і до навантажувачів, використовуємо e для представлення одного типу (який може бути типом вантажівки або навантажувача), де $e \in X \cup X'$.

Припустимо, що є K періодів, M типів вантажівок і N типів навантажувачів з максимальним віком L . Наступна модель генерує не більше $2(MKL + NKL) + K(2N - 1)$ змінних.

Розглянемо питання придбання парку та операційні змінні. Для цього формулювання потрібно охопити кількість експлуатаційного обладнання, типи, вік і періоди, протягом яких воно працює. Приймаємо три індекси для представлення типу (e), періоду (k) і віку в кількості періодів з моменту придбання (l). Індекс e витягується з набору всіх доступних типів обладнання, $X \cup X'$; індекс k витягується з множини всіх періодів, $\{1, \dots, K\}$; а індекс l витягується з вікового діапазону обладнання типу e (який може суттєво відрізнятися між типами). Тоді $x_e^{k,l}$ - кількість одиниць обладнання типу e , які мають вік l на початку періоду k .

Використовуємо змінні ліквідації, щоб визначити, коли обладнання було ліквідовано. Ці змінні визначаються подібно до робочих змінних:

$s_e^{k,l}$: кількість одиниць власного обладнання типу e віком l , яке було ліквідовано на початку періоду k .

Змінні індикатора сумісності для набору обмежень сумісності, яка гарантує, що або парк вантажівок відповідає рівням продуктивності навантажувача, або парк вантажівок відповідає вимогам продуктивності кар'єру h_A^k : змінний індикатор для задоволення або продуктивності навантажувача, або продуктивності кар'єру за період k для вантажівок, сумісних із набором навантажувачів $A' \subset X'$.

Ця змінна матиме значення 1, якщо активне обмеження продуктивності кар'єру, і значення 0, якщо активне обмеження продуктивності навантажувача.

У гірничодобувній промисловості життєздатність кар'єру залежить від ефективності обладнання та його здатності задовольняти виробничі потреби з найменшими можливими витратами. Тому ми розглядаємо цільову функцію як вартість обробки матеріалів. Точніше, нас цікавить чиста поточна вартість (NPV) витрат на транспортування матеріалів протягом усього терміну служби кар'єру. Ми розглядаємо капітальні витрати, операційні витрати та ліквідаційну вартість обладнання з урахуванням ставки дисконтування I .

По-перше, розглядаємо капітальні витрати, які є одноразовими витратами, пов'язаними з придбанням. Представляємо фіксовану вартість придбання обладнання типу e через F_e і дисконтуємо цю покупку до теперішнього часу за допомогою дисконтного коефіцієнта:

$$D_1^k = \frac{1}{(1+I)^k} \quad (3.1)$$

де k - період, в якому було придбано обладнання. 0 - теперішній час.

Зростання експлуатаційних витрат відображає збільшення витрат на технічне обслуговування з часом. Великі падіння експлуатаційних витрат відбуваються після проведення капітального ремонту

Причому існуюче обладнання не несе капітальних витрат, оскільки воно було придбано в період, який не враховується в цьому горизонті оптимізації. Таким чином, загальні капітальні витрати на вантажівку або навантажувач типу e дорівнюють

$$\sum_{e,k} F_e D_1^k x_e^{k,0} \quad (6.2)$$

Операційні витрати – це витрати на експлуатацію та обслуговування обладнання. Вони враховують різні витрати на технічне обслуговування, рівень доступності та продуктивності, які, як відомо, змінюються залежно від віку обладнання. У гірничодобувній промисловості типово нелінійні експлуатаційні витрати спрощуються шляхом створення покроково лінійного апроксимування, який розділений на вікові категорії (рис. 3.2).

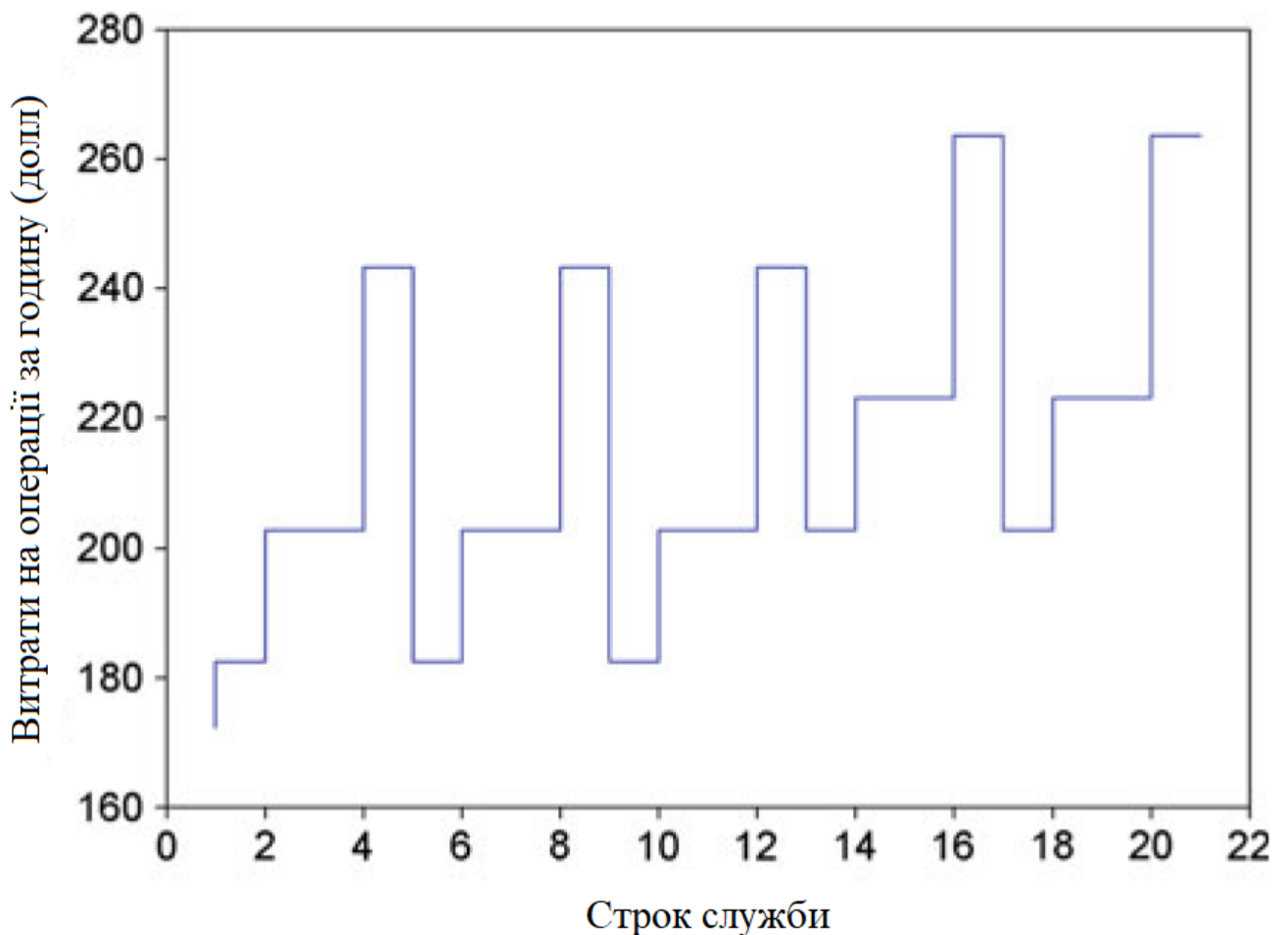


Рис. 3.2 - Експлуатаційна вартість обладнання залежно від вікової категорії.

Вікова група, в якій обладнання знаходиться на початку періоду, визначається як $b(l) \in \{0, 1, \dots, s - 1\}$, де s є загальним віком дужки. Нехай H^k — години роботи для періоду k , а $a_e^{k,l}$ — наявність обладнання типу e , віком l .

Наявність обладнання - це частка періоду, протягом якого обладнання доступне для роботи.

Вікова група для періоду k обчислюється так:

$$b(l) = \frac{\sum_{h=k-l}^{k-1} a_j^{k,l+n-k} H^n}{B_0} \quad (3.3)$$

Ми припускаємо, що експлуатаційні витрати є постійними протягом вікової групи, тому, якщо одиниця обладнання переміщується в іншу вікову групу протягом періоду, експлуатаційні витрати за період повинні бути належним чином розподілені між цими двома групами. Для визначення частки часу, протягом якого обладнання знаходиться в початковій віковій групі, і частку часу, протягом якої обладнання знаходиться в наступній віковій групі (рис. 3.3).

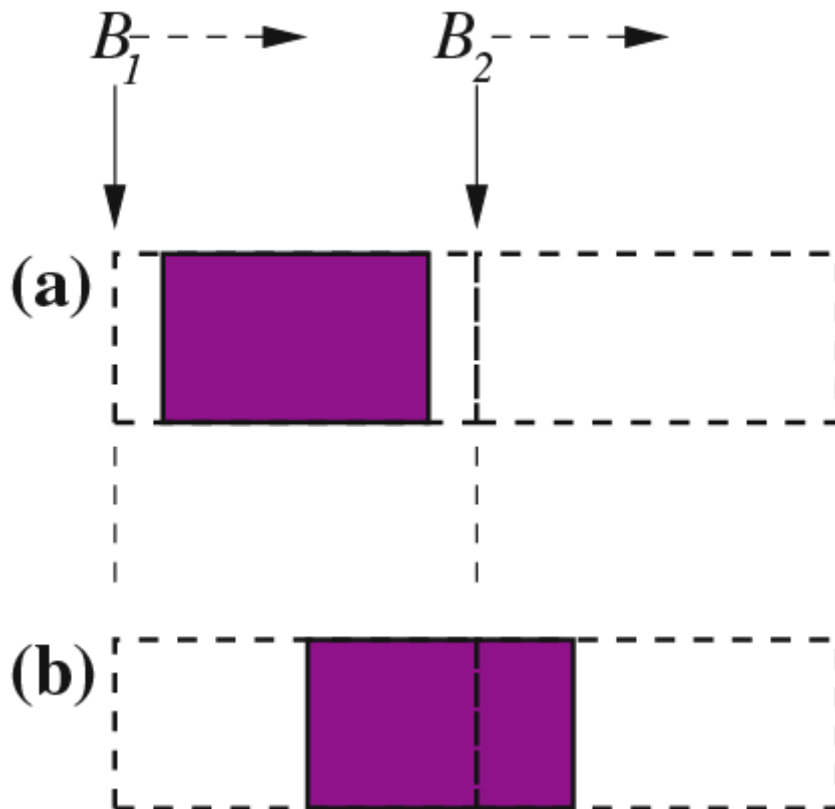


Рис. 3.3 - Два випадки встановлення віку обладнання між віковими групами.

У випадку (рис 3.3 а) обладнання залишається в одній віковій групі протягом усього періоду. У випадку (рис 3.3 б) обладнання переходить до наступної вікової групи протягом періоду.

За припущенням, розмір вікової групи перевищує розмір періоду, тому одиниця обладнання не може займати більше двох вікових груп за один період. Ми представляємо цю частку часу параметром B_{hk},el для $h = 1, 2$, де $h \in h$ -ою віковою групою, на яку обладнання приземлилося протягом періоду. Тоді маємо:

$$B_{i,e}^{k,l} = \begin{cases} 1 & \text{якщо } (b(l)+1)B_0 - \sum_{n=k-l}^{k-1} a_j^{k,l+n-k} H^n > a_e^{k,l} H^k \\ \frac{(b(l)+1)B_0 - \sum_{n=k-l}^{k-1} a_j^{k,l+n-k} H^n}{a_e^{k,l} H^k} & \text{інакше} \end{cases}$$

і

$$B_{2,e}^{k,l} = 1 - B_{1,e}^{k,l}$$

Змінна вартість $V_e^{k,b(l)+h-1}$, є вартістю години експлуатації для типу обладнання $e \in X \cup X'$ у віковій групі $b(l) + h - 1$ за період k . Отже, для операційних витрат маємо такий вираз:

$$\sum_{e,k,l,h} B_{h,e}^{k,l} D_1^k V_e^{k,b(l)+h-1} x_e^{k,l} \quad (3.4)$$

Оскільки мінімізуємо витрати на обробку матеріалів, ми представляємо ліквідацію як від'ємні витрати. Застосовуємо комбіновану амортизацію (за ставкою J за період) і коефіцієнт дисконтування чистої поточної вартості (за ставкою I за період):

$$D_2^{k,l} = \frac{(1-J)^l}{(1+I)^k} \quad (3.5)$$

де l – вік обладнання на початку періоду k .

Оскільки F_e є початковими капітальними витратами, ліквідаційна вартість дорівнює:

$$-\sum_{e,k,l} F_e D_2^{k,l} s_e^{k,l} \quad (3.6)$$

Загалом у цільовій функції є $3 (M K L + N K L) + M K + N K = O ((M + N) K L)$.

Щоб зменшити загальну кількість змінних у програмі, обмежуємо вікову категорію будь-якої частини обладнання не більшою за максимальний вік типу обладнання, який ми позначаємо як $L(e)$ для типу e . Іншими словами, не створюємо змінну для обладнання старше максимального віку. Крім того, обмежуємо вік будь-якого обладнання, яке не існувало раніше, не більшим за число поточного періоду часу. Це пов'язано з тим, що обладнання не може збільшити дві вікові групи за один період часу. Однак ми також повинні враховувати можливість попереднього обладнання. Якщо ми визначимо $P(e)$ як найвищий початковий вік будь-якого

попередньо існуючого обладнання типу e , то в період часу k ми маємо враховувати лише обладнання віком до

$$L^k(e) = \min \{P(e) + k - 1, L(e)\}$$

Щоразу, коли підсумовуємо l , нам потрібно лише підсумовувати до $l = L^k(e)$. Ми зазначаємо, що, оскільки ліквідація відбувається на початку періоду, змінні ліквідації розширюються до $l = L^k(e) + 1$.

У кар'єрі потрібно обробляти правильну кількість матеріалів, щоб задовольнити вимоги до змішування збагачувальну фабрику. Щоб врахувати виробничі вимоги в обмеженні, спочатку розглянемо потенційну продуктивність обладнання, $P_e^{k,l}$ коли воно старіє l протягом періоду k . Ми можемо визначити цю кількість, дивлячись на доступність обладнання (a_e^l), потужність (c_e) і тривалість циклу (t_e^k):

$$P_e^{k,l} = \frac{a_e^{b(l)} c_e}{t_e^k} \quad (3.7)$$

Для цієї формули доступність визначається віком обладнання. Вік визначає вікову категорію, до якої потрапляє обладнання. У свою чергу, вікова категорія визначає оцінку доступності, яка представляє частку загального часу, протягом якого обладнання доступне для роботи. Ми маємо наступні виробничі обмеження для вантажівок і навантажувачів відповідно, де T^k є виробничою потребою для періоду k :

$$\sum_{i,l} P_i^{k,l} x_i^{k,l} \geq T^k \quad \forall k \quad (3.8)$$

$$\sum_{i',l} P_{i'}^{k,l} x_{i'}^{k,l} \geq T^k \quad \forall k \quad (3.9)$$

Потрібно переконатися, що вантажівки та навантажувачі, які використовуються протягом періоду, сумісні між собою. Однак не потрібно робити всі вантажівки сумісними з усіма навантажувачами; просто потрібно мати достатню сумісність, щоб задовольнити вимоги продуктивності, а не лише один набір. Визначаємо набір $X(i)$ як набір типів вантажівок, які сумісні з типом

навантажувача i . Далі ми визначасмо обмеження, яке гарантує, що все обладнання, сумісне з певним типом навантажувача, може задовольнити вимоги:

$$\sum_{i \in X(i), l} P_i^{k,l} x_i^{k,l} \geq \sum_l P_{i'}^{k,l} x_{i'}^{k,l} \quad \forall i' \in X', k \quad (3.10)$$

Однак також потрібно розглянути можливість вибору двох типів завантажувача.

Рівняння (3.10) враховує лише випадок, коли всі вантажівки сумісні з одним навантажувачем, тобто. Якщо маємо лише обмеження (3.10), то це може призвести до подвійного підрахунку.

Потрібно розглянути випадок типу пар навантажувачів (i, h) і переконатися, що сумісний парк вантажівок може обслуговувати обидва ці навантажувачі разом. Позначимо об'єднання сумісних парків вантажних автомобілів множиною $X(i, h)$:

$$\sum_{i \in X(i', h'), j, l} P_i^{k,l} x_{i,j}^{k,l} \geq \sum_l (P_{i'}^{k,l} x_{i',j}^{k,l} + P_{h'}^{k,l} x_{h',j}^{k,l}) \quad \forall (i', h') \in X', k \quad (3.11)$$

Аналогічно, ми повинні дозволити можливість трьох типів завантажувачів, (i, h, j) :

$$\sum_{i \in X(i', h', j'), j, l} P_i^{k,l} x_{i,j}^{k,l} \geq \sum_l (P_{i'}^{k,l} x_{i',j}^{k,l} + P_{h'}^{k,l} x_{h',j}^{k,l} + P_{j'}^{k,l} x_{j',j}^{k,l}) \quad \forall (i', h', j') \in X', k \quad (3.12)$$

Припущення використання повного періоду може спричинити деякі проблеми з цими обмеженнями. Зокрема, можемо змусити парк вантажівок перевищувати вимоги до продуктивності кар'єру — якщо навантажувачі перевищують вимоги до продуктивності, ми не хочемо змушувати вантажівки відповідати їм. Можна виправити це, ввівши змінну-індикатор $h_{A'}^k$, де $A' \subset X$, яка вибере одне з наступних двох обмежень для домінування:

$$\sum_{i \in X(A'), l} P_i^{k,l} x_i^{k,l} \geq \sum_{i \in A', l} P_{i'}^{k,l} x_{i'}^{k,l} - M h_{A'}^k \quad \forall A' \in X', k \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in X(A'), l} P_i^{k,l} x_i^{k,l} \geq T^k h_{A'}^k \quad \forall A' \subset X', k \quad (3.14)$$

Оскільки набір потужностей X' , це створить $2^K (2^N - 1)$ обмежень, де K — загальна кількість періодів, а N — кількість завантажувачів). Для 13 періоду, 27 прикладів завантажувачів це дорівнює 35 мільярдам обмежень. Однак кількість завантажувачів, вибраних у кінцевому рішенні, зазвичай буде набагато меншою,

ніж у повному наборі. Таким чином, можна обмежити створення обмежень, дозволивши максимум α типів завантажувачів. Це дасть $2K \binom{h}{\alpha}$ обмеження. Для 13 періодів, 27 задач завантажувачів із максимум 4 типами завантажувачів, це дорівнює лише 542 178 обмеженням.

Можна додатково зменшити кількість обмежень у моделі, ввівши цей набір обмежень за допомогою алгоритму розділення. Тобто ці обмеження вводяться в модель лише в тому випадку, якщо порушуються рішенням моделі. Це корисний метод для усунення великого набору неактивних обмежень із моделі: потенційно покращує час обчислення та розв'язуваність моделі, а також звільняє велику кількість пам'яті, яка знадобилася б для зберігання моделі в комп'ютері.

Значна частина лінеаризації в цій моделі пов'язана з тим, як визначили змінні рішення: фіксуємо період часу та вік (у використовуваних вікових діапазонах) кожної одиниці обладнання у відповідних індексах, k і l . Важливо встановити зв'язок між цими двома показниками (рис. 3.4).

За припущення повного використання, збільшення періоду часу (k) призводить до збільшення віку (l).

Припускаємо, що обладнання використовується повністю, тому все обладнання отримує значення 1 за кожним індексом k кожного періоду. Однак обладнання можна врятувати на початку кожного періоду. Виражаємо це співвідношення для всіх типів обладнання в обмеженні:

$$x_e^{k,l} = x_e^{k-1,l-1} - s_e^{k,l} \quad \forall \quad k > 0.1 \in [1, L^k(e)], e \quad (3.15)$$

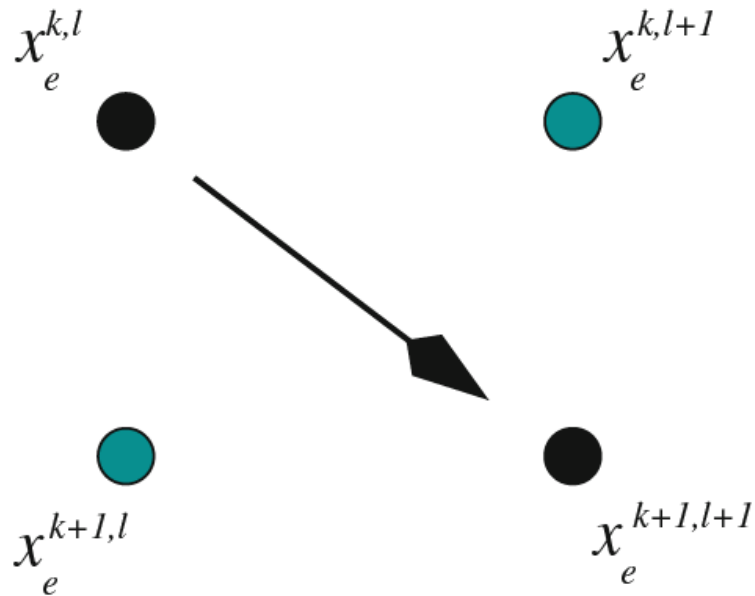


Рис. 3.4 - Зв'язок між індексами k і l для змінного обмеження переходу.

Максимальний вік кожного типу обладнання може суттєво змінюватися: від 25 000 до 100 000 годин. Коли частина обладнання досягає свого максимального віку, ми змушуємо її виводити з експлуатації на початку наступного періоду

$$x_e^{k,l} = s_e^{k+1,l+1} \quad \forall l > L^k(e), e, k \quad (3.16)$$

Під час створення змінної можна в першу чергу запобігти появі змінних за віком, таким чином здійснюючи примусове відновлення.

У цьому формулюванні отримуємо прибуток від утилізації вантажівок і навантажувачів. Тому повинні запобігти ліквідації обладнання, яке не є власністю:

$$x_e^{k-1,l-1} \geq s_e^{k,l} \quad \forall k > 0, 1 \in [1, L^k(e) + 1], e \quad (3.17)$$

Також встановлено необмежені змінні збереження рівними 0, щоб запобігти їх домінуванню над цільовою функцією:

$$s_e^{k,0} = 0 \quad \forall e, k \quad (3.18)$$

Новинкою цієї моделі є можливість включити вже існуюче обладнання в процес оптимізації. Якщо є обладнання $x_e^{P(e)}$ типу e , яке має вік $P(e)$, то або використовуємо, або рятуємо це обладнання.

$$x_e^{0,P(e)} + s_e^{0,P(e)} = x_e^{P(e)} \quad \forall e \in P \quad (3.19)$$

Раніше існуюче обладнання, яке перевищило максимальний вік, $L(e)$, для свого типу обладнання, e , має бути негайно врятовано:

$$s_e^{0,P(e)} = x_e^{P(e)} \quad \forall e \in P, P(e) > L^k(e) \quad (3.20)$$

Повна модель

$$\begin{aligned} \min \sum_{e,k} F_e D_1^k x_e^{k,0} + \sum_{e,k,l,h} B_{h,e}^{k,l} D_1^k V_e^{k,b+h-1} x_e^{k,l} - \sum_{e,k,l} F_e D_2^k s_e^{k,0} \\ \sum_{i,i'} P_i^{k,l} x_i^{k,l} \geq T^k \quad \forall i' \in X', k, \\ \sum_{i \in X(A), l} P_i^{k,l} x_i^{k,l} \geq \sum_{i' \in A', l} P_{i'}^{k,l} x_{i'}^{k,l} - M h_{A'}^k \quad \forall A' \in X', k, \\ \sum_{i \in X(A), l} P_i^{k,l} x_i^{k,l} \geq T^k h_{A'}^k \quad \forall A' \in X', k, \\ x_e^{k,l} = x_e^{k-1, l-1} - s_e^{k,l} \quad \forall k > 0, l \in [1, L^k(e)], e \\ x_e^{k,l} = s_e^{k+1, l+1} \quad \forall l > L(e), e, k \\ x_e^{k-1, l-1} \geq s_e^{k,l} \quad \forall l > 0, l \in [1, L^k(e) + 1], e \\ s_e^{k,0} = 0 \quad \forall e, k \\ x_e^{0,P(e)} + s_e^{0,P(e)} = x_e^{P(e)} \quad \forall e \in P \\ s_e^{0,l} = x_e^{P(e)} \quad \forall e \in P, p(e) > L(e) \\ x, s \in Z^+ \\ h \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (3.21)$$

Розглянемо результати обчислень за розробленою моделлю. Реалізовано випадок з 13 періодами із 276612 змінними та 7910 обмеженнями.

Результати подано у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 - Підсумок результатів 13-періодного прикладу з різною амортизацією

Depreciation (%)	Time (s)	Objective function (\$)
40	3255	1.25806×10^8
50	9873	1.26075×10^8
60	3336	1.26212×10^8

Оптимальна вартість $\$1,25806 \times 10^8$ була отримана через 3255 с (2,5 год) для проблеми 40% амортизації. Збіжність для цієї задачі була швидкою, досягаючи в межах 1% оптимальності лише за 15 с. На рис. 3.5 зображено швидкість, з якою найкраще цілочисельне рішення сходиться з найкращим рішенням вузла.

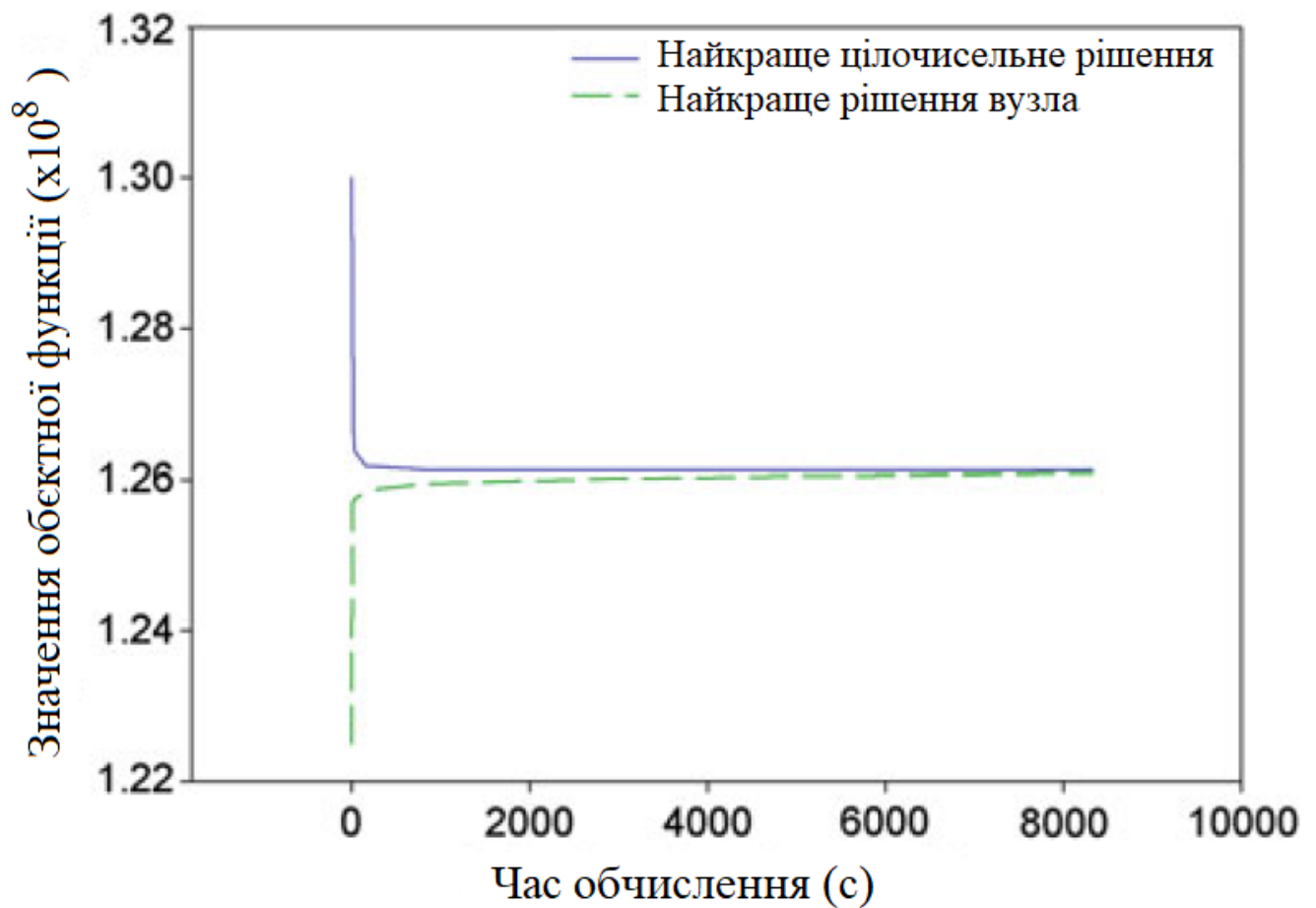


Рис. 3.5 - Збіжність 13-періодного прикладу для моделі з одним місцем

У нашому рішенні (рис. 3.6) протягом графіка було обрано два 60-тонні навантажувачі. Для роботи з цими навантажувачами було обрано п'ять різних типів вантажівок: 136-тонна вантажівка, три 177-тонні вантажівки, дві великі 230-тонні вантажівки, двадцять 150-тонних вантажівок і 11 існуючих вантажівок. Розраховані значення для кожного парку перевищують 1 за кожен період. Це свідчить про те, що оптимальним рішенням є максимально завантажувати вантажників і дозволяти вантажівкам чекати в черзі. Це рішення є відображенням великої вартості експлуатації навантажувачів великої місткості порівняно з вартістю експлуатації кар'єрних вантажівок.

Рішення для навантажувача зберегло наймолодший існуючий навантажувач вантажопідйомністю 34 тони та придбано два нових 40-тонні навантажувачі.

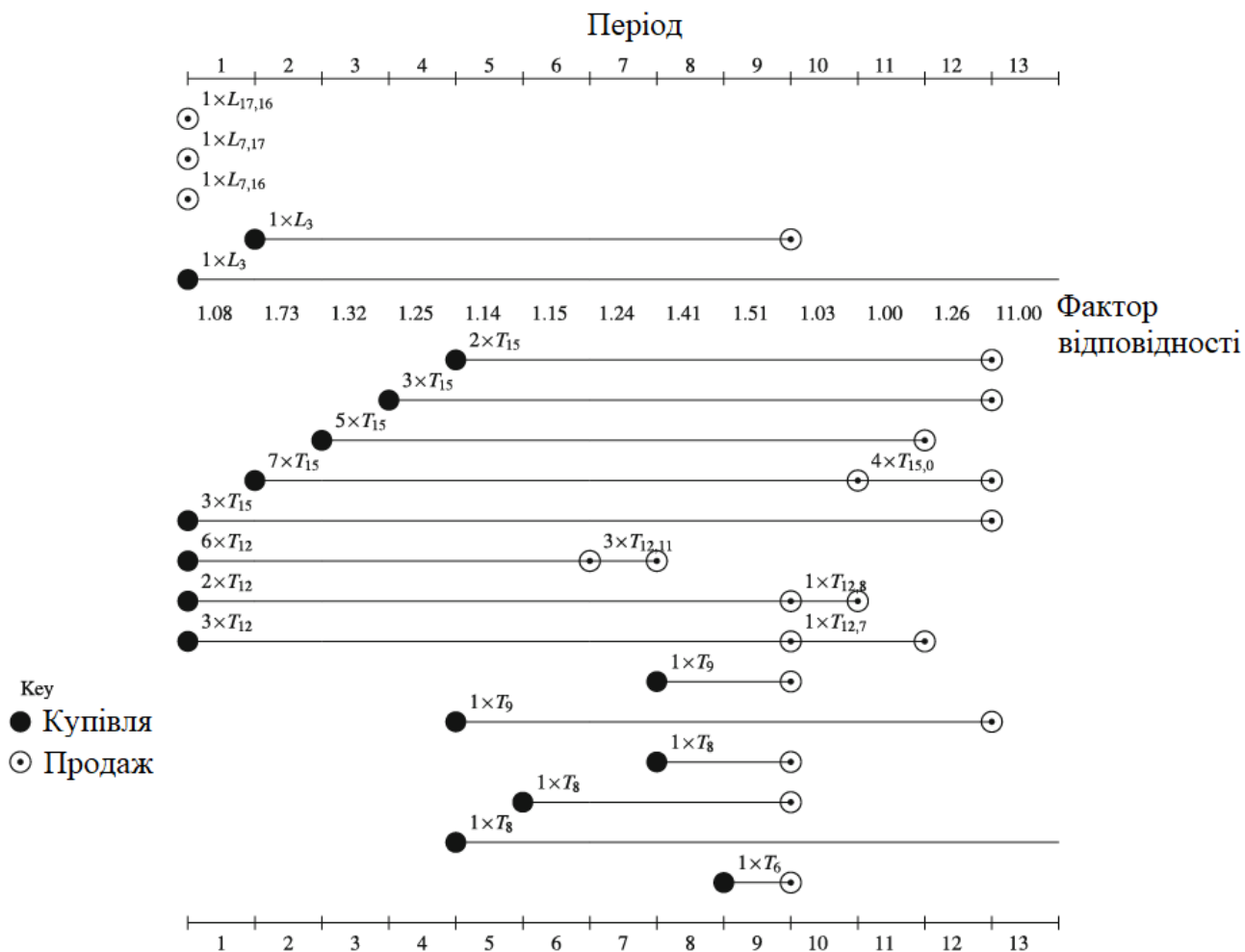


Рис. 3.6 - Оптимальне рішення для прикладу

Рішення для вантажівок представлено в табл. 3.2. Це рішення коштувало $\$1,51483 \times 10^8$. Цілочисельна модель програмування покращила це на 17,7% — збільшення прибутку на $\$26,9$ млн.

Друге рішення утилізувати всі наявні навантажувачі. Передбачалося закупити один 42-тонний навантажувач і два 57-тонних. Мало бути використано те саме рішення для вантажівки, що представлено в табл. 3.2. Це рішення коштує $\$1,55241 \times 10^8$. Наше модельне рішення забезпечує покращення на 18,75%, або $\$29,1$ млн.

Було надано третє рішення - усі існуючі навантажувачі були списані та придбано три 57-тонні навантажувачі.

Була використана політика закупівлі та утилізації вантажівок з табл. 3.2. Це рішення коштує $\$1,66550 \times 10^8$. Наша модель покращила це рішення на 24,3%, що склало різницю у вартості 40,4 мільйона доларів.

Очевидно, що наше рішення (хоча й складніше) є набагато дешевшим рішенням, що вказує на переваги застосування моделі цілочисельного програмування до цієї проблеми.

Однак не можна стверджувати, що рішення однозначно краще, оскільки не враховували вартість допоміжного обладнання. Зокрема, рішення вимагає роботи декількох типів обладнання, що може збільшити потребу в допоміжному обладнанні та інші витрати. Політика, яка фактично застосовувалася, дозволяє уникнути витрат, пов'язаних із кількома типами обладнання, шляхом прийняття однорідних парків.

Таблиця 3.2 - Ретроспективна політика купівлі та ліквідації вантажівок

	Періоди												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Існуючі $T12$	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
Новий Tj_2	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Новий T_{12}	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Новий Tj_2	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3.2. Вибір обладнання для кількох місць

Наступним етапом розглядаємо проблему вибору обладнання в контексті багатолокаційного кар'єру. Зокрема, потрібно вибрати сумісний парк вантажівок і навантажувачів для переміщення видобутих матеріалів між кількома місцями видобутку та відвалами за мінімальних витрат. Кілька періодів і місць збільшують масштаби проблеми, але проблему ускладнює наявне обладнання, яке вимагає сумісних обмежень щодо парку.

Основні особливості модельного підходу є:

- розгляд плану видобутку в декількох місцях і на кілька періодів;
- розгляд різнорідних флотів і наступних вимог щодо сумісності;

- одночасна оптимізація політики закупівлі та ліквідації, а також політики планування обладнання (тобто політики розподілу);
- забезпечення виправлення помилки дискретизації;
- змінна попередня обробка на основі «сходової» структури в рішенні;
- розробка підходів до розв'язування, які допомагають зменшити загальну кількість обмежень у моделі;
- ілюстрація ефективності обчислень у контексті реального світу за допомогою двох прикладів.

Типовий кар'єрн може мати кілька місць видобутку, кілька відвалів або кілька маршрутів від місця до відвалу, як показано на рис. 3.7. Різні місця видобутку можуть мати вимоги до потужності, які впливають на тип навантажувача, вибраного для видобутку матеріалу, і, отже, змінюють швидкість видобутку на цьому місці.

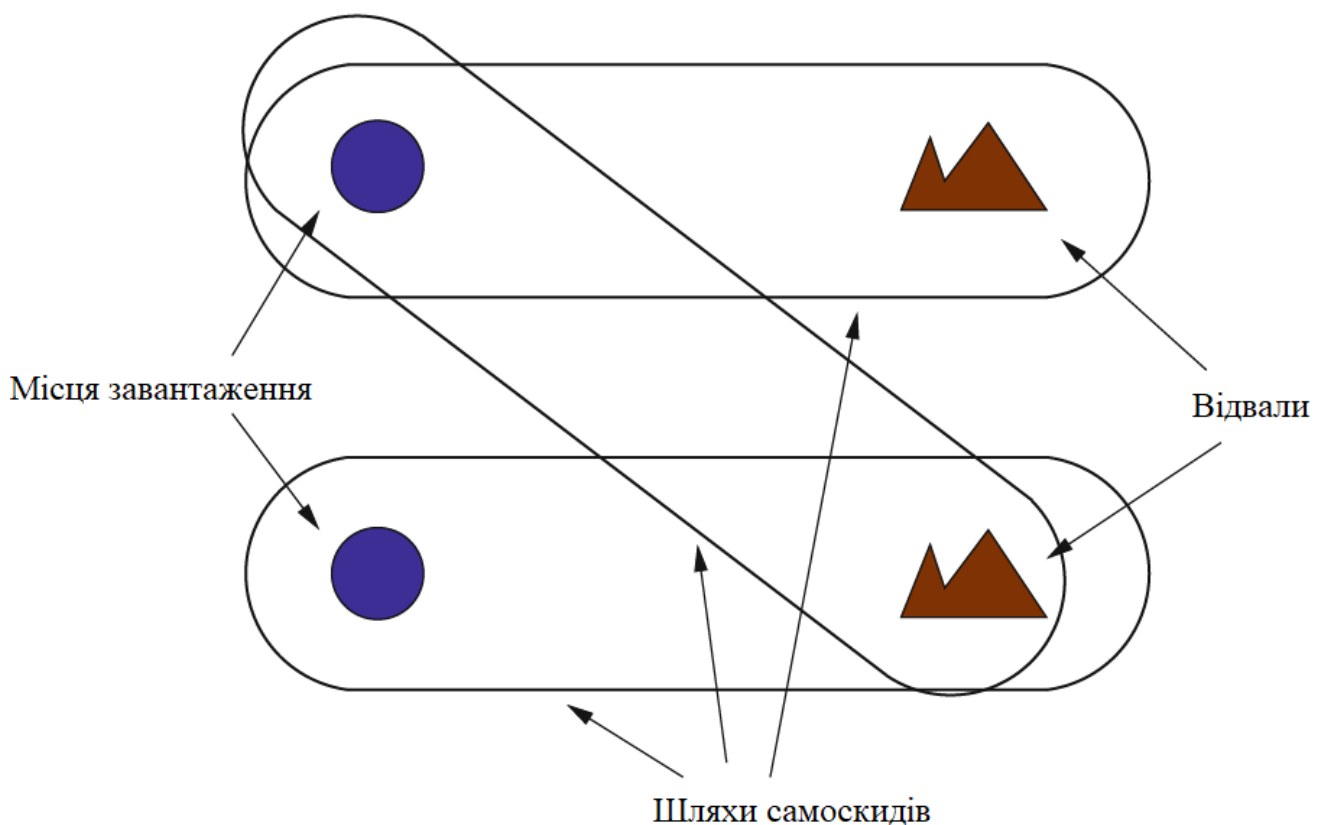


Рис. 3.7 - Багатолокаційна модель кар'єру з 2 місцями завантаження, 2 відвалами та 3 маршрутами вантажівок

На маршрутах вантажівок можуть чергуватися між збагачувальними фабриками та відвалами; самі маршрути також можуть суттєво відрізнятися з точки зору часу, необхідного для виконання повного циклу. Крім того, врахування кількох місць або маршрутів створює необхідність розподілу обладнання по місцях. Покупка може відбутися в будь-який період. Таким чином, ця проблема є принаймні такою ж складною, як і проблема потоку кількох товарів із фіксованою оплатою та потужністю. Щоб переконатися в цьому, розглянемо рис. 3.8.

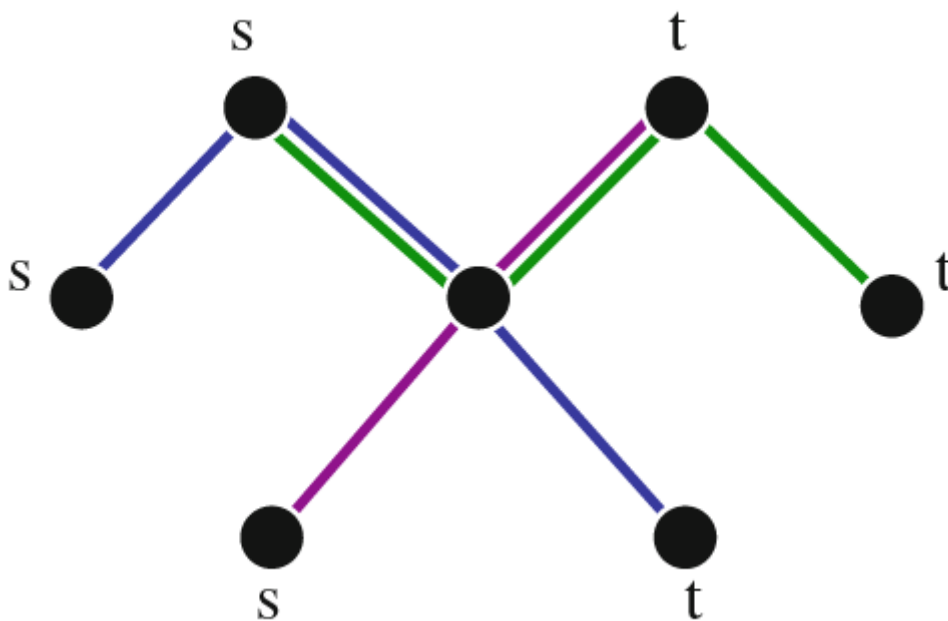


Рис. 3.8 - Проста багатотоварна мережа потоків

У проблемі потоку кількох товарів, визначеній у мережі, може бути кілька джерел, тут s , і кілька споживачів, тут t . Якщо ми розглядаємо вантажівки, що рухаються маршрутами між джерелами та споживачами, у контексті одного товару, то це буде еквівалентно фіксації однорідного обладнання на маршрутах. Однак у проблемі потоку кількох товарів може також існувати більше одного типу товару або потоку, що виходить з будь-якого джерела. Крім того, потік може розділятися у вузлі. Проводячи аналог до вибору обладнання, це еквівалентно розподілу неоднорідного потоку вантажівок на маршрутах, де потік може розділятися та переходити до інших поглиначів або джерел. Отримуємо фіксовану плату та маємо

право стягувати фіксовану ціну за обладнання на момент придбання та обмежувати кількість обладнання, яке ми можемо використовувати в потоці, розміром парку.

Перший план кар'єру повинен використовувати приблизні витрати на транспортування, оскільки рішення вибору обладнання не буде відоме. Протягом усього терміну експлуатації кар'єру створення планів кар'єру з інтервалами планування залежатиме від обраного парку обладнання. Таким чином, нові плани повинні бути створені, якщо зміни в парку обладнання генеруються в інтервалі планування обладнання.

У промисловості відкритого гірничого виробництва загалом нелінійні невиспуклі експлуатаційні витрати та доступність (як функції віку обладнання) зазвичай дискретизуються на покрокові функції, які поділяються на вікові діапазони розміру V_0 , як показано на рис. 3.9.

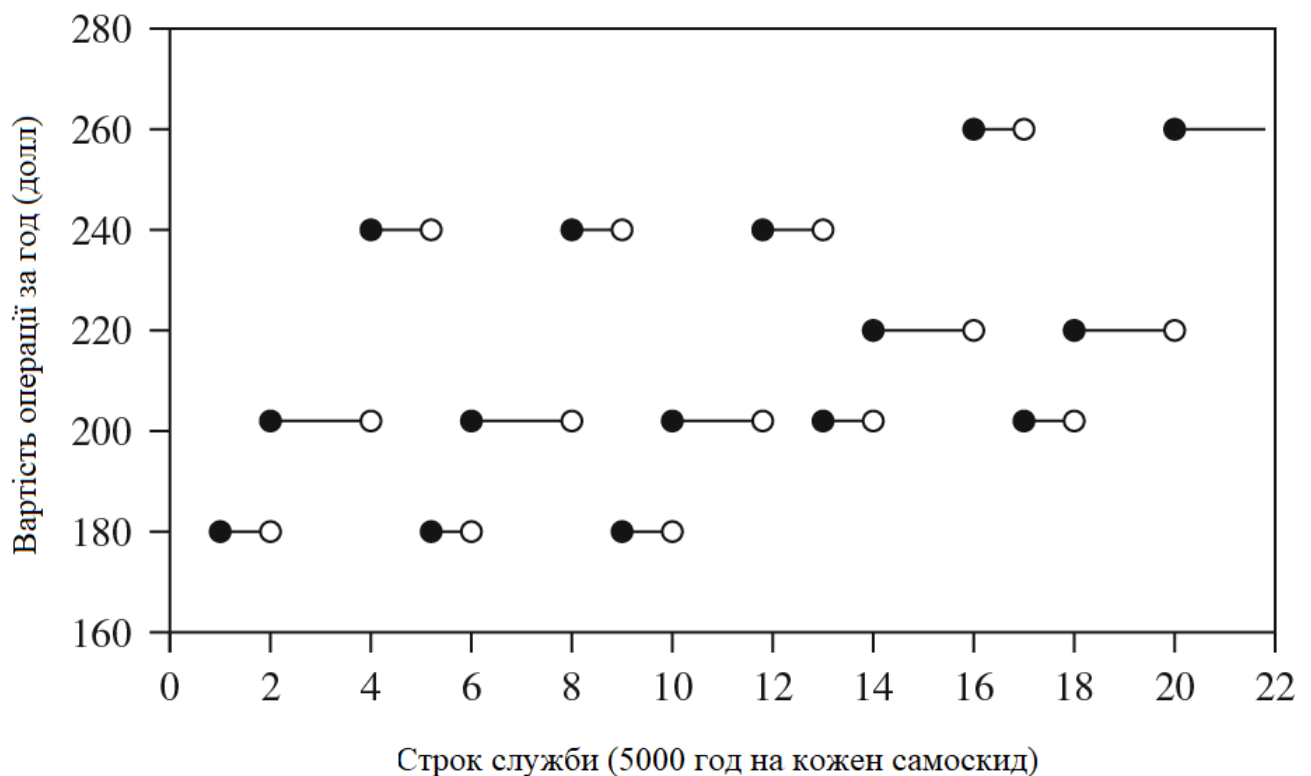


Рис. 3.9 - Дискретизована функція операційних витрат у порівнянні з віковими категоріями.

Зростання експлуатаційних витрат відображає збільшення витрат на технічне обслуговування; великі падіння витрат відбуваються, коли проводиться значне технічне обслуговування, наприклад капітальний ремонт

Операційні витрати відображають витрати на експлуатацію та обслуговування обладнання. Він враховує різні витрати на технічне обслуговування, рівень доступності та продуктивності, які, як відомо, змінюються залежно від віку обладнання. У наших прикладах ми використовуємо розмір вікової категорії 5000 годин. Маємо схожі фактори для доступності обладнання (пропорція часу, протягом якого воно доступне для роботи), використання (пропорція часу, протягом якого воно є ефективним) і обслуговування (пропорція часу, протягом якого обладнання доступне після технічного обслуговування). Усі ці фактори є функціями вікової категорії обладнання, що вказує на те, що продуктивність обладнання змінюється з його використанням нелінійним чином.

Припущення повного використання періоду насправді стосується деталізації даних — встановили цю проблему з часовими вікнами річних періодів, і є такі міркування, як бюджети та гнучкість робочої сили, які зазвичай річні за своєю природою. Придбання та утилізація обладнання зазвичай відбувається періодично, тому, відповідно, ми визначаємо період тривалістю 1 рік як розумний часовий проміжок для розгляду придбання та утилізації обладнання та будь-яких фінансових вигод, пов'язаних із закупівлею оптом. Можна розглядати менші періоди, наприклад щоквартально, для створення точніших графіків точності та рішень щодо розподілу, але закупівля та відновлення, як правило, не відбуватимуться через ці менші інтервали. З цієї причини, а також щоб полегшити вирішення проблеми, не розглядатимемо періоди, менші за 1 рік, у наших експериментах.

Часто дані для калькуляції витрат і навіть прогнозованого попиту недосконалі. Оскільки сам період прогнозування може бути досить тривалим (понад 20 років), прагматичний підхід полягає у формулюванні проблеми як детермінованої проблеми, яка відповідає наданому плану шахти, і виконанні аналізу чутливості, щоб зрозуміти надійність отриманих рішень. Крім того, оскільки проблема вже є великомасштабною, додатковий розгляд стохастичності та невизначеності лише посилить складність проблеми. У цьому сенсі отримання рішень за допомогою підходу детерміністичного моделювання, такого як змішане

цілочисельне програмування, підходить для проблеми вибору обладнання з кількома місцями, де одиниці вантажівки та навантажувача є невід’ємними, а обмеження пропускну здатності можна зафіксувати лінійно.

Припущення моделі:

- Кілька місць — існує кілька місць і кілька маршрутів, за якими може пересуватися вибраний парк;
- Кілька циклів роботи вантажівок — тривалість циклу вантажівки фіксується для даного маршруту, де маршрут визначається як пара місця завантаження та місця розвантаження;
- Відомий план видобутку — прийнятний план видобутку вже отримано (включно з вибором методу видобутку), і він зафіксований на період оптимізації;
- Ліквідація — усе обладнання підлягає ліквідації на початку кожного періоду за деякою амортизованою вартістю початкових капітальних витрат;
- Відсутність допоміжного обладнання — колісні навантажувачі та невеликі вантажівки не розглядаються в цій моделі, хоча їх можна легко включити, якщо доступні дані про вартість і технічне обслуговування;
- Відомі години роботи — години роботи шахти оцінюються з урахуванням запланованих простоїв, вибухових робіт і погодних умов;
- Неоднорідні парки — різні типи обладнання можуть працювати в одному парку за умови дотримання вимог сумісності;
- Утримання автопарку — все обладнання зберігається на кінець останнього періоду;
- Повний період використання — Операційні витрати стягуються так, ніби обладнання було повністю використано за кожен увесь період, протягом якого воно перебуває у власності.
- Розмір вікової категорії — розмір вікової категорії B_0 , який використовується для дискретизації функції доступності, строго більший за розмір періоду, тобто $B_0 > \max\{H^k\}$;

- Доступність обладнання. Доступність обладнання, вимоги до технічного обслуговування та використання обладнання змінюються з часом, і їх можна приблизно оцінити за допомогою вікових діапазонів.

Розглянемо змінні моделі. Позначимо множину всіх типів вантажних автомобілів через T і типів навантажувачів через L . Тут ми використовуємо три індекси для представлення типу ($t \in T$), періоду ($k \in \{1, 2, \dots, K\}$) і вікової категорії ($m \in \{1, 2, \dots, M\}$). Використовуємо цілі змінні для відстеження цілих одиниць обладнання, тоді як безперервні змінні розподіляють обладнання за маршрутами:

- $x_{t,k,m}$: кількість вантажівок типу t , що належать у період k , які перебувають у віковій категорії m (ціла змінна);
- $y_{l,k,m}$: кількість навантажувачів типу l , що належать у період k , які перебувають у віковій категорії m (ціла змінна);
- $s_{t,k,m}$: кількість вантажівок типу t , врятованих за період k , які перебувають у віковій категорії m (ціла змінна);
- $s_{l,k,m}$: кількість навантажувачів типу l , врятованих за період k , які перебувають у віковій категорії m (ціла змінна);
- $f_{t,j,k,m}$: частка вантажівок типу t у віковій групі m , які призначені для маршруту j у період k , де $f_{t,j,k,m} \in [0, x_{t,k,m}]$ (безперервна змінна);
- $f_{l,i,k,m}$: частка вантажників типу l у віковій групі m , які розподілені до місця i в період k , де $f_{l,i,k,m} \in [0, y_{l,k,m}]$ (безперервна змінна).

Зв'язок між $x_{t,k,m}$ і $s_{t,k,m}$ проілюстровано на рис. 3.10. Змінна $f_{t,j,k,m}$ відстежуватиме «сходи» та розподілятиме частини загального часу на певні маршрути, як описано в наступний розділ. Аналог існує для змінних навантажувача, хоча для стислості ми обмежуємо опис вантажівками.

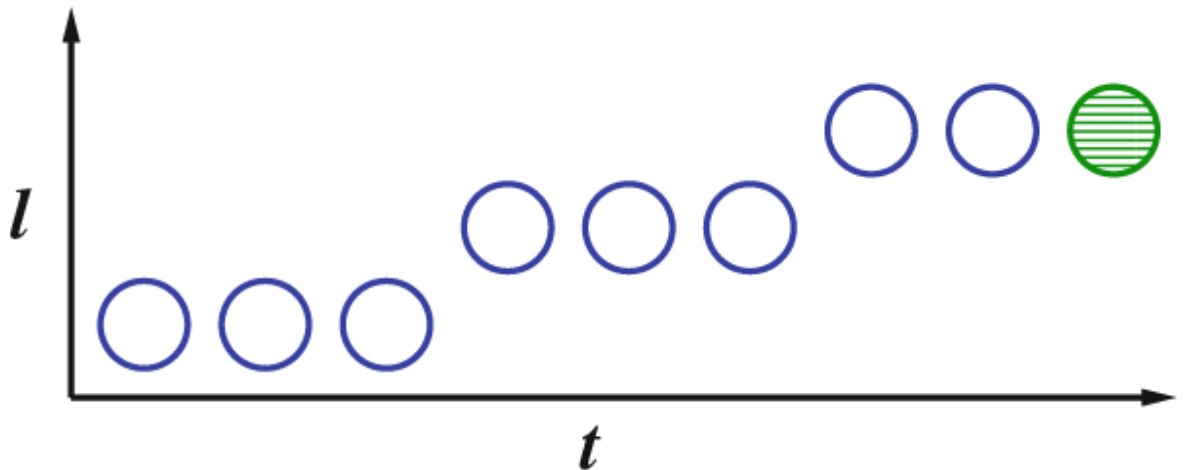


Рис. 3.10 - З плином часу змінні $x_{t,k,m}$ переміщуються вздовж «кроків» вікових груп, закінчуючи єдиним екземпляром змінної $s_{t,k,m}$.

Характеристика пріоритету рішень виявляє природну структуру «сходів» у можливих значеннях змінних рішення. Можлива висота та глибина сходів обмежена максимальною кількістю годин, протягом яких обладнання може використовуватися за період, у поєднанні з віком попереднього обладнання. Використовується M_t^{\max} для позначення максимального віку вантажівки типу t — це значення може змінюватися залежно від тип обладнання. Оскільки $B_0 > H_k$ (розмір вікової групи більший за розмір періоду), M_t^{\max} також може бути обмежено періодом часу, оскільки обладнання не може старіти більше ніж одну вікову групу за один період. Однак ми розглядаємо можливість попередньо існуючого обладнання (яке відомо заздалегідь) із початковим віком M_t^{\max} . Максимальний віковий діапазон, $M_k(t)$, для вантажівки типу t у період часу k такий:

$$M_k(t) = \min \{ M_t^{\max} + k - 1, M_t^{\max} \} \quad (3.22)$$

Це стає зменшеною межею для індексу l у будь-якому відповідному обмеженні. Ми зауважимо, що оскільки ліквідація відбувається на початку періоду, змінні ліквідації поширюються на $M_k(t) + 1$.

Під час реалізації ми не допускаємо змінних, що перевищують вік, із існуючих, таким чином здійснюючи примусове відновлення. Тобто обмеження створення змінної таким чином еквівалентно такому обмеженню:

$$x_{t,k,m} = s_{t,k+1,m+1} \quad \forall m > M_k(t), t \in T, k \in \{1, \dots, K-1\} \quad (3.23)$$

Якщо ми розглянемо набір попередньо існуючих типів обладнання, P , існує можливість негайного відновлення у віковій категорії $m = 1$. Однак для всіх інших типів обладнання ми можемо запобігти домінуванню необмежених змінних відновлення:

$$s_{t,k,1} = 0 \quad \forall t \notin P, k \in \{1, \dots, K\} \quad (3.24)$$

Це також можна зробити під час створення змінної, тим самим зменшуючи загальну кількість змінних і обмежень, необхідних для представлення проблеми.

Визначимо цільову функцію. Попит повинен бути задовільнений або за місцем розташування, або за маршрутом, залежно від характеру плану кар'єру. Для цього формулювання наявність обладнання протягом усього періоду визначається віковою категорією. Виробнича здатність визначається її доступністю ($A_{t,m}$), потужністю (C_t) і часом циклу ($\tau_{t,j}$) (де час циклу для вантажівки – це час маршрутного циклу, а час циклу для навантажувача – час, необхідний для заправки певного типу вантажівки):

$$P_{t,j,k,m} = \frac{A_{t,m} C_t}{\tau_{t,j}} \quad (3.25)$$

Для програми змішаних цілих чисел мінімізується витрати на експлуатацію парку для всього плану кар'єру, включаючи придбання, експлуатаційні витрати та ліквідацію.

Представлено фіксовану вартість придбання вантажівки типу t у F_t і дисконтуємо цю покупку до теперішнього моменту за допомогою дисконтного коефіцієнта,

$$D_k^1 = \frac{1}{(1+I)^k} \quad (3.26)$$

де k — поточний період, починаючи з 1, а I — процентна ставка. Таким чином, загальні капітальні витрати на вантажівку типу t становлять

$$\sum_{t,k} F_t D_k^1 x_{t,k,1} \quad (3.27)$$

з відповідним терміном для вантажників.

Дискретизація змінних витрат за віковими категоріями може призвести до оманливих операційних витрат, оскільки обладнання може почати період в одній віковій групі (і відповідних витратах) і переходити в іншу вікову категорію на решту періоду.

Щоб проілюструвати це, розглянемо рис. 3.11.

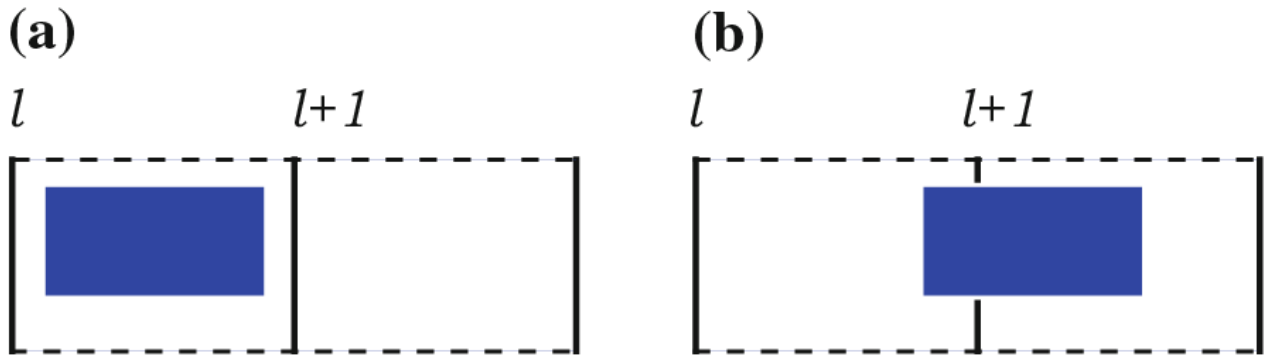


Рис. 3.11 - Два випадки посадки старого обладнання між періодами.

Для випадку а обладнання залишається в одній віковій категорії протягом усього періоду. У випадку б обладнання переходить до наступної вікової групи протягом періоду.

Найкращим варіантом є випадок (а), де вікова група обладнання правильна для всього періоду. Однак у випадку (б) обладнання переходить у нову вікову групу протягом періоду. Це призведе до помилки дискретизації в моделі.

Щоб забезпечити найточнішу можливу калькуляцію вартості для цієї моделі, ми повинні визначити пропорцію часу, протягом якого обладнання залишається у віковій групі t протягом періоду, і пропорцію, яку воно знаходиться в наступній віковій групі, $t + 1$. Процес досягнення цього шляхом отримання постійного коефіцієнта для змінних, таким чином зберігаючи лінійність у моделі, описано на наступній сторінці. Хоча це здається нудним і громіздким, на практиці його дуже просто реалізувати в комп'ютерній програмі.

Щоб обчислити частину часу, яку кожен набір обладнання проводить у кожній віковій категорії, спочатку обчислюємо вік обладнання (у вікових групах) за будь-який певний період. Для цього потрібно знати, коли було придбано

обладнання. Період купівлі позначимо k . Для здійснення цього розрахунку обладнання також має бути у власності в поточному періоді. Наявність обладнання – це частка періоду, протягом якого обладнання доступне для роботи; неготовність часто пов'язана з плановим обслуговуванням. Доступність, як вона використовується тут, розраховується з використанням факторів доступності, використання та обслуговування, розглянутих вище, і залежить від поточного вікового діапазону обладнання. Нехай H_k — години роботи для періоду k , а $A_{t,m}$ — наявність вантажівки типу t у віковій категорії m . Ми отримуємо вік обладнання в годинах експлуатації за допомогою рекурсивної формули, оскільки доступність обладнання є функцією самого віку обладнання. Основою рекурсії є:

$$\beta(k) = A_{t,1} H_k. \quad (3.28)$$

Тоді вік обладнання в годинах експлуатації можна отримати для будь-якого періоду k за допомогою:

$$\beta(k) = \sum_{k' \leq h' \leq k} A_{t, \left[\frac{\beta(h'-1)}{B_0} \right]} H_{h'}. \quad (3.29)$$

Ми отримуємо вікову групу, в якій знаходиться обладнання на початку періоду, за $b(k)$:

$$b(k) = \left\lfloor \frac{\beta(k)}{B_0} \right\rfloor \quad (3.30)$$

Оскільки $B_0 > H_k$, обладнання може лежати лише в $h \in \{1, 2\}$ вікових діапазонах протягом одного періоду. Для початку ми визначимо $B_{t,k,m}^h$ як частку загальної кількості відпрацьованих годин, які вантажівка t витрачає у віковій групі $m + h - 1$ за період k (де діюча вікова група m).

Частка часу, як будь-яка група витрат на обладнання в будь-якій віковій групі можна представити наступними двома виразами:

$$B_{t,k,m}^1 = \begin{cases} 1, & \text{якщо } (m+1)B_0 - \beta(k) > A_{t,b(k)} H_k \\ \frac{(m+1)B_0 - \beta(k)}{A_{t,b(k)} H_k}, & \text{інакше} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$B_{t,k,m}^2 = 1 - B_{t,k,m}^1 \quad (3.32)$$

Вік на початку періоду визначається як $\beta(t)$, як визначено вище. Кількість відпрацьованих годин у поточному періоді визначається так:

$$A_{t,m}H_k$$

Якщо обладнання залишається в одній віковій групі протягом усього періоду, ми вимагаємо, щоб різниця між маркером для наступної вікової категорії $(m + 1)B_0$ і віком на початку періоду перевищувала кількість відпрацьованих годин в поточному періоді.

Тобто, якщо:

$$(m + 1)B_0 - \beta(k) > A_{t,b(k)}H_k$$

Подібним чином, якщо обладнання переміщується в іншу вікову групу на частину періоду, ми можемо просто подивитися на різницю між маркером для наступної вікової категорії та віком на початку періоду. Поділ на кількість напрацьованих годин за поточний період дає необхідну частку загальної кількості напрацьованих годин. Можна легко налаштувати ці формули для випадку попереднього обладнання. Тепер можна використовувати $B^1_{t,k,m}$ і $B^2_{t,k,m}$ для корекції операційних витрат (позначених $V_{t,k,m}$) у цільовій функції наступним чином (також із коефіцієнтом дисконтування):

$$\sum_{t,k,m,h} \frac{B^h_{t,k,m}}{(1+m)^k} V_{t,k,b(k)+h-1} x_{t,k,m} \quad (3.33)$$

Нарешті, ми розглядаємо дохід від утилізації старого обладнання. Ми застосовуємо комбіновану амортизацію (за ставкою J за період) і коефіцієнт дисконтування (за ставкою I за період):

$$D^2_{k,m} = \frac{(1-J)^l}{(1+I)^k} \quad (3.34)$$

де l – вік обладнання на початку періоду t . Оскільки F_e є початковими капітальними витратами, ліквідаційна «вартість» становить:

$$-\sum_{t,k,m} F_t D^2_{k,m} S_{t,k,m} \quad (3.35)$$

з відповідним терміном для вантажників.

Розглянемо обмеження. Потрібно, щоб навантажувачі задовольнили виробничий попит, $D_{i,k}$, у місці $i \in I$, що дає нам такі обмеження попиту на потужність:

$$\sum_{l,m} P_{l,k,m} f_{l,i,k,m} \geq D_{i,k} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, i \in I \quad (3.36)$$

де $P_{l,k,m}$ - максимально можлива продуктивність навантажувача l , який має вік m за період k . Цей вираз отримано шляхом врахування потужності обладнання, часу колювання (час доставки одного вантажу до вантажівки), кількості необхідних колювань (співвідношення місткості вантажівки та навантажувача), а також часу простою через технічне обслуговування та інших факторів. Аналогічно, ми вимагаємо, щоб вантажівки задовольнили попит на кожному маршруті або звалищі, $j \in J$:

$$\sum_{t,m} P_{t,k,m} f_{t,j,k,m} \geq D_{j,k} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, j \in J \quad (3.37)$$

Вантажівки також повинні відповідати вимогам місткості місць видобутку. Для кожного місця i цікавлять лише маршрути j , які сполучаються з місцем розташування. Позначимо набір маршрутів, які сполучаються з місцем i через $J(i)$. Тоді маємо:

$$\sum_{t,m; j \in J(i)} P_{t,k,m} f_{t,j,k,m} \geq D_{i,k} \quad \forall k \in \{1, \dots, K\}, i \in I \quad (3.38)$$

Обмеження пропускної спроможності повинні бути задоволені набором сумісних вантажівок і навантажувачів для кожного місця. Тобто, з вибраного парку вантажівок ми повинні розглянути, чи набір вантажівок, які сумісні з навантажувачами, здатні задовольнити обмеження місткості.

Припустимо, моделюємо задачу вибору обладнання як лінійну програму зі змішаними цілими числами з цільовою функцією мінімізації витрат. Тоді здійсненність виробництва не гарантується лише обмеженнями (3.36) і (3.38).

Розглянемо одне місце завантаження. Нехай у цьому місці працюють рівно два типи завантажувачів, λ_1 і λ_2 . З обмеження (3.36) маємо:

$$P_{\lambda_1} + P_{\lambda_2} \geq D$$

Тобто продуктивність парку навантажувачів типу λ_1 і λ_2 відповідають вимогам продуктивності на місці. Припустимо, що є два типи вантажівок, які обслуговують це місце, τ_1 і τ_2 . З обмеження (3.38) маємо:

$$P_{\tau_1} + P_{\tau_2} \geq D$$

Тобто продуктивність парків вантажних автомобілів типу τ_1 і τ_2 відповідає вимогам продуктивності місця розташування.

Далі припустимо, що набори сумісності типів навантажувачів із типами вантажівок різні для кожного типу навантажувача. Зокрема, навантажувач λ_1 сумісний лише з вантажівкою τ_1 , а навантажувач λ_2 сумісний лише з вантажівкою τ_2 . Припустимо $P_{\tau_2} = D$ і $P_{\lambda_1} = P_{\lambda_2} = D/2$. Тоді, оскільки це проблема мінімізації, і (3.38) виконуються мінімально, і фактична продуктивність вантажівок і навантажувачів (при спільній роботі) становить $D/2$ і вимоги кар'єру по продуктивності не виконуються.

Тому потрібно переконатися, що слабке обмеження продуктивності задовольняється для кожної можливої підмножини парків вантажівок і навантажувачів. Щоб зафіксувати це в наборі обмежень, спочатку нагадаємо, що набір типів завантажувачів позначається L . Далі ми визначаємо набір $T(L')$ як набір типів вантажівок, які сумісні з підмножиною типів навантажувачів $L' \subset L$.

Сумісність вибраних парків забезпечується в поєднанні з обмеженням (3.36) наступним набором обмежень супермножини:

$$\sum_{t \in T(L'), m} P_{t,k,m} f_{t,j,k,m} \geq \sum_{l \in L', m} P_{l,k,m} f_{l,i,k,m} \quad \forall L' \subset L, k, i \quad (3.39)$$

Оскільки L' походить від набору потужностей L , набір обмежень сумісності генеруватиме $K | I | (2^{|L|} - 1)$ обмежень (де K — загальна кількість періодів, а $| I |$ — загальна кількість місць). Як обмеження набору потужностей, його слід реалізувати за допомогою алгоритму розділення. Однак для конкретного прикладу кількість можливих завантажувачів у кінцевому рішенні буде, як правило, набагато меншою, ніж повний набір. У цьому випадку ми можемо обмежити створення обмежень максимум типами завантажувачів α . Це дасть

$K | I | \sum_{a=1}^{\alpha} \left(\frac{|L|!}{a!(|L|-a)!} \right)$ обмежень. Щоб ще більше зменшити загальну кількість

цих обмежень у розв'язнику, використовуємо алгоритм розділення. З цим методом розгалуження та розрізу починаємо без обмежень сумісності в моделі. Ітераційно розв'язуємо модель і перевіряємо її здійсненність — будь-які порушені обмеження додаються до моделі, перш ніж її буде вирішено.

Пов'язуємо змінні відстеження обладнання, $x_{t,k,m}$, зі змінними розподілу $f_{t,j,k,m}$ шляхом встановлення верхньої межі розподілу в наступних обмеженнях зв'язку (з відповідним обмеженням для навантажувачів):

$$x_{t,k,m} \geq \sum_j f_{t,j,k,m} \quad \forall t \in T, k \in \{1, \dots, K\}, m \in \{1, \dots, M\} \quad (3.40)$$

Гарантуємо, що в кожному періоді можемо мати лише не новим обладнанням, якщо воно було у попередньому періоді, як зазначено в наступних обмеженнях пріоритету (з відповідним обмеженням для навантажувачів):

$$x_{t,k,m} = x_{t,k-1,m-1} - s_{t,k,m} \quad \forall t \in T, k \in \{2, \dots, K\}, m \in \{2, \dots, M\} \quad (3.41)$$

$$x_{t,k-1,m-1} \geq s_{t,k,m} \quad \forall t \in T, k \in \{2, \dots, K\}, m \in \{2, \dots, M\} \quad (3.42)$$

У цій моделі розглядаємо пре-наявне обладнання. Потрібно лише розглянути пре-наявні вантажівки та навантажувачі, які взяті з підмножини $P \subset T \cup L$. Нагадаємо, що $b(l)$ початковий вік існуючої вантажівки типу t . Тоді, якщо $\bar{x}_{t,l,b(l)}$ є кількістю існуючих вантажівок типу t із віком $b(l)$, маємо (з відповідним обмеженням для навантажувачів):

$$x_{t,l,b(l)} + s_{t,l,b(l)} = \bar{x}_{t,l,b(l)} \quad \forall t \in P \quad (3.43)$$

Повна модель

$$\begin{aligned}
& \min \sum_{t,k} F_t D_k^1 x_{t,k,1} + \sum_{l,k} F_t D_k^1 y_{l,k,1} + \sum_{t,k,m,h} B_{t,k,m}^h D_k^1 V_{t,k,b(k)+h-1} f_{t,j,k,m} + \\
& + \sum_{t,k,m,h} B_{t,k,m}^h D_k^1 V_{l,k,b(k)+h-1} f_{l,j,k,m} - \sum_{t,k,m} F_t D_{k,m}^2 s_{t,k,m} - \sum_{l,k,m} F_l D_{k,m}^2 s_{l,k,m} \\
& \sum_{l,m} P_{l,k,m} f_{l,i,k,m} \geq D_{i,k} \quad \forall i,k \\
& \sum_{t,m; j \in J(i)} P_{l,k,m} f_{t,j,k,m} \geq D_{i,k} \quad \forall i,k \\
& \sum_{t \in T(L')} P_{l,k,m} f_{t,j,k,m} \geq \sum_{l \in L',m} P_{l,k,m} f_{l,i,k,m} D_{i,k} \quad \forall L' \subset L, i, k \\
& x_{t,k,m} \geq \sum_j f_{t,j,k,m} \quad \forall t, k, m \\
& y_{l,k,m} \geq \sum_j f_{l,i,k,m} \quad \forall l, k, m \\
& x_{t,k,m} = x_{t,k-1,m-1} - s_{t,k,m} \quad \forall t, k > 1, m > 1 \\
& x_{t,k-1,m-1} \geq s_{t,k,m} \quad \forall t, k > 1, m > 1 \\
& y_{l,k,m} = y_{l,k-1,m-1} - s_{l,k,m} \quad \forall l, k > 1, m > 1 \\
& y_{l,k-1,m-1} \geq s_{l,k,m} \quad \forall l, k > 1, m > 1 \\
& x_{t,1,b(1)} + s_{t,1,b(1)} = \bar{x}_{t,1,b(1)} \quad \forall t \in P \\
& x_{t,k,m}, y_{l,k,m}, s_{t,k,m}, s_{l,k,m} \in \mathbb{Z}^+ \\
& f_{t,j,k,m}, f_{l,i,k,m} \in \mathbb{R}^+
\end{aligned}$$

Розглянемо результат оптимізації наведеної вище математичної моделі у двох варіантах. Перший – для запланованого кар'єру без порівняльного рішення. Другий – для кар'єру з уже існуючим обладнанням і порівняльним рішенням. Ці тематичні дослідження показують, що на складність вирішення моделі не повністю впливає розмір K або кількість маршрутів у плані кар'єру. В обох тематичних дослідженнях маємо справу з прогресуванням кар'єру в часі, призначаючи нульовий час циклу для тих маршрутів, які недоступні в певний період часу.

Перший варіант розв'язання задачі.

Задача реалізована за допомогою 14502 змінних (3672 цілих чисел) і 6858 обмежень. Алгоритм розділення додав ще 2380 обмежень сумісності.

Часи обчислень для одноразових розв'язків задачі з 7, 8 і 9 періодами представлені в таблиці 3.3. Отриманий розв'язок наведено на рис. 3.12.

Таблиця 3.3 - Підсумок результатів для перших розв'язків прикладу із змінними періодами

Періоди	Змінні	Обмеження	Час (с)	Якість	Розв'язання
7	9100	4242 + 2044	5331	оптимальне	1.88599×10^7
8	11648	5473 + 1484	12049	оптимальне	1.97785×10^7
9	14502	6858 + 2380	19477	3%	2.05244×10^7

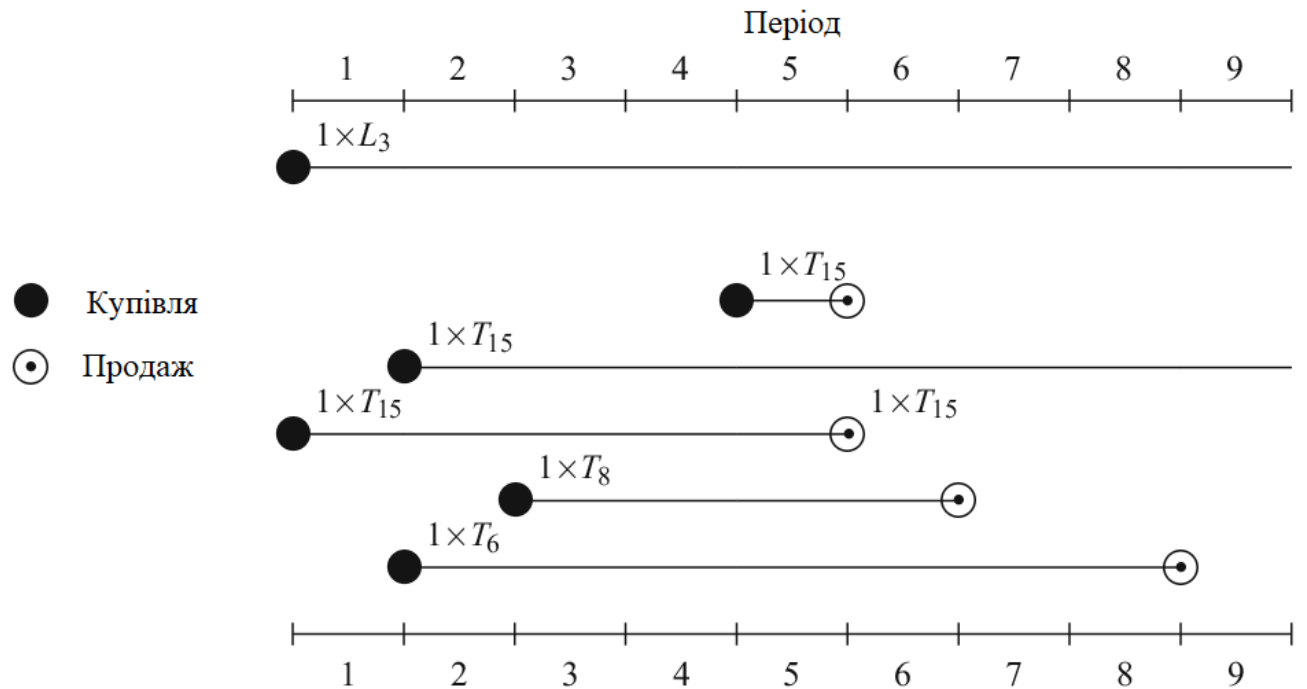


Рис. 3.12 - Перший практичний приклад 9-періодної політики закупівлі та ліквідації з амортизацією 50%

На рис 3.12 чорне коло позначає покупку, а порожнє коло зображує продаж обладнання. Для цього прикладу оптимальним рішенням було придбати один навантажувач третього типу та експлуатувати його протягом усіх дев'яти періодів. За 9 періодів закуплено лише п'ять вантажівок. Модель закупівель свідчить про різке збільшення потреб у виробництві в перші кілька періодів — на початку достатньо однієї вантажівки. Насправді це не було б прийнятним рішенням, тому що якщо ця вантажівка перебуває на ремонті, шахта більше не виробляє. Крім того, це означає, що навантажувач не використовується, поки вантажівка доставляє свій вантаж. У наступні два періоди закуповується ще три вантажівки. До четвертого періоду в автопарку працюють три типи вантажівок. Протягом п'ятого періоду

продуктивність наявних вантажівок впала настільки, що варто придбати нову. П'яту вантажівку рятують лише через 1 рік. Хоча це нереально, щоб вантажівка була продана лише через рік, цілком можливо, що вантажівка буде переміщена на іншу шахту, де потрібна відносно нова вантажівка. Вантажівки, що залишилися, поступово рятуються, оскільки потреби шахти зменшуються, залишаючи лише одну вантажівку до кінця останнього періоду.

Рішення щодо розподілу вантажівок представлено в таблиці 3.4. Важко визначити слабіну у розподілі обладнання, оскільки модель не мотивувала мінімальне значення використання, тобто розподіл вантажівок по місцях на більший час, ніж необхідно, не коштує більше (з точки зору значення цільової функції). Деякі маршрути приймають усі типи вантажівок у автопарку. Це може вплинути на тривалість циклу, оскільки деякі вантажівки будуть швидшими за інші або швидше обслуговуватимуться на навантажувачі. Однак цей рівень деталізації не враховано в нашій моделі. Рішення розподілу завантажувачів розділяє один завантажувач на два місця видобутку [Таблиця 7.3]. У деяких сценаріях видобутку, коли рух навантажувача по шахті заборонено, це рішення буде нереальним. Цілком ймовірно, що один вантажник у кожному місці є кращим. У цьому випадку легко додати обмеження, які відображають розділений на вузли потік для завантажувачів — наприклад, цього можна досягти за допомогою `forcTihnigs fcla,is,ke,mstu€dyZ`. здається малим відносно кількості періодів і кількість маршрутів і місць. Однак симетрія в цій проблемі, яка виникає через кількість ідентичного обладнання, яке може бути призначено для тих самих рішень, ускладнює її вирішення за допомогою параметрів за замовчуванням.

Таблиця 3.4 - Політика розподілу вантажівок на 9 періодів для кількох локацій, 50% амортизація

Маршрут	Період								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(a)	0.01 $T_{15}(1)$	0.14 $T_{15}(2)$	1.00 $T_6(1)$	0.44 $T_{15}(4)$	0.51 $T_8(3)$	0.51 $T_{15}(5)$	0.62 $T_{15}(6)$	0.89 $T_{15}(8)$	0.11 $T_{15}(8)$ 1.00 $T_{15}(9)$
(b)	0.99 $T_{15}(1)$	0.97 $T_6(1)$	0.58 $T_8(1)$	0.14 $T_{15}(3)$ 0.56 $T_{15}(4)$	0.88 $T_6(4)$	1.00 $T_8(4)$ 0.26 $T_{15}(5)$	1.00 $T_6(6)$ 0.74 $T_{15}(7)$	0.07 $T_6(7)$ 1.00 $T_{15}(7)$ 0.11 $T_{15}(8)$	0.74 $T_{15}(8)$
(c)			0.23 $T_{15}(2)$	0.24 $T_{15}(3)$	0.07 $T_8(3)$	0.23 $T_{15}(5)$ 0.21 $T_{15}(6)$	0.38 $T_{15}(6)$	0.19 $T_6(7)$	0.10 $T_{15}(8)$
(d)		0.03 $T_6(1)$ 1.00 $T_{15}(1)$ 0.86 $T_{15}(2)$	0.42 $T_8(1)$ 0.77 $T_{15}(2)$ 1.00 $T_{15}(3)$	0.62 $T_{15}(3)$ 1.00 $T_8(2)$ 0.44 $T_9(3)$	0.12 $T_6(4)$ 0.41 $T_8(3)$ 1.00 $T_{15}(1)$ 1.00 $T_{15}(4)$ 1.00 $T_{15}(5)$	1.00 $T_6(5)$ 0.79 $T_{15}(6)$	0.26 $T_{15}(7)$	0.73 $T_6(7)$	0.06 $T_{15}(8)$

де $xT_t(m)$ вказує, що x вантажівок типу t і віку m працюють на маршруті в даний період.

Таблиця 3.5 - 9-періодна політика розподілу навантажувача для першого прикладу, 50% амортизація

Маршрут	Період								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
(a)	0.01 $L_3(1)$	0.03 $L_3(2)$	0.07 $L_3(3)$	0.06 $L_3(4)$	0.09 $L_3(5)$	0.07 $L_3(6)$	0.08 $L_3(7)$	0.09 $L_3(8)$	0.10 $L_3(9)$
(b)	0.09 $L_3(1)$	0.36 $L_3(2)$	0.30 $L_3(3)$	0.24 $L_3(4)$	0.23 $L_3(5)$	0.33 $L_3(6)$	0.19 $L_3(7)$	0.20 $L_3(8)$	0.08 $L_3(9)$
(c)			0.05 $L_3(3)$	0.05 $L_3(4)$	0.01 $L_3(5)$	0.04 $L_3(6)$	0.05 $L_3(7)$	0.02 $L_3(8)$	0.01 $L_3(9)$
(d)		0.38 $L_3(2)$	0.39 $L_3(3)$	0.44 $L_3(4)$	0.47 $L_3(5)$	0.17 $L_3(6)$	0.02 $L_3(7)$	0.01 $L_3(8)$	0.01 $L_3(9)$

де $xL_l(m)$ вказує на те, що на маршруті в заданий період працює x вантажників типу l і віку m .

Другий варіант розв'язання задачі.

Розглядається кар'єр, що працює за системою транспортування вантажівкою та навантажувачем, і видобуває руду та відходи у кар'єрі.

Програма зі змішаним цілим числом містила 63433 змінних (5304 цілих) і 19366 обмежень; ми створили 13-періодну задачу лише з 15571 обмеженнями до того, як були враховані обмеження сумісності.

Таблиця 3.6 показує кількість обмежень, які були додані алгоритмом розділення в цілому для повної задачі та версій задачі зі скороченою довжиною розкладу (а саме, 10, 11 і 12 років).

Таблиця 3.6 - Підсумок результатів для другого прикладу з амортизацією 50% і 13 періодами

Періоди	Змінні	Обмеження	Час (с)	Якість %	Розв'язання
10	39855	9814 + 3319	5643	3	1.26292×10^8
11	47166	11599 + 3043	3979	3	1.31263×10^8
12	55032	13521 + 4043	17656	3	1.37168×10^8
13	63433	15571 + 3795	26662	3	1.37249×10^8

Після 7,5 годин роботи алгоритму ми отримали рішення в межах 3% від оптимального рішення для прикладу 50% амортизації. Коли алгоритму дозволялося працювати протягом більш тривалого періоду, пам'ять комп'ютера вичерпувалась. Однак це задовільний розрив оптимальності для цієї програми, як проілюструємо пізніше ретроспективним порівнянням рішень.

Політика купівлі та утилізації для цього кар'єру з кількома локаціями ускладнюється вимогами до потужності, які містять кілька значних змін від періоду до періоду. Це призводить до короткострокового володіння деякими вантажівками. Наприклад, вантажівка типу 8 була придбана в періоді 8 і врятована на початку періоду 9. Повна політика закупівлі та ліквідації наведена на рис. 3.13, де вже існуюче обладнання позначено індексом P.

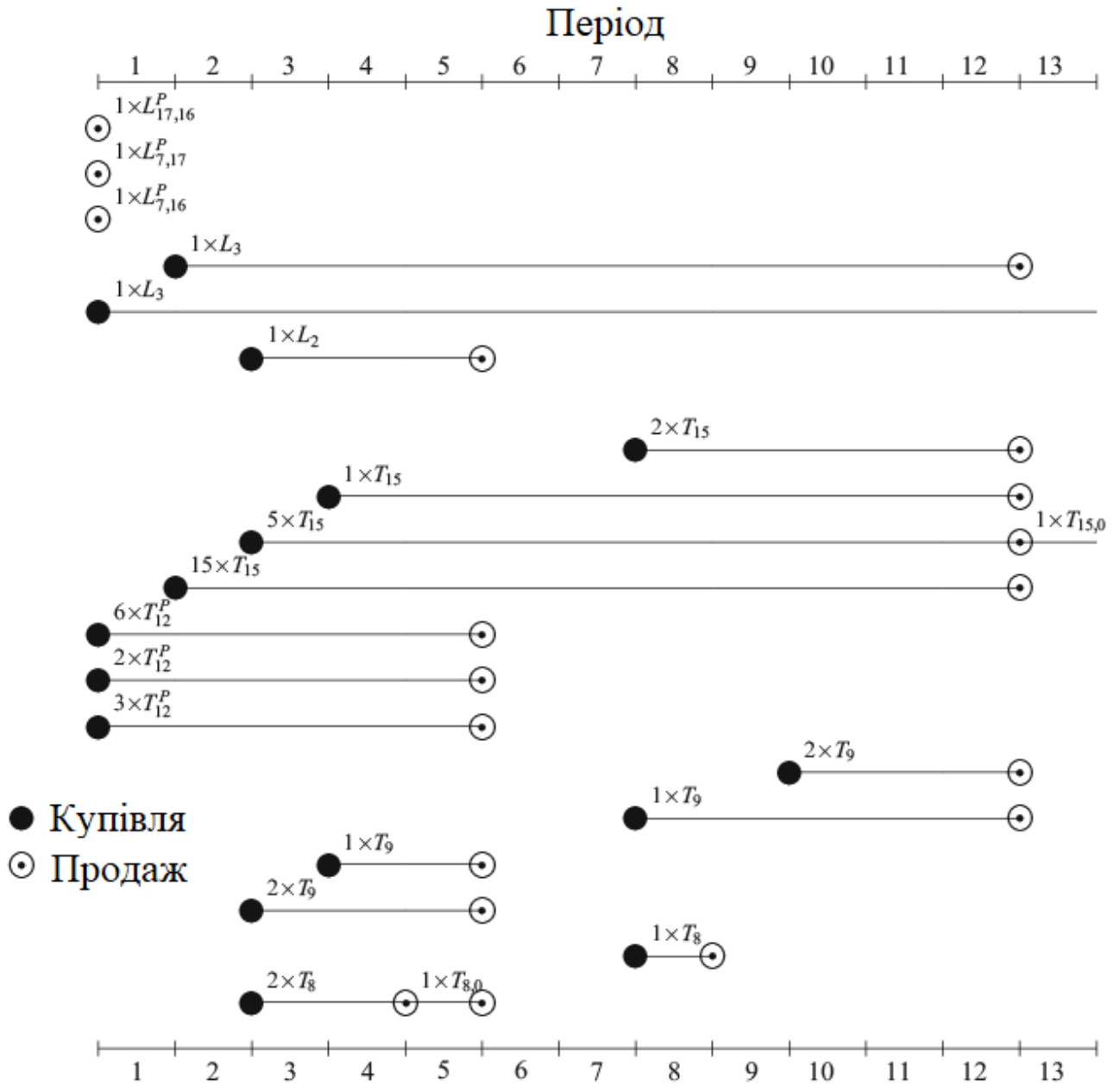


Рис. 3.13 - 3% оптимальне 13-періодне рішення для прикладу два з параметром амортизації, встановленим на 50%

Політика розподілу наведена в таблицях 3.7, 3.8, 3.9 і 3.10. У політиці розподілу для цього прикладу представляємо вік обладнання в дужках як інструмент відстеження обладнання. Оскільки вік обладнання є чинником у вартості експлуатації обладнання, важливо визначити правильний вік обладнання відповідно до політики.

Таблиця 3.7 - Політика розподілу вантажівок для другого прикладу з 13 періодами та 50% амортизацією (перші 7 періодів)

Маршрут	Період						
	1	2	3	4	5	6	7
(a)	1.81 $T_{12}(8)$ 6.00 $T_{12}(12)$						
(b)	0.35 $T_{12}(8)$						
(c)	0.17 $T_{12}(8)$	9.42 $T_{15}(1)$	6.00 $T_{12}(14)$ 0.97 $T_{15}(1)$				
(d)	2.00 $T_{12}(9)$	5.90 $T_{12}(13)$	0.68 $T_{12}(10)$ 2.00 $T_{12}(11)$				
(e)	0.05 $T_{12}(8)$	0.18 $T_{12}(9)$ 0.09 $T_{12}(13)$	3.70 $T_{15}(1)$	2.65 $T_9(2)$ 1.50 $T_8(2)$ 6.73 $T_{15}(3)$	0.42 $T_{12}(13)$ 6.00 $T_{12}(16)$		
(f)	0.61 $T_{12}(8)$	2.32 $T_{12}(9)$ 2.00 $T_{12}(10)$ 4.87 $T_{15}(1)$	2.00 $T_9(1)$ 2.32 $T_{12}(10)$ 0.32 $T_{15}(1)$ 15.0 $T_{15}(2)$ 0.99 $T_8(1)$	1.00 $T_9(1)$ 2.00 $T_9(2)$ 3.00 $T_{12}(11)$ 1.97 $T_{12}(12)$ 6.00 $T_{12}(15)$	3.00 $T_{12}(12)$ 1.58 $T_{12}(13)$ 1.00 $T_{15}(2)$ 5.00 $T_{15}(3)$ 0.67 $T_{15}(4)$		
(g)		0.31 $T_{15}(1)$					
(h)		0.40 $T_{15}(1)$	1.00 $T_8(1)$				
(i)		0.50 $T_{12}(9)$					
(j)				0.50 $T_8(2)$ 0.03 $T_{12}(12)$	2.67 $T_{15}(4)$	12.84 $T_{15}(5)$	13.115 $T_{15}(6)$
(k)				1.00 $T_{15}(1)$ 5.00 $T_{15}(2)$ 8.27 $T_{15}(3)$	11.7 $T_{15}(4)$	1.00 $T_{15}(3)$ 4.26 $T_{15}(4)$ 2.16 $T_{15}(5)$	1.00 $T_{15}(4)$ 5.00 $T_{15}(5)$ 1.59 $T_{15}(6)$
(l)						0.74 $T_{15}(4)$	
(m)							0.30 $T_{15}(6)$

де $xT_t(m)$ вказує, що x вантажівок типу t і віку m працюють на маршруті в заданий період.

Таблиця 3.8 - Політика розподілу вантажівок для другого прикладу з 13 періодами та 50% амортизацією (останні 6 періодів)

Маршрут	Період					
	8	9	10	11	12	13
(a)						
(b)						
(c)						
(d)						
(e)		1.00 $T_9(2)$ 15.00 $T_{15}(8)$	1.00 $T_{15}(7)$ 5.00 $T_{15}(8)$ 6.85 $T_{15}(9)$	2.00 $T_9(2)$ 1.00 $T_9(4)$ 2.00 $T_{15}(4)$ 1.00 $T_{15}(8)$ 5.00 $T_{15}(9)$ 0.83 $T_{15}(10)$	2.00 $T_9(3)$ 1.00 $T_9(5)$ 0.72 $T_{15}(5)$ 1.00 $T_{15}(9)$	0.01 $T_{15}(11)$
(f)		2.00 $T_{15}(2)$ 1.00 $T_{15}(6)$ 5.00 $T_{15}(7)$	2.00 $T_9(1)$ 1.00 $T_9(3)$ 2.00 $T_{15}(3)$ 8.15 $T_{15}(9)$	14.2 $T_{15}(10)$	6.16 $T_{15}(11)$	0.99 $T_{15}(11)$
(g)						
(h)						
(i)						
(j)	1.00 $T_8(1)$ 1.00 $T_9(1)$ 10.6 $T_{15}(7)$				1.28 $T_{15}(5)$ 6.43 $T_{15}(11)$	
(k)	2.00 $T_{15}(1)$ 1.00 $T_{15}(5)$ 5.00 $T_{15}(6)$ 4.37 $T_{15}(7)$				5.00 $T_{15}(10)$ 2.41 $T_{15}(11)$	
(l)						
(m)						

де $xT_t(m)$ вказує, що x вантажівок типу t і віку m працюють на маршруті в заданий період.

Таблиця 3.9 - Політика розподілу навантажувача для другого прикладу з 13 періодами та 50% амортизацією (перші 7 періодів)

Місце	Період						
	1	2	3	4	5	6	7
M1	0.13 $L_3(1)$						
M2	0.04 $L_3(1)$	0.70 $L_3(1)$	0.43 $L_3(3)$				
M3	0.12 $L_3(1)$	0.21 $L_3(1)$ 0.76 $L_3(2)$	0.51 $L_2(1)$ 1.00 $L_3(2)$ 0.56 $L_3(3)$	1.00 $L_2(2)$ 0.93 $L_3(4)$	0.33 $L_2(3)$ 1.00 $L_3(4)$		
M4		0.26 $L_3(1)$					
S1		0.01 $L_3(1)$	0.05 $L_2(1)$				
S2		0.05 $L_3(1)$					
S3				0.73 $L_3(3)$	0.67 $L_2(3)$ 0.68 $L_3(5)$	0.93 $L_3(5)$ 0.13 $L_3(6)$	0.89 $L_3(6)$
S4							0.03 $L_3(6)$

де $xL_l(m)$ вказує на те, що на маршруті в заданий період працює x вантажників типу l і віку m .

Таблиця 3.10 - Політика розподілу навантажувачів для другого прикладу з 13 періодами та 50% амортизацією (останні 6 періодів) Місця Період 8

Місце	Період					
	8	9	10	11	12	13
M1						
M2						
M3		0.34 $L_3(8)$ 0.97 $L_3(9)$	0.38 $L_3(9)$ 1.00 $L_3(10)$	0.26 $L_3(10)$ 1.00 $L_3(11)$	0.47 $L_3(12)$	0.01 $L_3(13)$
M4						
S1						
S2						
S3	0.13 $L_3(7)$ 1.00 $L_3(8)$				0.07 $L_3(11)$ 0.53 $L_3(12)$	
S4						

де $xL_l(m)$ вказує на те, що на маршруті в заданий період працює x вантажників типу l і віку m .

У остаточних рішеннях для тематичних досліджень модель вибрала 3 і 4 типи вантажівок відповідно. Однак у промисловості вважається незвичайним мати більше трьох типів вантажівок, і, як правило, ця кількість виникає лише через наявне обладнання. Це свідчить про те, що моделі не відображають справжніх штрафів, пов'язаних із постійними витратами на володіння різними типами обладнання, або навпаки, що міркування щодо однорідного чи невеликого поєднання парку потребують подальшого обґрунтування.

Крім того, використання різних типів вантажівок на одному маршруті може вплинути на точність часу циклу через групування обладнання. Цю проблему зазвичай вирішують під час диспетчеризації обладнання, але в ідеалі її слід враховувати під час вибору обладнання, тобто для врахування інтерактивного ефекту вибраного обладнання. Неочевидно, як включити це в поточну детерміновану програму змішаних цілих чисел, але це викликає цікаве питання для майбутніх досліджень.

Оскільки деякі дані для тематичних досліджень були обмеженими або невідомими (наприклад, вимога до запасів мати власні завантажувачі або коли локації видобуваються одночасно протягом певного періоду), рішення, створені нашою моделлю, іноді вимагають, щоб один завантажувач переміщався з одного розташування в інше. Це може бути нереалістичним і в цьому випадку може бути виправлено шляхом дотримання обмежень цілісності на змінних рішення завантажувача.

У першому прикладі було набагато менше маршрутів, ніж у другому, що зробило загальний розмір проблеми значно меншим. Однак цю проблему все ще було важко вирішити, що демонструє складність розрізнення подібних одиниць обладнання протягом довгострокових графіків. Проблема демонструє велику кількість симетрії, яка, якщо її розглянути, приведе до швидшого часу вирішення.

Однією з форм перевірки є порівняння наших рішень із фактичним рішенням, реалізованим у шахті. Нам пощастило отримати цю інформацію для другого з двох прикладів. Ми не знаємо повного процесу створення галузевих рішень, які ми тут

представляємо. Однак на основі обговорень із нашим партнером у поєднанні з нашим знанням літератури ми опишемо наше розуміння процесу.

Для другого прикладу нам було надано три варіанти вибору обладнання. Перше і найдешевше рішення було створено на основі внутрішньої електронної таблиці вибору обладнання. Ця електронна таблиця не розроблена для врахування змішаних автопарків, тобто всі вибрані вантажівки мають бути сумісні з усіма навантажувачами. Крім того, парк вантажівок має бути однорідним. Електронна таблиця функціонувала, спочатку вибираючи завантажувачі, мінімізуючи вартість експлуатації таким чином, щоб відповідати обмеженням ємності. Потім рівняння коефіцієнта збігу було використано для визначення найкращого розміру парку вантажівок, тип яких був заздалегідь визначений існуючим парком вантажівок.

Це рішення зберегло один навантажувач 34 тони, але врятувало інші два існуючі навантажувачі.

Було придбано два нових 40-тонних навантажувача, щоб відповідати обмеженням потужності. Існуючий парк вантажівок було збережено, а інші вантажівки (того самого типу) були додані в першому періоді (п'ять вантажівок), другому періоді (дві вантажівки) та п'ятому періоді (одна вантажівка). Ця політика відбору коштувала 1,51483 дол. США \times 108 (з використанням нашої цільової функції) для повного графіка з 13 періодів.

Для порівняння, наш поліс заощадив 14 234 000 доларів США — економія 9,4%.

Друге рішення, надане галузевим партнером, містило таку саму політику купівлі та утилізації вантажівок. Однак менеджер з підбору обладнання вважав, що всі навантажувачі потрібно врятувати, а натомість придбати новий навантажувач 42Т і два 57Т. У цьому рішенні вибір навантажувачів обмежений тим, що вони мають бути сумісними з наявним парком вантажівок. Ця політика дала вартість \$1,55241 \times 108. Для порівняння наше рішення заощадило 17 992 000 доларів США або 11,6%.

Порівняно запропоноване рішення заощадило 29 301 000 доларів США або 17,6%.

Висновки до розділу 3

1. Побудовано цілочисельну швидку обчислювальну програму, яка може значно перевершити промислові рішення. Забезпечення сумісності багатьох типів обладнання є унікальним аспектом цієї моделі, який надає більшу свободу для менеджера з вибору обладнання з двох причин: менеджер може розглянути можливість придбання обладнання, яке відрізняється від будь-якого з існуючого парку; керівник може розглянути можливість придбання змішаних парків, які краще відповідають вимогам продуктивності шахти, і, отже, можуть досягти нижчих операційних витрат.
2. Можливість включити вже існуюче обладнання в процес вибору обладнання є новим для гірничодобувної промисловості.
3. Перевага цієї моделі полягає в тому, що вона розподіляє експлуатаційні витрати між дужками. Тобто протягом одного періоду, якщо частина обладнання переходить до наступної вікової категорії (відносно свого віку), то експлуатаційні витрати відобразатимуть це пропорційно.
4. Встановлено, що більш велике обладнання вважається надто дорогим, щоб вибирати його постійно. Натомість рішення спрямовані на обладнання помірного розміру, яке може адаптуватися до мінливих вимог до продуктивності та часу циклу вантажівки. Цей результат свідчить про те, що більші машини забезпечують економічну вигоду, лише якщо їх можна повністю використовувати протягом усього періоду.
5. Розглянуто проблему вибору вантажівок та навантажувачів для відкритих кар'єрів у масштабній програмі змішаних цілих чисел, розробивши попередню обробку та застосувавши алгоритм поділу для покращення прохідності. Використано постійну змінну розподілу, яка запропонувала оптимальну частину парку, яка повинна працювати в кожному місці. Ці змінні створили гнучку політику розподілу разом із політикою купівлі та ліквідації, згенерованою моделлю. Це корисний

інструмент для гірничих інженерів, які можуть сприймати політику розподілу як додатковий доказ того, що вибраний парк зможе виконувати необхідні завдання в умовах невизначеності, або просто використовувати політику як керівництво для керування парком.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розв'язано актуальне науково-технічне завдання, що полягає в дослідженні вибору сумісних, але не обов'язково однорідних одиниць обладнання для видобутку та транспортування (самоскидів та екскаваторів) на відкритих гірничих роботах.

1. Для гірничодобувної промисловості коефіцієнт відповідності є важливим індикатором ефективності, який було розширено для кількох ймовірних обставин, включаючи неоднорідні парки вантажівок і навантажувачів із кількома маршрутами. Коефіцієнт відповідності можна використовувати для оптимізації часу циклу вантажівки з метою отримання максимальної ефективності від вибраного парку. Крім того, керівники проектів можуть використовувати формулу коефіцієнта відповідності, щоб визначити ідеальну кількість вантажівок у автопарку. Формули, представлені в цьому розділі, менш обмежені у виборі обладнання, вибирають змішані парки відповідно до вимог продуктивності та мінімізують витрати на транспортування матеріалів.
2. Встановлено, що коефіцієнт відповідності виключає час очікування та черги для вантажівок і навантажувачів. Це може бути тому, що час очікування парку вантажівок важко оцінити, попередньо не знаючи розміру парку вантажівок. Однак, якщо використовується коефіцієнт відповідності як індекс загальної ефективності парку, тоді прийнятно включати час очікування, який було оцінено іншими методами.
3. Розроблено залежності, що забезпечують більшу точність у випадках, коли змішані парки працюють разом, та які можна легко реалізувати в програмному забезпеченні для роботи з електронними таблицями.
4. Побудовано цілочисельну швидку обчислювальну програму, яка може значно перевершити промислові рішення. Забезпечення сумісності багатьох типів обладнання є унікальним аспектом цієї моделі, який надає більшу свободу для менеджера з вибору обладнання з двох причин: менеджер може

розглянути можливість придбання обладнання, яке відрізняється від будь-якого з існуючого парку; керівник може розглянути можливість придбання змішаних парків, які краще відповідають вимогам продуктивності шахти, і, отже, можуть досягти нижчих операційних витрат.

5. Можливість включити вже існуюче обладнання в процес вибору обладнання є новою для гірничодобувної промисловості.
6. Перевага цієї моделі полягає в тому, що вона розподіляє експлуатаційні витрати між дужками. Тобто протягом одного періоду, якщо частина обладнання переходить до наступної вікової категорії (відносно свого віку), то експлуатаційні витрати відобразатимуть це пропорційно.
7. Встановлено, що більш велике обладнання вважається надто дорогим, щоб вибирати його постійно. Натомість рішення спрямовані на обладнання помірного розміру, яке може адаптуватися до мінливих вимог до продуктивності та часу циклу вантажівки. Цей результат свідчить про те, що більші машини забезпечують економічну вигоду, лише якщо їх можна повністю використовувати протягом усього періоду.
8. Розглянуто проблему вибору вантажівок та навантажувачів для відкритих кар'єрів у масштабній програмі змішаних цілих чисел, розробивши попередню обробку та застосувавши алгоритм поділу для покращення прохідності. Використано постійну змінну розподілу, яка запропонувала оптимальну частину парку, яка повинна працювати в кожному місці. Ці змінні створили гнучку політику розподілу разом із політикою купівлі та ліквідації, згенерованою моделлю. Це корисний інструмент для гірничих інженерів, які можуть сприймати політику розподілу як додатковий доказ того, що вибраний парк зможе виконувати необхідні завдання в умовах невизначеності, або просто використовувати політику як керівництво для керування парком.