

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи

на здобуття освітньо-кваліфікаційного рівня магістра
зі спеціальності 184 “Гірництво” ОПП «Відкриті гірничі роботи»

На тему: **«Дослідження шляхів підвищення ефективності експлуатації
екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар’єрів»**

Виконав ст. групи ГІВ-24-1м _____

/Кононенко А.Я./

Керівник _____

/Григор’єв Ю.І./

Завідувач кафедри _____

/Жуков С.О./

Кривий Ріг

2025 р.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Дослідження шляхів підвищення ефективності експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів» викладена на 60 стр., містить 10 рис., 3 таблиці, 42 джерела літератури.

Актуальність теми зумовлена стрімким ускладненням умов ведення відкритих гірничих робіт у глибоких кар'єрах: зростають відстані транспортування і висоти підйому, посилюються вимоги до стабілізації якості вантажопотоків. На фоні високої вартості пального, логістичних ризиків і зношеності парку техніки саме екскаваторно-автомобільний комплекс у великій мірі визначає техніко-економічну результативність відкритих гірничих робіт. Тому науково обґрунтований вибір схеми функціонування екскаваторно-автомобільного комплексу і його параметрів є первинною передумовою конкурентоспроможності гірничо-видобувних підприємств.

Разом із тим, наявні практики організації робіт часто спираються на спрощені умови експлуатації, які не враховують непередбачувані зміни транспортних циклів, неоднорідність трас і часову мінливість попиту на окремих ділянках, а також аварійні ситуації при експлуатації виймально-навантажувального обладнання. Практичний досвід показує, що вирішення подібних проблем виконується у ручному режимі. Бракує узгодженого підходу, який би поєднував балансні оцінки пропускної здатності, аналітичний добір складу парку та кількісне зіставлення відкритих і закритих схем з урахуванням збурень. Заповнення цієї методичної прогалини дає змогу перейти від інтуїтивних рішень до формалізованого управління екскаваторно-автомобільним комплексом.

Таким чином, дослідження, спрямоване на дослідження шляхів підвищення ефективності експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів є надзвичайно важливим і актуальним.

Мета й завдання роботи. Метою даного магістерського дослідження є наукове обґрунтування оптимальних параметрів експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані **основні задачі дослідження:**

1. Виконати аналіз досвіду експлуатації діючих екскаваторно-автомобільних комплексів.
2. Проаналізувати досвід впровадження систем диспетчеризації у глибоких кар'єрах.
3. Визначити раціональну схему роботи екскаваторно-автомобільного комплексу і оптимальні параметри його функціонування.

Об'єкт дослідження – екскаваторно-автомобільні комплекси глибоких кар'єрів.

Предмет дослідження – взаємозв'язки параметрів функціонування екскаваторно-автомобільних комплексів.

Ідея. Підвищити ефективність процесу виймально-навантажувальних і транспортних робіт в забійній зоні глибоких кар'єрів за рахунок обґрунтованого вибору параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів.

Методи дослідження. Критичний аналіз і синтез літературних джерел та системний аналіз функціонування екскаваторно-автомобільних комплексів у глибоких кар'єрах; методи математичного моделювання – для встановлення залежностей параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу з елементами теорії масового обслуговування (закон Літтла).

Наукове значення роботи полягає у аналізі теорії і практики виймально-навантажувальних і транспортних робіт, а також математичному

обґрунтуванні оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів.

Практичне значення роботи полягає у встановленні оптимальних параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів і кількісній оцінці використання закритої і відкритої схем диспетчеризації рухомого складу автомобільного транспорту.

АВТОСАМОСКИД, ЕКСКАВАТОР, ТРИВАЛІСТЬ ЦИКЛУ,
ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЯ, ГЛИБОКІ КАР'ЄРИ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСВІДУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ	8
1.1 Дослідження загальних особливостей експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів	8
1.2 Аналіз факторів, що визначають умови експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів	11
1.3 Аналіз парку виймально-навантажувального і транспортного обладнання в умовах кар'єрів Кривбасу	17
РОЗДІЛ 2. ВИВЧЕННЯ ДОСВІДУ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ НА КАР'ЄРАХ	24
2.1 Підприємства Кривбасу (кар'єри групи “Метінвест” та ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»)	24
2.2 Рудник Assarel-Medet (Болгарія)	26
2.3 Золоторудні кар'єри Golden Queen (США) та Salares Norte (Чилі)	28
2.4 Кар'єр Кідашан (Ansteel Group, КНР): диспетчеризація на основі динамічного шихтування руди	30
2.5 Моделі з мережевими потоками та цілочисловим програмуванням	33
2.6 Агентно-орієнтовані та розподілені системи диспетчеризації	34
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ	39
ВИСНОВКИ	52
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	55

ВСТУП

Розвиток гірничодобувної промисловості України, зокрема підприємств Криворізького залізорудного басейну, безпосередньо пов'язаний із забезпеченням стабільного та економічно обґрунтованого видобутку корисних копалин у глибоких кар'єрах. За умов поступового вичерпання багатих приповерхневих запасів і переходу до відпрацювання нижніх горизонтів різко зростає обсяг розкривних робіт, подовжуються транспортне плече та час циклу перевезень, ускладнюються гірничо-геологічні й гірничо-технічні умови. У цих умовах екскаваторно-автомобільні комплекси залишаються базовою ланкою технологічної схеми відкритої розробки й одночасно – головним споживачем паливно-енергетичних ресурсів та джерелом значної частки експлуатаційних витрат.

Відомо, що частка витрат на навантажувально-транспортні процеси у собівартості видобутку гірничої маси в глибоких кар'єрах може сягати критичних значень, особливо за наявності протяжних внутрішньокар'єрних автодоріг зі складним профілем, інтенсивного зносу шин і ходових частин машин, сезонного погіршення стану колійної мережі. Додатковими викликами є необхідність дотримання вимог промислової безпеки, екологічних обмежень, а також інтеграція підприємств у сучасні логістичні ланцюги постачання сировини металургійним комбінатам. За таких умов просте нарощування парку техніки вже не забезпечує підвищення ефективності: ключового значення набуває раціональна організація роботи екскаваторно-автомобільних комплексів, узгодження параметрів і режимів функціонування усіх елементів системи «екскаватор – автосамоскид – кар'єрна дорога – пункт приймання гірничої маси».

Таким чином, актуальність теми даної магістерської роботи зумовлена необхідністю поєднати аналіз реального досвіду експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів у глибоких кар'єрах із обґрунтуванням техніко-організаційних рішень, які забезпечують підвищення ефективності їхньої

роботи. Особливий інтерес становлять умови кар'єрів Кривбасу, де поєднуються значні глибини, складна морфологія кар'єрних полів, розгалужені транспортні комунікації та високі вимоги до стабільності постачання руди на збагачувальні фабрики. Для таких кар'єрів питання оптимізації параметрів ЕАК і раціональної схеми їх функціонування є не лише науковою проблемою, а й практичним завданням забезпечення конкурентоспроможності підприємств.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ДОСВІДУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Дослідження загальних особливостей експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів

Особливістю експлуатації ЕАК у глибоких кар'єрах є поєднання великої кількості взаємопов'язаних факторів: потужність і залягання корисної копалини, міцнісні властивості породного масиву, конфігурація робочих майданчиків і трасування внутрішньокар'єрних доріг, конструктивні та експлуатаційні параметри екскаваторів і автосамоскидів, схема організації вибухових робіт, погодні умови тощо. Значна частина цих факторів має стохастичний характер і проявляється у вигляді нерівномірності подачі автосамоскидів до забою, коливань продуктивності, непередбачуваних простоїв через технічні відмови та організаційні затримки. У результаті фактичні показники роботи комплексу часто помітно відхиляються від розрахункових, що призводить до перевитрат пального, зниження коефіцієнтів використання машинного часу, недовиконання змінних завдань.

За останні роки широкого поширення набули системи диспетчеризації кар'єрного автотранспорту, які дозволяють у режимі реального часу відстежувати місцезнаходження техніки, формувати завдання для автосамоскидів, оптимізувати маршрути руху та зменшувати час простоїв у черзі під навантаженням або розвантаженням. Однак впровадження навіть сучасних інформаційно-керуючих систем не розв'язує автоматично всього комплексу проблем. Ефект від диспетчеризації істотно залежить від початкової раціональності прийнятих технічних рішень: складу і параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу, вибору типорозмірів обладнання, організаційної схеми обслуговування забоїв, структури змінного завдання. Якщо сам комплекс спроектовано нерівномірно (наприклад, кількість автосамоскидів завідомо завелика або замала щодо продуктивності

екскаваторів, а обсяги робіт не узгоджені з пропускнуою спроможністю доріг), то навіть найкраща система диспетчеризації працюватиме в режимі постійного «латання» технологічних вузьких місць.

Екскаваторно-автомобільний комплекс є базовою ланкою технологічної системи відкритої розробки родовищ, у якій зосереджено основні обсяги виймально-навантажувальних і транспортних робіт. Він поєднує в єдиному виробничому циклі фронт виїмки (екскаватор), внутрішньокар'єрну транспортну мережу (автодороги) та пункти приймання гірничої маси (перегрузочні склади, дробарні, відвали) [1–3]. Саме на рівні ЕАК проявляється взаємозалежність технічних параметрів машин, гірничо-геологічних умов, організації робіт і методів управління, що визначає кінцеву продуктивність кар'єру, собівартість видобутку та рівень енергоємності процесів.

Типовий ЕАК включає:

- один або кілька фронтів виїмки, обладнаних екскаваторами (ковшові, гідравлічні, драглайни тощо);
- парк автосамоскидів різної вантажопідйомності, які забезпечують вивезення гірничої маси;
- мережу внутрішньокар'єрних доріг із системою постійних та тимчасових з'їздів;
- пункти розвантаження (відвали, дробильно-сортувальні установки, залізничні чи конвеєрні перегрузочні вузли) [2; 4].

Робота комплексу має циклічний характер: підготовка забою – виїмка гірничої маси – навантаження автосамоскидів – рух завантаженого рухомого складу до пункту приймання – розвантаження – повернення порожніх автосамоскидів до забою. При цьому кожна ланка циклу є потенційним джерелом простоїв, а узгодження тривалості операцій визначає рівень використання як екскаваторів, так і автосамоскидів [1; 5]. Схема руху транспорту по Глеюватському кар'єру наведена на рис. 1.1.

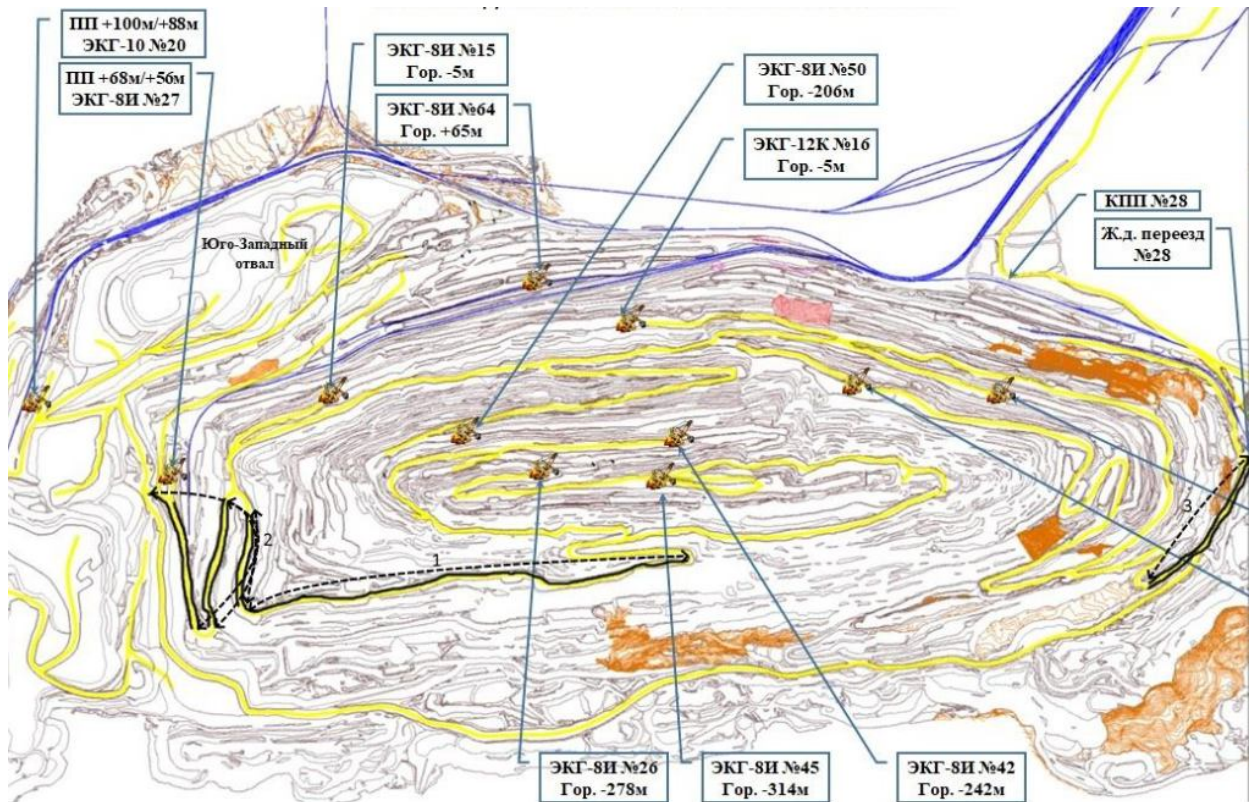


Рис. 1.1 – Схема руху транспорту Глеюватського кар'єра

Загальною вимогою до ЕАК є забезпечення такого співвідношення «екскаватор–автосамоскиди», за якого:

- екскаватор працює в режимі мінімальних простоїв через відсутність транспорту;
- автосамоскиди мають мінімальні простої в черзі під навантаженням і розвантаженням;
- дотримуються задані якісні параметри руди (шихтування) та добові обсяги видобутку [4; 6].

У практиці відкритих гірничих робіт застосовують дві принципові схеми організації руху автотранспорту:

1. Закритий (замкнений) цикл, коли група автосамоскидів закріплюється за конкретним екскаватором і працює за фіксованим маршрутом «забій – пункт розвантаження – забій». Така схема проста для планування, але часто

супроводжується значними простоями або екскаватора (нестача машин), або автосамоскидів (надлишок парку) [2; 7].

2. Відкритий цикл, за якого автосамоскиди динамічно перерозподіляються між екскаваторами залежно від поточної ситуації. Реалізація цієї схеми потребує наявності системи диспетчеризації та оперативної інформації про черги, стан доріг, технічну готовність машин, однак дозволяє зменшити дисбаланс у завантаженні окремих ланок комплексу [5; 8].

Сучасні системи диспетчеризації, побудовані на основі GPS-моніторингу та оптимізаційних або штучно-інтелектуальних алгоритмів, забезпечують прийняття рішень щодо направлення кожного автосамоскида до того чи іншого екскаватора або пункту розвантаження, мінімізуючи час очікування та відхилення від запланованих потоків руди [5; 9; 10]. У таких умовах екскаваторно-автомобільний комплекс розглядається як єдина система масового обслуговування з елементами випадковості у виникненні заявок (прибуття самоскидів під навантаження) та тривалості обслуговування (часи навантаження, руху, розвантаження) [6; 7].

1.2 Аналіз факторів, що визначають умови експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів

Загальні особливості експлуатації ЕАК визначаються сукупністю факторів, які у сучасних дослідженнях прийнято групувати на гірничо-технічні, технологічні, дорожньо-транспортні, кліматичні та організаційні [2; 3; 11]. Такий підхід узагальнює міжнародний досвід дослідження відкритих гірничих робіт і дозволяє системно аналізувати роботу комплексу.

Гірничо-технічні фактори включають:

- геометрію кар'єру (глибину, конфігурацію борту, схему розташування робочих майданчиків);

- схему транспортних комунікацій (тип з'їздів – спіральні, петльові, прямі, комбіновані, скользячі);
- середнє та екстремальні значення висоти підйому/спуску гірничої маси;
- фізико-механічні властивості корисної копалини й порід (густина, міцність, абразивність, коефіцієнт розпушення, вологість, кут природного укосу) [2; 12].

Зі збільшенням глибини кар'єру зростають транспортні плечі та енерговитрати на підйом гірничої маси, ускладнюються умови провітрювання й пилогазовий режим, посилюються вимоги до стійкості бортів і безпечних параметрів доріг [1; 11]. Це призводить до зменшення середньої технічної швидкості автосамоскидів, збільшення часу рейсу та, як наслідок, до підвищення чутливості ЕАК до простоїв і нерівномірності подачі транспорту під навантаження.

Технологічні фактори пов'язані зі схемою ведення гірничих робіт і параметрами основного устаткування:

- тип і продуктивність екскаваторів, об'єм ковша та структура циклу виїмки;
- схема буропідричних робіт, що визначає крупність розвалу та умови черпання;
- тип і вантажопідйомність автосамоскидів, тип трансмісії, динамічні та енергоекономічні характеристики;
- співвідношення об'єму ковша екскаватора та місткості кузова самоскида (бажано 4–6 ковшів на одну повну загрузку) [1; 4; 6].

Невідповідність параметрів екскаватора та автотранспорту (надто великий ковш для малотоннажного самоскида або навпаки) призводить до зростання простоїв, підвищеного зносу обладнання, нераціонального використання потужності двигунів і погіршення паливної економічності [4; 9].

Дорожньо-транспортні фактори включають:

- профіль і план внутрішньокар'єрних доріг (ухили, радіуси кривих, довжина прямих ділянок);
- тип і стан дорожнього покриття (грунтове, щебене, посилене, обледеніння, колійність);
- організацію руху (односмуговий/двосмуговий, роз'їзні кишені, зони обгону);
- наявність і параметри вузьких місць (мости, переїзди, стики з залізничним транспортом тощо) [1; 13].

Відомо, що погіршення стану доріг (нерівності, розмокання, ожеледь) знижує допустимі швидкості руху, збільшує час рейсу та витрату пального, призводить до прискореного зносу шин і ходових частин машин. У свою чергу це підвищує ризик позапланових відмов транспорту, що безпосередньо впливає на ритмічність роботи ЕАК [2; 13].

Кліматичні фактори (температура, опади, вітровий режим, туманність, тривалість періодів із негативними температурами) зумовлюють сезонну нерівномірність техніко-експлуатаційних показників комплексу [2; 11]:

- за високих температур погіршується ефективність охолодження двигунів, зростає ймовірність перегрівання агрегатів, збільшуються запиленість повітря та інтенсивність зносу фільтрів;
- за низьких температур погіршується стан дорожнього покриття, зростає жорсткість шин і витрата пального на прогрівання, підвищується частота відмов гідравлічних та електричних систем;
- інтенсивні опади спричиняють розмокання ґрунтів, формування колій, зменшення коефіцієнта зчеплення колеса з дорогою та, відповідно, зниження безпечних швидкостей руху.

Організаційні фактори пов'язані з плануванням виробництва й системою управління:

- точність добових і змінних планів видобутку й транспортування;

- система технічного обслуговування і ремонту (ТОіР) автотранспорту й екскаваторів;
- кваліфікація персоналу, дисципліна виконання маршрутних завдань;
- рівень автоматизації планування й диспетчерського управління [8; 9; 14].

Нерівномірність експлуатації автомобільного парку може бути проілюстрована динамікою показників його роботи, що наведена на рис. 1.2, а також циклограмою руху рухомого складу – на рисунку 1.3.

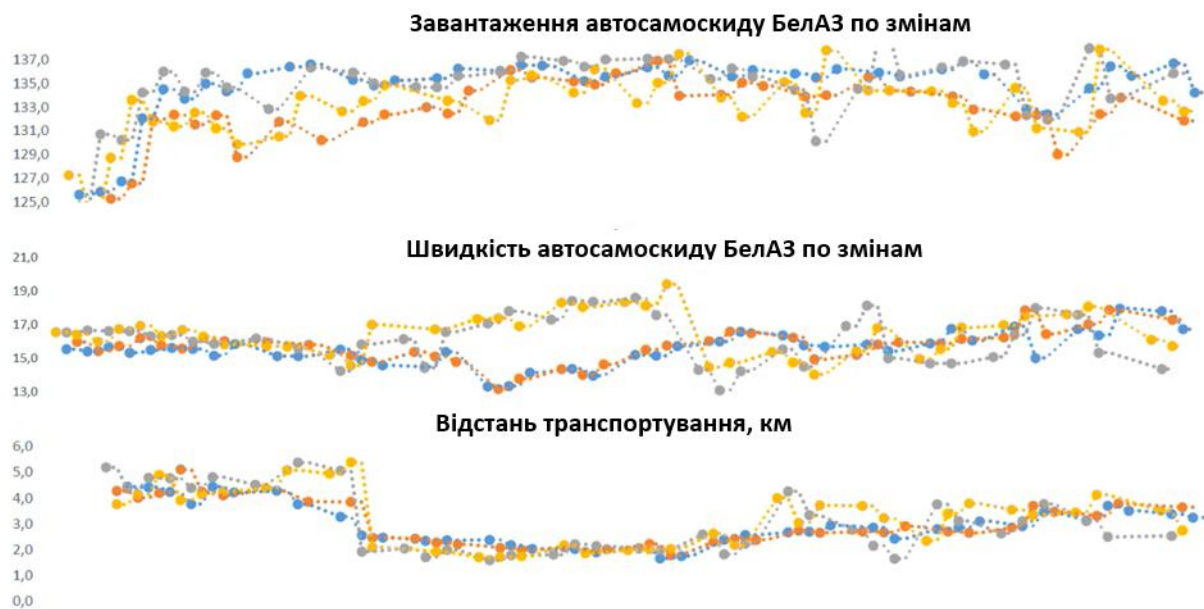


Рис. 1.2 – Динаміка показників експлуатації парку автосамоскидів
Ганнівського кар'єру, ПРАТ «Північний ГЗК»

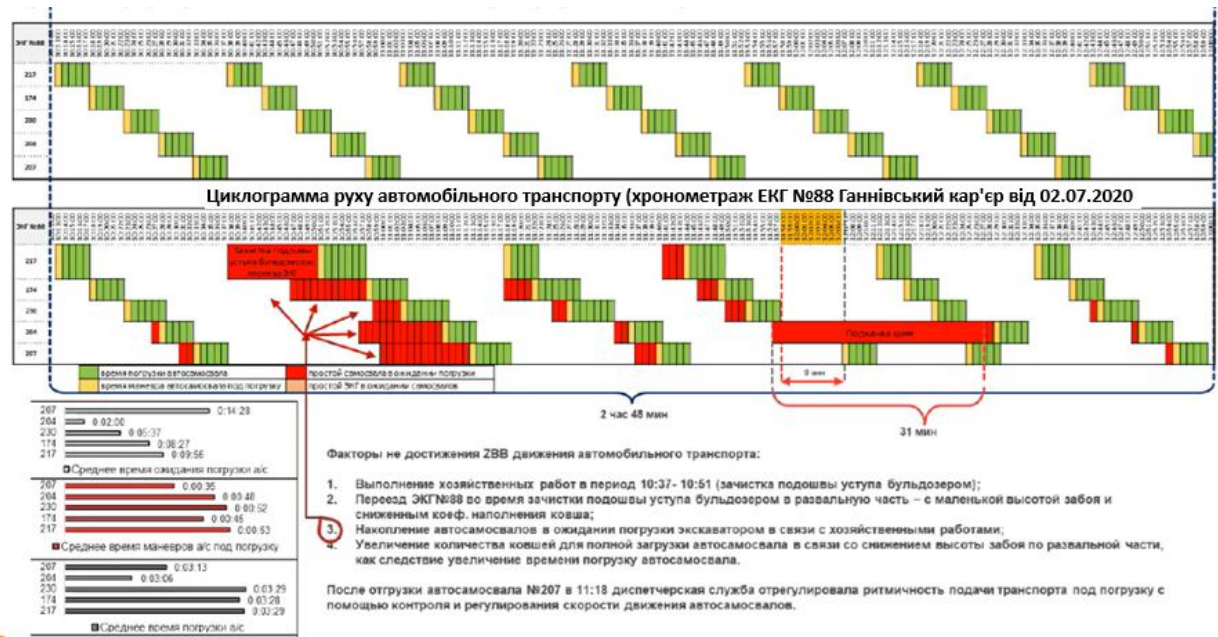


Рис. 1.3 – Циклограма експлуатації парку рухомого складу автотранспорту Ганнівського кар'єру

Нерівномірність надходження заявок на транспорт, позапланові простої через ремонт, затримки при координації робіт між гірничою та транспортною службами формують «вузькі місця» у роботі ЕАК, які важко усунути суто за рахунок нарощування кількості машин. Необхідне поєднання організаційних заходів (оптимізація змінних графіків, регламентація черг, узгоджене планування вибухів) з використанням математичних моделей для визначення раціонального складу й структури парку техніки [4; 6; 7].

Попри детальне планування, реальні умови роботи ЕАК мають виражений стохастичний характер:

- тривалість циклу екскаватора варіює в залежності від крупності розвалу, глибини черпання та маневрування стріли;
- час руху автосамоскидів змінюється через затори, сезонні зміни стану доріг, необхідність роз'їзду;
- відмови окремих машин, а також технологічні перерви (вибухові роботи, чистка забою, переключення фронтів) призводять до непередбачуваних перерозподілів вантажопотоків [6; 7].

Дослідження показують, що найбільші втрати часу в ЕАК припадають на простої автосамоскидів у черзі під навантаженням та простої екскаваторів в очікуванні транспорту [4; 10]. Для їх аналізу широко використовують:

- методи теорії масового обслуговування, які дозволяють визначати оптимальну кількість автосамоскидів під один екскаватор;
- імітаційне моделювання транспортних процесів у спеціалізованих програмних середовищах (Arena, FlexSim, GPSS тощо) для дослідження різних сценаріїв організації роботи комплексу [6; 9].

Результати таких досліджень показують, що навіть незначні зміни в структурі парку (співвідношення машин різної вантажопідйомності), схемі руху або графіках ТОіР можуть призводити до суттєвого зниження сумарних простоїв і підвищення змінної продуктивності ЕАК без капітального збільшення кількості машин [4; 7; 9].

Оцінювання загальних особливостей експлуатації ЕАК базується на системі техніко-економічних показників, серед яких ключовими є:

- добова та змінна продуктивність екскаваторів і автосамоскидів, т/зм, т/добу, ткм/добу;
- коефіцієнт технічної готовності та коефіцієнт використання парку, які характеризують частку машин, що реально працюють у загальному списковому складі;
- структура простоїв (технологічні, організаційні, технічні), їхня частка в змінному фонді часу;
- питомі витрати пального на 1 т або 1 ткм перевезеної гірничої маси;
- собівартість транспортування, яка агрегує вплив усіх попередніх чинників у грошовому виразі [1; 2; 4].

Сучасний етап розвитку екскаваторно-автомобільних комплексів у глибоких кар'єрах характеризується такими тенденціями:

– зростання вантажопідйомності автосамоскидів та об'єму ковша екскаваторів, що дозволяє скорочувати кількість рейсів, однак підвищує вимоги до параметрів доріг, організації руху та точності планування [1; 4];

– впровадження систем інтелектуального управління парком (fleet management systems), які на основі математичної оптимізації, імітаційного моделювання та методів штучного інтелекту (reinforcement learning, нейромережі) визначають раціональні рішення щодо диспетчеризації руху й конфігурації ЕАК [5; 7; 9];

– інтеграція ЕАК в єдині цифрові платформи «розумного кар'єру», де поєднуються дані геомоніторингу, буровибухових робіт, навантажувально-транспортних операцій і переробки руди [8; 14].

Для глибоких кар'єрів Кривбасу ці тенденції особливо актуальні через поєднання значних глибин, складної конфігурації кар'єрних полів та високих вимог до стабільності постачання руди на збагачувальні фабрики. Загальні особливості експлуатації ЕАК у таких умовах зумовлюють необхідність комплексного врахування описаних факторів і використання сучасних методів моделювання та оптимізації, що й становить основу подальших розділів магістерської роботи.

1.3 Аналіз парку виймально-навантажувального і транспортного обладнання в умовах кар'єрів Кривбасу

Криворізький залізорудний басейн є основним залізорудним районом України, на який припадає переважна частка видобутку залізної руди та значна частина потужностей гірничорудних підприємств країни. Кар'єри Кривбасу характеризуються великою площею гірничих робіт, значними глибинами (понад 400–500 м) та потужними обсягами видобутку, що досягають десятків мільйонів тонн руди і розкривних порід на рік [15–17]. Такі гірничо-геометричні умови зумовлюють формування масштабного

парку виймально-навантажувального та транспортного обладнання, яке виступає «ядром» екскаваторно-автомобільних комплексів кар'єрів Кривбасу.

У структурі технологічних комплексів кар'єрів Кривбасу провідне місце належить саме екскаваторно-автомобільному транспорту, що забезпечує доставку до 80–90 % гірничої маси від забою до пунктів подальшого перероблення або складування [17, 20].

Парк виймально-навантажувальної техніки представлений переважно електричними кар'єрними екскаваторами циклічної дії типу «пряма лопата» з місткістю ковша 8–12 м³ і більше, а також гідравлічними екскаваторами середнього і великого типорозміру. Транспортний парк формують кар'єрні автосамоскиди великої вантажопідйомності (переважно 90–130 т, але відомі приклади використання до 220 т), які працюють за схемою «екскаватор – автосамоскид – перевантажувальний пункт чи відвал» [17, 18, 20, 23].

У міру поглиблення кар'єрів та зростання довжин транспортування на окремих горизонтах застосовуються комбіновані транспортні схеми – автомобільно-залізничні та автомобільно-конвеєрні, які взаємодіють з основними екскаваторно-автомобільними ланками та потребують відповідного узгодження параметрів виймально-навантажувального і транспортного обладнання [17, 19, 20]. При цьому домінуюче положення займають машини типу БЕЛАЗ-75131 вантажопідйомністю 130–136 т [18, 20, 23].

Основу виймально-навантажувального обладнання кар'єрів Кривбасу становлять електричні кар'єрні екскаватори типу ЕКГ з місткістю ковша 8–12 м³ (ЕКГ-8, ЕКГ-10, ЕКГ-12,5), а на окремих підприємствах – екскаватори з ковшами збільшеної місткості 15–20 м³ [20, 21]. Такі машини забезпечують необхідну продуктивність забоїв за умов великих обсягів розкривних і видобувних робіт та дозволяють формувати раціональні схеми взаємодії з кар'єрними автосамоскидами великої вантажопідйомності.

Результати досліджень впливу типорозміру екскаватора на межі відкритих гірничих робіт свідчать, що збільшення місткості ковша та раціональний вибір типу екскаватора суттєво впливають на продуктивність кар'єру, граничну глибину розробки та питомі витрати енергії на виймання порід [21]. У випадку глибоких кар'єрів Кривбасу саме перехід до екскаваторів більшого типорозміру дозволяє утримувати заданий рівень продуктивності при зростанні довжин фронту робіт та збільшенні висот уступів.

Поряд з традиційними електричними канатними екскаваторами у кар'єрах Кривбасу застосовуються й гідравлічні екскаватори Hitachi та інші аналогічні машини, що працюють переважно на вибірці руди, навантаженні розкриву на локальних ділянках та виконанні допоміжних операцій [20]. Гідравлічні екскаватори відрізняються високою маневровістю, можливістю роботи у стиснених умовах і вдало доповнюють парк великих електричних машин.

Однак, внаслідок тривалої експлуатації значна частина екскаваторного парку Кривбасу має високий ступінь фізичного та морального зносу. Для ряду машин ресурс основних металоконструкцій та електромеханічної частини близький до граничних значень, що зумовлює зростання частки непланових простоїв, збільшення витрат на ремонт та обслуговування, а також погіршення енергетичних показників [18, 20, 21].

Разом з тим, упродовж останніх років спостерігається активізація робіт з модернізації екскаваторного парку: виконуються капітальні ремонти з частковою заміною металоконструкцій, оновлюються приводи, впроваджуються сучасні системи керування та діагностування, що підвищує коефіцієнт технічної готовності та дозволяє продовжити строк служби машин [18, 24]. Комбінати Кривбасу інвестують у придбання нових екскаваторів, зокрема комплектацію кар'єрів машинами з ковшами 10–12 м³,

що відповідає тенденціям укрупнення одиниць виїмально-навантажувальної техніки [20, 24].

За оцінками, у Криворізькому регіоні зосереджена більшість українського парку кар'єрних автосамоскидів із електромеханічною трансмісією та вантажопідйомністю 120–220 т, що забезпечує базову частину перевезення гірничої маси на вітчизняних кар'єрах [18]. Дослідження засвідчують, що у 2010-х роках підприємства Кривбасу істотно оновили парк техніки, придбавши десятки нових кар'єрних автосамоскидів великих типорозмірів [18, 23].

Окрім автосамоскидів марки БЕЛАЗ, у парку транспортних засобів окремих підприємств Кривбасу присутні машини іноземного виробництва – Caterpillar, Komatsu тощо, які застосовуються в якості базових або додаткових одиниць техніки в сегменті вантажопідйомності 90–190 т [20, 23]. Така диверсифікація парку дозволяє адаптувати транспортні схеми до конкретних гірничо-геологічних умов, проте ускладнює структуру запасів запасних частин та підхід до технічного обслуговування.

Експлуатація автосамоскидів у глибоких кар'єрах Кривбасу відбувається в умовах значних поздовжніх ухилів, великих довжин транспортних плечей (до 8–10 км) та інтенсивного наростання висоти внутрішніх та зовнішніх відвалів [17, 19, 23]. Доведено, що при таких параметрах кар'єру зростає частка витрат на автотранспорт у собівартості кар'єрних робіт, а також підсилюється вплив надійності та економічності роботи автосамоскидів на загальну ефективність видобутку [18, 23].

Разом з тим, дослідження експлуатаційної надійності кар'єрних автосамоскидів у Кривбасі показують підвищену частку простоїв через відмови електромеханічної трансмісії та елементів ходової частини, що зумовлено великими навантаженнями при роботі на великих ухилах, високою масою порожньої машини та агресивним середовищем кар'єрних доріг [18, 19, 23]. Ці фактори вимагають вдосконалення систем технічного

обслуговування, підвищення якості дорожнього покриття та оптимізації режимів руху.

Особливої актуальності в умовах Кривбасу набувають питання енергоефективності. Дослідження можливості застосування дизель-тролейвозів у залізорудних кар'єрах України показали, що для типових умов Кривбасу (глибина кар'єрів 500–600 м, довжина транспортування до 10 км) частка витрат на паливо у собівартості транспортування може бути суттєво знижена за рахунок електрифікації найскладніших підйомних ділянок автодоріг [23]. Для парку автосамоскидів БЕЛАЗ-75131, що домінує у комбінатів Кривбасу, впровадження дизель-тролейвозних систем здатне забезпечити відчутну економію палива та зменшення викидів відпрацьованих газів, що безпосередньо впливає на екологічну ситуацію в регіоні [18, 23].

У зв'язку з ростом глибин та довжин транспортування в ряді кар'єрів Кривбасу активно впроваджуються комбіновані схеми транспортування, зокрема автомобільно-залізничні та автомобільно-конвеєрні системи. У таких схемах автосамоскиди виконують доставку гірничої маси від забою до перевантажувальних пунктів, де матеріал передається на залізничний або конвеєрний транспорт [17, 19, 20].

Дослідження конструкцій автомобільно-залізничних перевантажувальних пунктів у кар'єрах Кривбасу показали, що їх раціональне компонування і параметри (ємність бункерів, рівень механізації, пропускна здатність) мають суттєвий вплив на використання змінного часу роботи автосамоскидів та екскаваторів, а також на скорочення простоїв у чергах під завантаження і розвантаження [19]. Відповідно, аналіз парку транспортного обладнання необхідно здійснювати не ізольовано, а в контексті всієї транспортно-технологічної системи кар'єру.

Однією з ключових умов ефективної експлуатації парку виймально-навантажувального та транспортного обладнання є раціональне узгодження параметрів екскаваторів і автосамоскидів. Розрахунки та практичний досвід

підприємств Кривбасу підтверджують, що для екскаваторів з ковшами місткістю 8–12 м³ найбільш доцільно застосовувати автосамоскиди вантажопідйомністю 110–130 т, що забезпечує прийнятний коефіцієнт заповнення кузова (коефіцієнт поєднання) та мінімізує втрати часу на донавантаження [20, 21].

Дослідження впливу типорозміру екскаватора на межі відкритих гірничих робіт показали, що при переході до екскаваторів більшого типорозміру, за умови відповідного збільшення вантажопідйомності автосамоскидів, можливо зменшити кількість одиниць обладнання у парку, знизити навантаження на транспортну мережу та досягти оптимальної продуктивності кар'єру [21]. Разом з тим, збільшення місткості ковша та вантажопідйомності автосамоскидів вимагає підвищених вимог до міцності бортів, параметрів кар'єрних доріг і перевантажувальних вузлів [17, 19, 21].

Проведений аналіз свідчить, що парк виймально-навантажувального і транспортного обладнання в кар'єрах Кривбасу має такі характерні риси:

- домінування великих електричних кар'єрних екскаваторів (ЕКГ-8, ЕКГ-10, ЕКГ-12,5) та доповнення їх гідравлічними машинами середнього і великого типорозміру [20, 21];
- переважне застосування кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 90–220 т, з домінуванням типу БЕЛАЗ-75131 вантажопідйомністю 130–136 т як базової машини для перевезення гірничої маси [18, 20, 23];
- висока частка автотранспорту в структурі собівартості гірничих робіт, що обумовлює необхідність пошуку резервів підвищення енергоефективності та надійності автосамоскидів, включно з упровадженням дизель-тролейвозних систем [18, 23];
- поступова модернізація екскаваторного і транспортного парку завдяки капітальним ремонтам, оновленню окремих вузлів і закупівлі нових

машин, однак при ще значній частці морально застарілого обладнання [18, 20, 24];

– розвиток комбінованих транспортних схем (автомобільно-залізничних та автомобільно-конвеєрних), що висувають підвищені вимоги до узгодженості параметрів виймально-навантажувальної техніки, автосамоскидів і перевантажувальних пунктів [17, 19, 20].

Таким чином, для кар'єрів Кривбасу характерне формування потужних екскаваторно-автомобільних комплексів на базі великих електричних екскаваторів і автосамоскидів великої вантажопідйомності. Разом з тим, наявність значної частки зношених машин, зростання глибин і довжин транспортування, а також енергетичні та екологічні обмеження обумовлюють необхідність подальшого вдосконалення структури парку, оптимізації параметрів екскаваторно-автомобільних ланок і впровадження енергоефективних технологічних рішень. Це створює передумови для подальших досліджень, спрямованих на обґрунтування раціональних параметрів і схем функціонування екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів Кривбасу.

РОЗДІЛ 2. ВИВЧЕННЯ ДОСВІДУ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ НА КАР'ЄРАХ

2.1 Підприємства Кривбасу (кар'єри групи “Метінвест” та ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»)

У сучасній практиці відкритих гірничих робіт системи диспетчеризації екскаваторно-автомобільних комплексів розглядаються як ядро цифрового керування гірничо-транспортними процесами. Світові огляди відзначають, що сучасні Fleet Management Systems (FMS) для кар'єрів вже давно вийшли за межі «простого» розподілу рейсів і включають модулі моніторингу, контролю технічного стану, аналізу продуктивності, безпеки, паливної ефективності тощо [25].

На рисунку 2.1 наведена схема зв'язку між кар'єрним парком техніки і системою диспетчеризації.

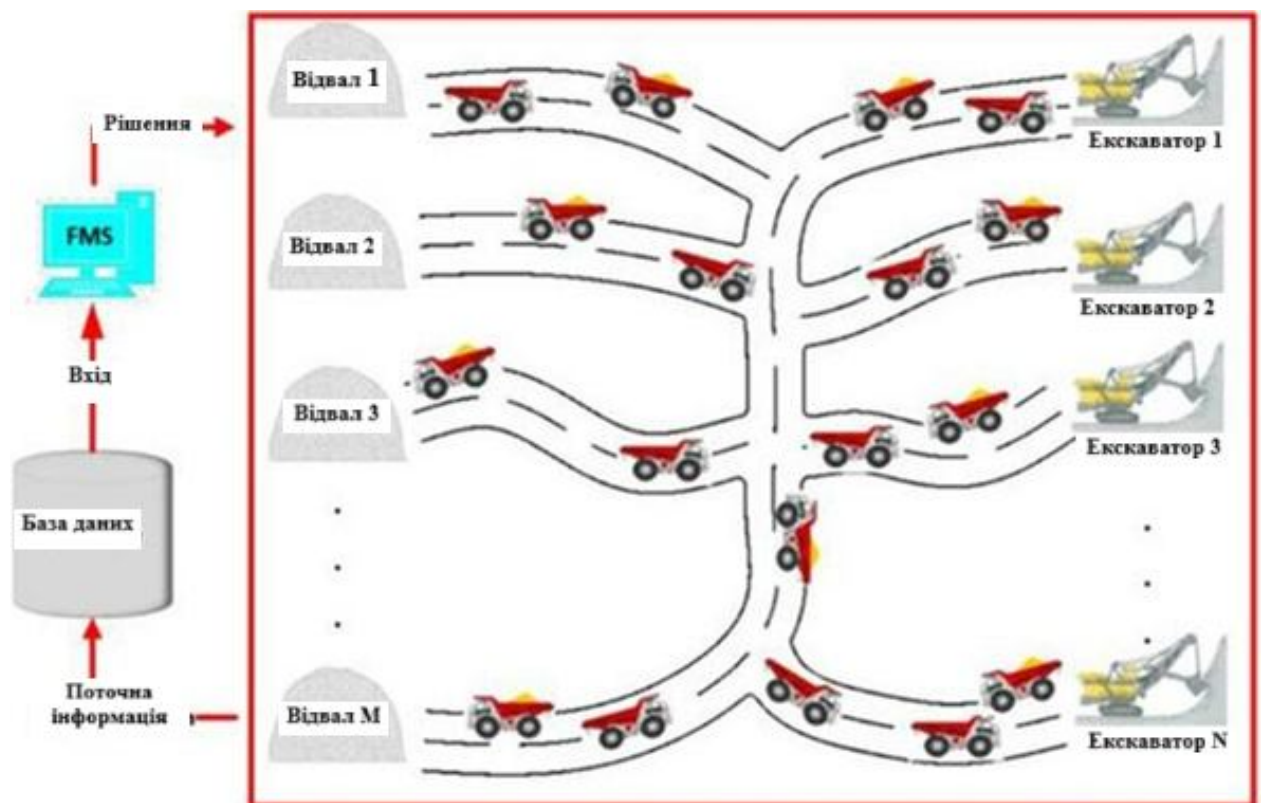


Рис. 2.1 – Схема зв'язку між кар'єрним парком техніки і системою диспетчеризації

Для Криворізького залізорудного басейну (ПрАТ «Північний ГЗК», ПрАТ «Центральний ГЗК», ПрАТ «Інгулецький ГЗК», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг») характерний поетапний перехід від локальних автоматизованих систем до комплексних цифрових рішень «розумного кар'єру». У звітах групи «Метінвест» відзначено пілотний проєкт «Digital Open Pit Mine» на ПрАТ «Інгулецький ГЗК», у межах якого реалізовано автоматизоване керування гірничо-транспортними процесами із дистанційним або безлюдним керуванням десятків екскаваторів, автосамоскидів, бурових верстатів та локомотивів [26]. Інфраструктура такого проєкту включає систему збору та передавання телеметрії, підсистему позиціювання, диспетчерський центр та програмне забезпечення, яке реалізує алгоритми розподілу техніки за фронтами робіт і маршрутами руху.

Ряд вітчизняних публікацій [26-28] описує впровадження інтегрованих автоматизованих систем керування виробництвом і транспортом на підприємствах «Центральний ГЗК», «Північний ГЗК», «Полтавський ГЗК», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», які реалізують комплексні функції контролю параметрів технологічних процесів, обліку продукції, оперативного планування та диспетчеризації. Для ПрАТ «Північний ГЗК» окремо описана система «Гермес», призначена для автоматизованого збирання інформації про масу вантажів, що перевозяться автомобільним транспортом, реєстрації рейсів, швидкості руху та інших параметрів, а також для формування завдань водіям і аналізу використання парку автосамоскидів [28].

Математично подібні системи реалізують задачу оперативного розподілу парку автосамоскидів між екскаваторами та пунктами розвантаження. У найзагальнішому вигляді її можна записати як задачу цілочислового лінійного програмування:

Змінна $x_{kij}^t = 1$, якщо автосамоскид k у момент часу t направляється від екскаватора i до пункту розвантаження j , і – інакше;

Цільова функція – мінімізація сумарних витрат на транспортування та простої:

$$\min \sum_{k,i,j} (c_{ij} x_{kij}^t + \alpha w_i^t + \beta q_j^t) \quad (2.1)$$

де c_{ij} – витрати (час, паливе, гроші) на рейс з i до j , w_i^t – простій екскаватора i у момент t , q_j^t – черга в пункті розвантаження j , α, β – вагові коефіцієнти;

Обмеження описують:

- належність кожного автосамоскида одному маршруту в кожний момент часу;
- продуктивність екскаваторів і приймальних пунктів;
- граничне навантаження доріг та відповідність якості руди вимогам фабрики.

У реальній системі ці розрахунки виконуються не для безперервного часу, а для «кроків оновлення» (декілька десятків секунд – хвилин), і диспетчерська підсистема перераховує оптимальні або квазіоптимальні рішення після кожної суттєвої події – закінчення навантаження, розвантаження, виходу з ладу машини тощо.

2.2 Рудник Assarel-Medet (Болгарія)

Один із добре задокументованих прикладів впровадження сучасної FMS – мідний кар'єр Assarel-Medet у Болгарії. На цьому підприємстві впроваджено систему Wencomine Fleet Management System, яка забезпечує

моніторинг і диспетчеризацію автосамоскидів та екскаваторів у реальному часі [29]. Приклад інтерфейсу програми наведено на рисунку 2.2. За даними компанії, після впровадження системи продуктивність кар'єру зросла приблизно на 16 %, а витрати на екскавацію й транспортування зменшилися більш як на 3 % за рахунок кращої координації робіт, скорочення холостих пробігів та зменшення простоїв [29].

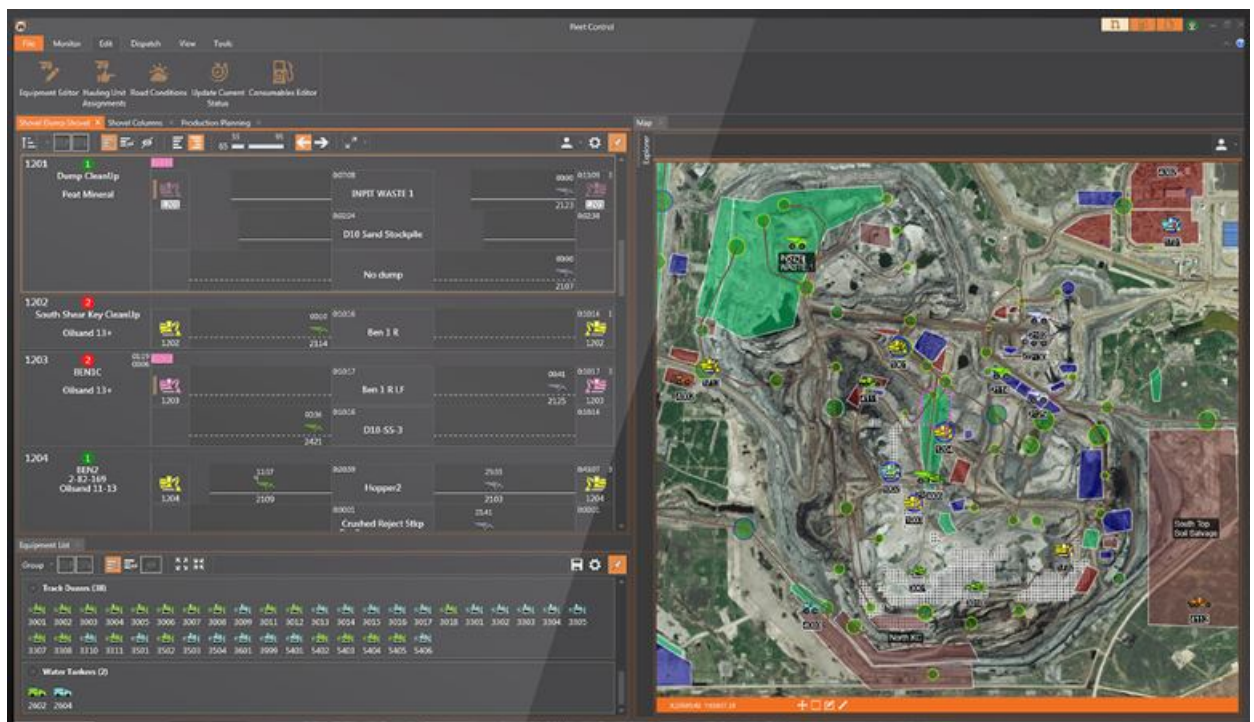


Рис. 2.2 – Інтерфейс системи диспетчеризації Wenco

Функціонально FMS на Assarel-Medet реалізує такі ключові задачі:

- визначення поточного розташування техніки на основі GPS-навігації;
- реєстрація подій «початок/кінець навантаження», «початок/кінець розвантаження», «рух/зупинка»;
- автоматичне формування та передавання бортовими терміналами завдань водіям;
- розрахунок і візуалізація основних виробничих показників (тонн на годину, коефіцієнт використання, коефіцієнт простою тощо).

У математичному сенсі алгоритм диспетчеризації в таких системах базується на поєднанні:

- задачі типу «призначення» (розподіл доступних автосамоскидів між чергами на екскаватори та пункти розвантаження);
- задачі пошуку найкоротших шляхів у графі кар'єрних доріг (для вибору раціонального маршруту з урахуванням заборонених зон, ухилів, швидкісних режимів);
- евристичних правил (пріоритет завантажених екскаваторів, обмеження по якості руди, пріоритетні відвали тощо).

Типовий формалізований вигляд задачі призначення для FMS можна записати так:

$$\begin{aligned} \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} \tau_{kij} y_{kij}. \\ \sum_{(i,j) \in A} y_{kij} = 1, \forall k \in K. \\ \sum_{k \in K} y_{kij} \leq n_{ij}^{\max}, \forall (i,j) \in A, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де τ_{kij} – очікуваний час рейсу автосамоскида k за маршрутом $i \rightarrow j$,
 y_{kij} – змінна, що визначає, який маршрут буде призначено,
 $n_{ij}^{\max}$ – допустима кількість автосамоскидів на маршруті. На практиці ця база доповнюється штрафами за простої, відхилення від планових потоків тощо.

2.3 Золоторудні кар'єри Golden Queen (США) та Salares Norte (Чилі)

Впровадження FMS типу Wencomine також описано для золоторудного кар'єру Golden Queen (США), де система використовується для диспетчеризації автосамоскидів, GPS-навігації та високоточного керування

навантажувальними машинами [30]. Відзначається зменшення тривалості циклу, зростання кількості рейсів за зміну та більш стабільне відпрацювання виробничого плану [30].

У Чилі на золоторудному кар'єрі Salares Norte компанія Gold Fields також впровадила FMS Wenco разом із системою високоточного керування BenchManager і підсистемою моніторингу технічного стану ReadyLine [31]. Це дозволило організувати єдиний центр моніторингу, який у реальному часі отримує повну картину роботи екскаваторів, автосамоскидів, бурових верстатів і бульдозерів і ухвалює рішення щодо перерозподілу техніки відповідно до змінених умов робіт [31].

Алгоритмічно такі системи дедалі частіше реалізують не лише «миттєву» оптимізацію, а й наближені багатоперіодні постановки, коли для горизонту в декілька десятків хвилин будується квазіоптимальний план руху техніки, а далі в міру надходження нової інформації цей план коригується. В окремих реалізаціях використовується підхід «цільових потоків»: спершу визначаються цільові інтенсивності переміщення породи між окремими блоками та пунктами розвантаження, а потім алгоритм реального часу намагається наблизити фактичні рішення до цих цільових значень, зважаючи на обмеження по чергах, відмовах техніки та ін. [35].

Одним з перших промислових рішень стала система TRASY, розроблена в Болгарії наприкінці 1980-х років для реального часу контролю промислового автомобільного транспорту у кар'єрах [32]. TRASY реалізувала централізований збір інформації про місцезнаходження й стан автосамоскидів і екскаваторів та використовувала математичну модель оптимального розподілу рейсів, у якій:

- транспортна мережа кар'єру представлялася орієнтованим графом з дугами, що характеризуються довжиною, ухилом та обмеженнями швидкості;

- кожен автосамоскид описувався станом (порожній/завантажений, місце перебування, час до завершення поточного етапу рейсу);

- екскаватори й пункти розвантаження представлялися як обслуговуючі пристрої з певною продуктивністю та чергою.

Задача TRASY зводилася до пошуку такого розподілу автосамоскидів по маршрутах, який мінімізує сумарний час простою екскаваторів і автосамоскидів. Для вибору маршрутів використовувалися мережеві алгоритми (пошук найкоротшого шляху), а для розподілу техніки – варіанти транспортної задачі, де в якості «постачальників» виступають вільні автосамоскиди, а в якості «споживачів» – запити з боку екскаваторів і пунктів розвантаження [32].

Подальший розвиток отримали моделі реального часу, що напряду використовують апарат транспортних задач і цільового програмування. У роботах Temeng та співавторів розроблено алгоритми оперативної диспетчеризації на основі транспортної задачі з цільовою функцією мінімізації простоїв екскаваторів та автосамоскидів і відхилення від заданих виробничих потоків [33]. Вони розв'язуються в режимі реального часу із застосуванням швидких методів оптимізації, а нові рішення формуються кожного разу, коли автосамоскид завершив навантаження або розвантаження.

2.4 Кар'єр Кідашан (Ansteel Group, КНР): диспетчеризація на основі динамічного шихтування руди

Окремий напрям розвитку систем диспетчеризації пов'язаний з ув'язкою задач транспортування з вимогами до якості руди на збагачувальній фабриці. Типовим прикладом є залізорудний кар'єр Qidashan групи Ansteel (КНР), де створено систему диспетчеризації автосамоскидів на основі динамічних рішень щодо шихтування руди [32-34]. Запропонована авторами

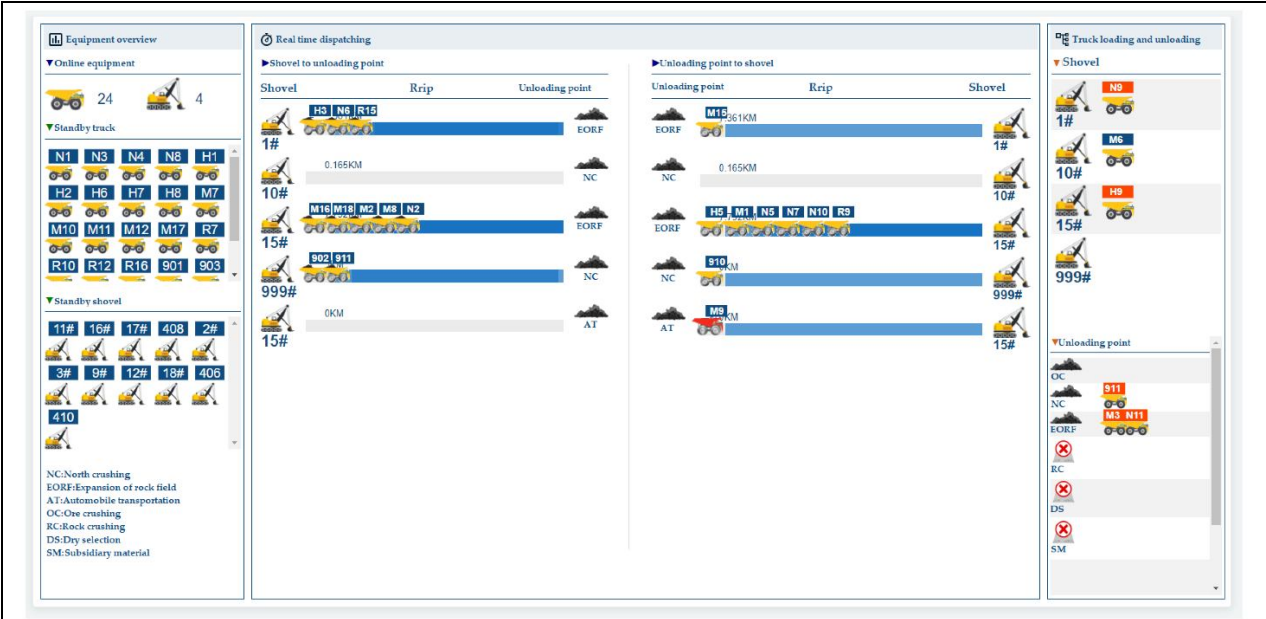
система будується на сучасній телекомунікаційній інфраструктурі (4G/5G- зв'язок, система позиціювання BeiDou, елементи Інтернету речей), що дозволяє в режимі реального часу збирати дані про позиції техніки, параметри рудних блоків і поточні якісні показники продукції.

Математичне ядро системи включає:

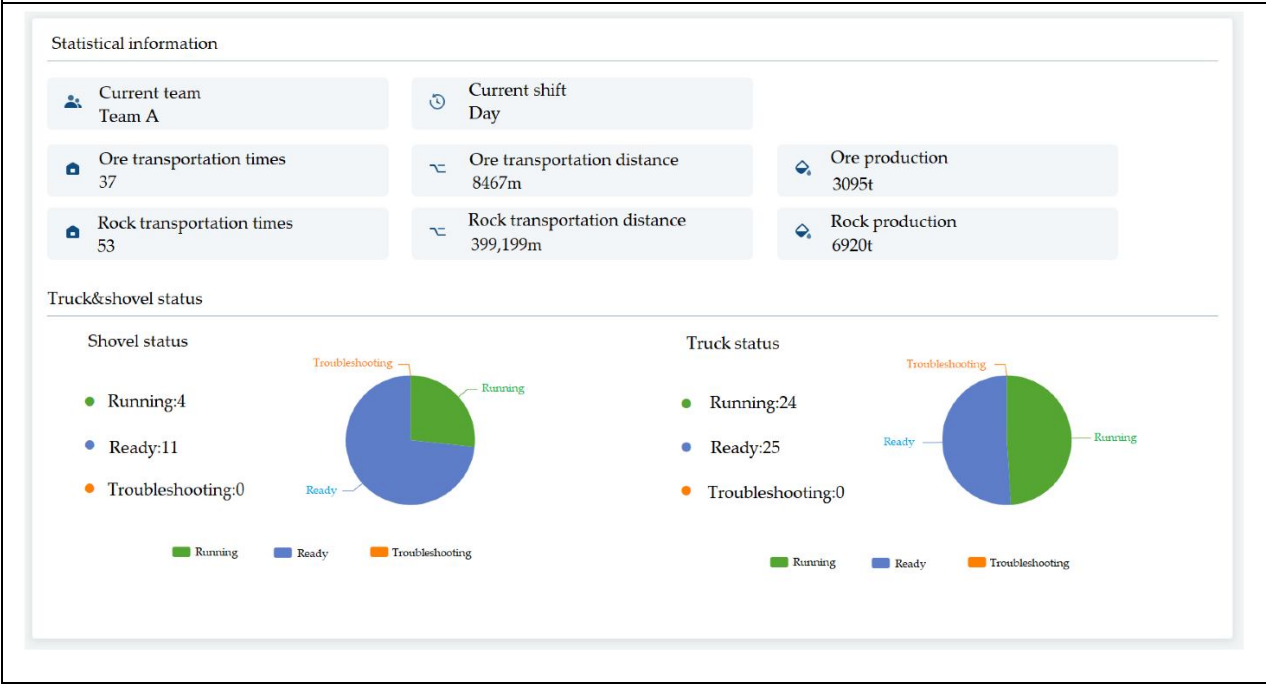
- модель динамічного шихтування, в якій мінімізуються відхилення за вмістом корисного компонента у руді, що надходить на збагачувальну фабрику, при обмеженнях на добові та змінні обсяги видобутку з окремих блоків;
- транспортну підзадачу розподілу автосамоскидів між екскаваторами та пунктами розвантаження, де критерієм є мінімізація сумарних витрат на транспортування та простоїв;
- механізм перерахунку рішень при зміні фактичного складу руди або виході з ладу окремих екскаваторів/автосамоскидів.

На рисунку 2.3а наведено екран системи диспетчеризації в режимі реального часу, за допомогою якого користувач може бачити інформацію про диспетчеризацію всього кар'єру в режимі реального часу. У лівій частині екрана знаходиться список обладнання, включаючи 24 вантажівки, чотири екскаватори, а також список резервних вантажівок та резервних екскаваторів. Посередині екрана знаходиться інформація про диспетчеризацію в режимі реального часу, включаючи список вантажівок від кожного екскаватора до кожної точки розвантаження та список вантажівок від кожної точки розвантаження до кожного екскаватора. Червоний колір вантажівки вказує на те, що положення обладнання не змінювалося протягом тривалого часу під час транспортування. У правій частині екрана знаходиться інформація про завантаження та розвантаження вантажівок, включаючи вантажівки, що завантажують руду електричним екскаватором, та вантажівки, що розвантажують руду в точці розвантаження.

Рисунок 2.3 б) відображає статистичну інформацію системи в режимі реального часу та стан вантажівок і екскаваторів. Статистична інформація в основному включає поточну команду, поточну зміну, час транспортування породи та руди, відстань транспортування та обсяг виробництва. Стан вантажівок і екскаваторів в основному включає поточну кількість працюючих і готових до роботи вантажівок/екскаваторів, а також інформацію про усунення несправностей.



а) екран онлайн-диспетчеризації



б) екран статистичної інформації

Рис 2.3 – Інтерфейс системи диспетчеризації екскаваторно-автомобільного комплексу на кар'єрі Кідашан (КНР)

Для розв'язання моделі використано комбіновані алгоритми: лінійне та цілочислове програмування для планового рівня і швидкі евристики з урахуванням пріоритетів за якістю руди – для оперативного рівня диспетчеризації [30; 31]. Практичні результати впровадження системи вказують на зменшення відхилень за вмістом заліза у живленні фабрики та скорочення витрат на транспортування за рахунок більш раціонального розподілу рейсів.

2.5 Моделі з мережевими потоками та цілочисловим програмуванням

Суттєвий внесок у математичний опис диспетчеризації внесла робота Ahangaran, де запропоновано модель реального часу для парку автосамоскидів з різною вантажопідйомністю [34]. Тут транспортна система кар'єру розглядається як мережа потоків, а задача диспетчеризації формулюється як цілочислова оптимізація, у якій:

- вузли мережі відповідають екскаваторам, пунктам розвантаження і проміжним розв'язкам;
- дуги представляють можливі маршрути руху;
- змінні потоків описують кількість рейсів між вузлами;
- цільова функція мінімізує сукупні витрати на транспортування, що включають і час холостих пробігів, і витрати палива.

При цьому окремо враховується різна вантажопідйомність машин: вводяться обмеження, які пов'язують кількість рейсів і перевезену масу, а також обмеження на пропускну здатність доріг для важчих машин [34].

У роботі Wang та співавторів запропоновано модель реального часу, яка одночасно враховує етапи руху завантажених і порожніх автосамоскидів та має три критерії: мінімізація часу очікування автосамоскидів, відхилення від планових потоків і транспортних витрат [35]. Модель ділиться на дві підзадачі – для повних і порожніх машин – і розв’язується як задача математичного програмування з дискретизацією часу [35].

Сміт та колектив його колег розробили два підходи до диспетчеризації:

- стохастичну модель з урахуванням черг (через апарат теорії масового обслуговування) для визначення «цільових» потоків між парами «екскаватор–пункт розвантаження»;

- змішано-цілочислову модель з дискретизацією часу для детального планування руху автосамоскидів [36].

Обидві моделі зводяться до задачі мінімізації функціоналу, який включає витрати на очікування в чергах, відхилення від цільових потоків та транспортні витрати. Для реального часу застосовуються евристики, які генерують наближені, але обчислювально прийнятні рішення [36].

В роботі [37] автори запропонували багатостадійну схему: спочатку розв’язується задача визначення оптимального розміру та структури парку автосамоскидів (сценарний підхід), а далі – задача динамічної алокації в реальному часі, де використовується змішано-цілочислова модель з обмеженнями на продуктивність екскаваторів, пропускну здатність доріг і виконання виробничого плану.

2.6 Агентно-орієнтовані та розподілені системи диспетчеризації

Обмеження класичних централізованих FMS (затримки при перерахунку рішень, погана масштабованість) стимулювали розробку агентно-орієнтованих підходів. Автори запропонували агентно-орієнтовану систему диспетчеризації, у якій:

- кожен автосамоскид моделюється як програмний агент, що приймає локальні рішення на основі свого стану й інформації від «координатора»;
- екскаватори й пункти розвантаження також описуються як агенти, які формують запити на обслуговування;
- центральний рівень не розв’язує повну оптимізаційну задачу, а задає «напрямні» у вигляді цільових потоків і пріоритетів [38].

У такій архітектурі математичний апарат включає:

- локальні функції корисності агентів (наприклад, мінімізація власного простою й довжини маршруту для автосамоскида);
- глобальну ціль, що відображає продуктивність і виконання плану, яку центральний координатор намагається наблизити, варіюючи пріоритети й сигнали для агентів;
- механізми узгодження рішень (протоколи торгів, аукціони, алгоритми узгодження).

Огляд сучасних робіт з інтелектуальних FMS показує, що агентно-орієнтовані підходи розглядаються як природний спосіб відобразити розподілену природу цифрового «розумного кар’єру» і поєднати локальну адаптивність із глобальною оптимізацією [38].

Новітні дослідження демонструють перехід до використання методів глибинного підкріплювального навчання (DRL) для оперативної диспетчеризації. Noriega та співавт. запропонували систему реального часу, в якій диспетчерська політика моделюється нейронною мережею, що наближує функцію цінності $Q(s,a)$ у постановці Double Deep Q-Learning [39].

Стан s включає інформацію про розподіл автосамоскидів по маршрутах, довжину черг біля екскаваторів і пунктів розвантаження, поточні показники продуктивності;

дія α – набір призначень для автосамоскидів, що щойно завершили операцію;

винагорода β формулюється як комбінація продуктивності (тонн/год), витрат палива та штрафів за відхилення від плану.

Таблиця 2.1 – Можливості використання штучного інтелекту в системах диспетчеризації

Аспект ШІ	Використання	Результати
Аналітика автопарку в реальному часі	Збирання даних для передиктивної аналітики: • дорожній рух; • стан доріг; • природні та екологічні небезпеки; • поточні погодні умови; • механічні несправності.	• Визначення пріоритетності можливостей і ризиків; • побудова більш раціональних маршрутів; • оптимізація графіків і виконання техобслуговування; • планування результатів роботи автопарку та організація його дій; • підтримання готовності до непередбачуваних подій.
Поліпшення рішень щодо ремонту та техобслуговування	Передиктивне (прогнозне) технічне обслуговування; постійний контроль технічного стану автопарку.	• Точна самодіагностика; • зменшення витрат на планове технічне обслуговування.
Інтеграція автопарку	Планування, технічне обслуговування та моніторинг операцій.	• Інтеграція всіх підрозділів на єдиній платформі; • скорочення часу та витрат; • узгоджена, цілісна робота автопарку.
Спрощення процесу найму персоналу	Управління знаннями; відбір і рекомендація найбільш кваліфікованих водіїв.	Спрощення процесу введення нових працівників у посаду (онбордингу).

Мета навчання – знайти політику, яка максимізує суму дисконтованих винагород. Порівняння з класичними евристичними демонструє менші простоти та вищу стійкість до стохастичних збурень (несподівані відмови техніки, зміни дорожніх умов) [39].

В праці [40] автори відзначають, що DRL-методи у FMS дозволяють перехопити ініціативу в класичних оптимізаційних підходів там, де модель занадто складна чи невизначена, однак наголошують на проблемах інтерпретованості та необхідності великих масивів даних для навчання. Поступово складається гібридна парадигма, де у стратегічному та тактичному горизонтах (планування на добу–зміну) переважають моделі математичного програмування, а на оперативному горизонті (секунди–хвилини) використовуються політики, навчені за допомогою DRL, які набувають ознак «цифрового диспетчера» [40].

Окремий напрям – «зелена» диспетчеризація. Дослідження показують, що грамотне використання FMS дозволяє суттєво знизити викиди парникових газів за рахунок:

- скорочення холостих пробігів;
- згладжування піків навантаження на транспортну мережу;
- вибору маршрутів з урахуванням витрат палива, а не лише часу [41].

Математично це відображається в багатокритеріальній постановці:

- максимізація продуктивності P ;
- мінімізація витрат палива F ;
- мінімізація викидів E з використанням, наприклад, зваженої суми

$$\min(-\lambda_1 P + \lambda_2 F + \lambda_3 E), \quad (2.3)$$

або E -обмежень, коли один із критеріїв фіксується у вигляді обмеження (наприклад, $P \geq P_{\min}$), а інші мінімізуються [41].

Досвід розглянутих підприємств показує, що промислові системи диспетчеризації поступово еволюціонують від традиційних FMS, що базуються на класичних задачах транспортного типу, до інтегрованих інтелектуальних платформ. У цих платформах математичні моделі (мережеві потоки, цілочислове та багатоцільове програмування, теорія масового

обслуговування, DRL, агентно-орієнтовані моделі) поєднуються з потужною телекомунікаційною інфраструктурою й бортовими системами, що відкриває реальні можливості для підвищення ефективності експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів у глибоких кар'єрах [25; 26; 29–31; 42].

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ

Рациональна схема функціонування екскаваторно-автомобільного комплексу передбачає таке узгодження параметрів екскаватора та автосамоскидів, за якого досягається максимальна продуктивність при мінімальних простоях техніки. Для глибоких кар'єрів Кривбасу це завдання особливо актуальне через значні довжини транспортних плечей, великі висоти підйому та обмежений парк автомобільного транспорту. Нижче наведено узагальнене математичне обґрунтування для двох принципово різних схем організації роботи: замкненої (закритий цикл) і диспетчеризованої відкритої схеми.

У замкненому циклі певна кількість автосамоскидів постійно закріплюється за конкретним екскаватором. Нехай час навантаження одного автосамоскида становить t_L , повний час циклу автосамоскида, що включає рух завантаженим до пункту розвантаження, розвантаження, рух порожнім назад та навантаження, дорівнює t_T . Маса вантажу в одному рейсі позначається Q . За відсутності простоїв максимальна годинна продуктивність екскаватора становитиме

(3.1)

60

оскільки за одну годину екскаватор здатний навантажити $\frac{60}{t_L}$ машин.

Теоретична годинна продуктивність одного автосамоскида, що працює без простоїв, дорівнює

а парку з m автосамоскидів:

(3.2)

Фактична продуктивність комплексу у замкненій схемі визначається мінімумом між можливостями екскаватора та автотранспорту:

$$Q_c(m) = \min(Q_{e \max}, Q_{tr \max}(m)). \quad (3.3)$$

Рациональна кількість автосамоскидів під один екскаватор визначається з умови рівності пропускної здатності екскаватора та парку автомобілів:

(3.4)

Після скорочення однакових множників маємо просту формулу

(3.5)

На практичному прикладі для умов глибокого кар'єру Кривбасу, коли $t_L = 2,5$ хв, $t_T = 15$ хв, отримуємо автосамоскидів. На рис. 3.1 показана залежність продуктивності $Q_c(m)$ від кількості автосамоскидів m . Крива має характерний вигляд: при малих m (менших за) продуктивність зростає майже лінійно, а при виходить на плато, обмежене $Q_{e \max}$. Цей графік наочно демонструє, що збільшення числа автосамоскидів понад не дає приросту продуктивності, а лише спричиняє додаткові простої транспорту.

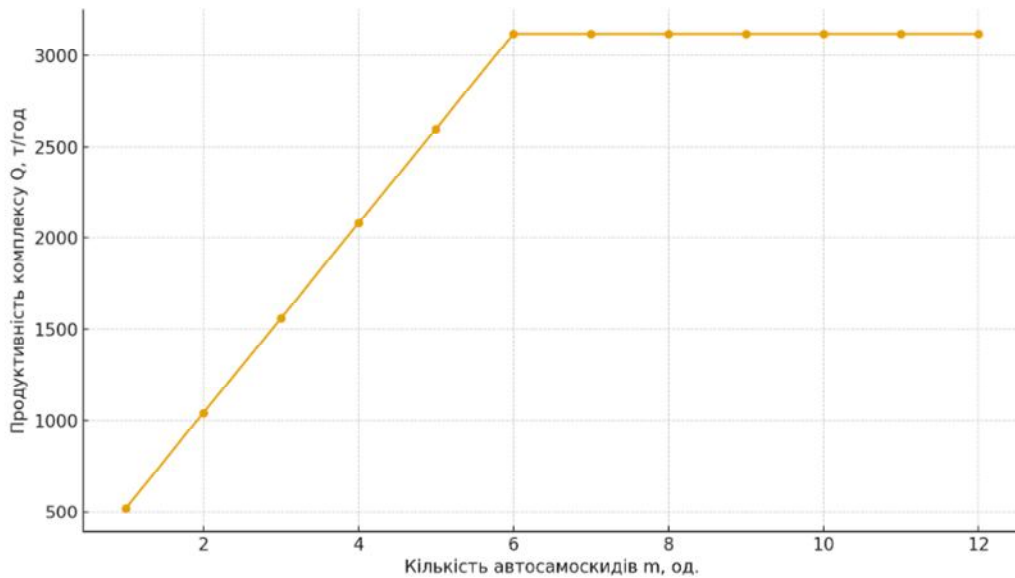


Рис. 3.1 – Залежність продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу від кількості автосамоскидів

Для кількісної оцінки втрат часу введемо коефіцієнт завантаження екскаватора $\rho_{\text{е}}(m)$ і частку простою екскаватора $\varphi_{\text{е}}(m)$. Якщо кількість автосамоскидів менша за оптимальну ($m < m_{\text{опт}}$), середній інтервал прибуття машин до екскаватора приблизно дорівнює

(3.6)

Частина часу, коли екскаватор фактично працює, становить

(3.7)

а частка простою:

$$\varphi_{\text{е}}(m) = 1 - \rho_{\text{е}}(m) = 1 - \frac{m t_L}{t_T}. \quad (3.8)$$

При $m = 1$ екскаватор значну частину змінного часу очікує на транспорт, при наближенні до $m_{\text{опт}}$ ця частка зменшується і прагне до нуля.

Якщо ж , екскаватор практично постійно завантажений ($\rho_e \approx 1$), а надлишкові автосамоскиди вимушено простоюють у черзі під навантаженням та розвантаженням. Оцінимо відносну частку простою автосамоскидів , виходячи з того, що їх теоретична пропускна здатність $Q_{\text{тр max}}(m)$ перевищує фактичну продуктивність комплексу $Q_c = Q_{e \text{ max}}$.

(3.9)

На рис. 2 зображено залежності $\varphi_e(m)$ і . Даний графік показує, що при домінують простої екскаватора, при різко зростають простої автосамоскидів, а поблизу досягається певний баланс, коли обидва види техніки використовуються найбільш раціонально.

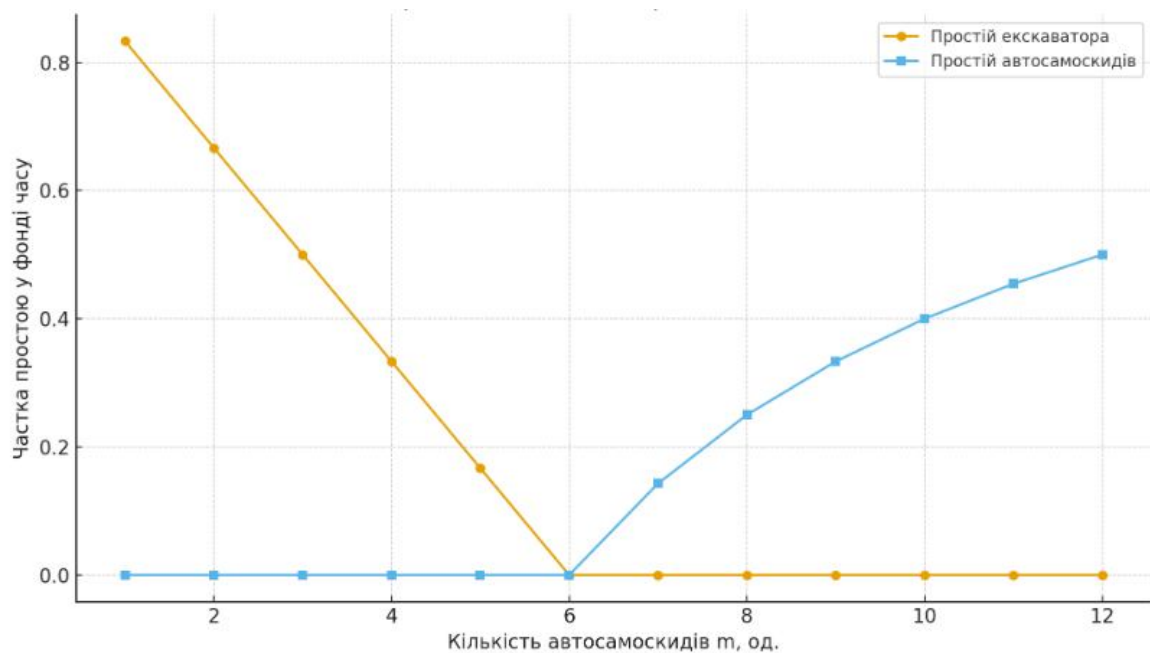


Рис. 3.2 – Баланс простоїв екскаватора та автосамоскидів

Таким чином, для закритої схеми можна зробити висновок: раціональна кількість автосамоскидів під один екскаватор пропорційна відношенню часу транспортного циклу до часу навантаження. Графічні залежності на рис. 1 та

рис. 2 добре аргументують цей висновок і можуть бути використані для підбору складу комплексу в конкретних гірничо-геологічних умовах кар'єру.

У сучасних умовах на великих кар'єрах переважають відкриті схеми роботи, коли парк автосамоскидів є спільним для кількох екскаваторів, а розподіл машин між фронтами робіт здійснюється диспетчерською системою в режимі реального часу. Така схема дозволяє гнучко реагувати на зміни гірничо-геологічних умов, вихід з ладу техніки, зміни пріоритетів за якістю руди та інші стохастичні фактори, однак потребує більш складного математичного опису.

Розглянемо систему з I екскаваторами. Для екскаватора i ($i = 1, \dots, I$) задано час навантаження одного автосамоскида t_{Li} та повний час циклу автосамоскида t_{Ti} , що враховує транспортне плече, час розвантаження та повернення до забою. Якби кожен екскаватор працював у замкненому циклі з власним парком машин, локально оптимальна кількість автосамоскидів під нього визначалася б за формулою

(3.10)

У відкритій схемі весь парк автосамоскидів є спільним; позначимо його потужність через K . Очевидно, що одночасно забезпечити всі локальні оптимуми найчастіше неможливо, оскільки

(3.11)

Тому необхідно визначити, яку середню кількість автосамоскидів доцільно закріпити за кожним екскаватором у середньому, щоб забезпечити максимально рівномірне завантаження всієї системи. Для цього вводиться поняття цільових середніх чисельностей

(3.12)

Величини можна інтерпретувати як «ідеальні» середні кількості машин, які в умовах відкритої схеми мали б працювати в циклі з екскаватором i . Вони пропорційні локально оптимальним і водночас задовольняють умову балансу

$$(3.13)$$

Розглянемо для прикладу роботу двох екскаваторів з різними параметрами циклу. Для першого екскаватора, наприклад, $t_{L,1} = 2,5$ хв, $t_{T,1} = 15$ хв, отже . Для другого екскаватора $t_{L,2} = 3,0$ хв, $t_{T,2} = 20$ хв, звідки . Якщо загальний парк становить $K = 11$ автосамоскидів, то за наведеною формулою розраховуються цільові середні та . Таким чином, спільний дефіцит техніки пропорційно розподіляється між екскаваторами відповідно до їхніх потреб.

Для опису динамічної роботи системи введемо поняття фактичної кількості машин, пов'язаних з екскаватором i у момент часу t , – $N_i(t)$. Ця кількість включає автосамоскиди, які перебувають у черзі під навантаженням, на навантаженні, рухаються завантаженими від екскаватора до пункту розвантаження та порожніми повертаються до екскаватора. Відхилення фактичної кількості від цільової характеристики описується «дефіцитом» машин:

$$(3.14)$$

Якщо $d_i(t) > 0$, екскаватор відчуває нестачу автотранспорту, якщо $d_i(t) < 0$, навпаки, біля нього зосереджено більше машин, ніж потрібно для роботи поблизу оптимального режиму.

Проста стратегія диспетчеризації у відкритій схемі може бути побудована на основі дефіциту. Припустимо, що в кожен дискретний момент часу, наприклад через кожну хвилину, певна частка парку звільняється

(автосамоскиди завершили розвантаження) і може бути перепризначена. Нехай після звільнення частка $\bar{N}_i(t)$ машин залишається закріпленою за тим самим екскаватором, а сумарна кількість вільних машин становить $F(t)$. Тоді система диспетчеризації розподіляє $F(t)$ між екскаваторами пропорційно дефіцитам $d_i(t)$. У підсумку одержуємо оновлені значення:

$$N_i(t+1) = \bar{N}_i(t) + \Delta N_i(t). \quad (3.15)$$

де приріст $\Delta N_i(t)$ пропорційний відносній величині дефіциту. Такий ітераційний процес, реалізований у системі керування парком, призводить до поступового зближення фактичних чисельностей $N_i(t)$ з цільовими значеннями.

Ще одним зручним показником якості роботи відкритої схеми є функція розбалансованості:

$$D(t) = \sum_{i=1}^I (N_i(t) - K_{\text{опт},i})^2. \quad (3.16)$$

Якщо $D(t)$ велика, то система істотно відхилена від цільового стану; якщо $D(t)$ прямує до нуля, фактичний розподіл парку наближається до бажаного. Розглянемо залежність $D(t)$ для того ж прикладу, що і на рис. 4. Крива має спадний характер: на перших кроках моделювання значення $D(t)$ велике, але в міру роботи алгоритму диспетчеризації воно швидко зменшується та коливається в околі низького рівня. Це підтверджує, що відкрита схема з простим алгоритмом «найбільшого дефіциту» забезпечує автоматичне наближення системи до раціонального розподілу парку автосамоскидів.

Узагальнюючи, задачу управління відкритою системою можна формулювати як задачу багатокритеріальної оптимізації на певному часовому горизонті. Введемо функціонал:

$$(3.17)$$

де характеризує сумарні простой екскаваторів,

– час руху автосамоскидів (включно з холостими пробігами)

Тоді можна вважати, що система диспетчеризації в кожний момент часу намагається зменшити це значення. На практиці повну оптимізаційну задачу замінюють наближеними алгоритмами, подібними до наведеного правила розподілу за дефіцитом, однак побудовані вище формули дають достатньо строгий теоретичний фундамент для обґрунтування відкритої схеми функціонування екскаваторно-автомобільного комплексу.

Змоделюємо склад екскаваторно-автомобільного комплексу в тих же умовах, але для відкритого циклу. Результати розрахунків зведемо в таблицю 3.1.

При малих значеннях парку рухомого складу K система обмежена саме транспортом: обидва доданки у формулі для Q визначаються пропускною здатністю своїх підсистем «автосамоскиди–транспортне плече», а не Q_{max} . Починаючи з $K = 13$, досягається насичення за обома екскаваторами: $520 N_1 \geq 3120$ та $390 N_2 \geq 2600$, отже Q досягає теоретичної межі $Q^{\text{max}} = 5720$ т/год і далі не зростає. Міра розбалансованості D при цьому відображає ефект цілочисельного округлення пропорцій **9:10**.

Таблиця 3.1 – Моделювання параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу при відкритому циклі роботи

Парк а/тр	$K_{\text{опт},1}$	$K_{\text{опт},2}$	N_1	N_2	D	Q , т/год	Внесок забою 1, т/год	Внесок забою 2, т/год
6	2,842	3,158	3	3	0,0499	2730	1560	1170
7	3,316	3,684	3	4	0,1994	3120	1560	1560
8	3,789	4,211	4	4	0,0887	3640	2080	1560
9	4,263	4,737	4	5	0,1385	4030	2080	1950
10	4,737	5,263	5	5	0,1385	4550	2600	1950
11	5,211	5,789	5	6	0,0887	4940	2600	2340
12	5,684	6,316	6	6	0,1994	5460	3120	2340
13	6,158	6,842	6	7	0,0499	5720	3120	2600
14	6,632	7,368	7	7	0,2714	5720	3120	2600
15	7,105	7,895	7	8	0,0222	5720	3120	2600
16	7,579	8,421	8	8	0,3546	5720	3120	2600

У детермінованих умовах перевага відкритого циклу зумовлена кращим узгодженням маржинальних приростів: машин менше витрачається на плоскі ділянки з низькою віддачею, а екскаватори виводяться на межі швидше. За стохастичних збурень, навіть коротких простоїв одного з фронтів, перевага зростає, оскільки спільний парк оперативно перерозподіляється до активних забоїв, стабілізуючи подачу і підвищуючи середньогодинну продуктивність.

Розглянемо роботу комплексу в таких умовах.

Продуктивності екскаваторів тепер приймається $Q_{\text{е.1}}^{\text{max}} = 3120$ т/год, $Q_{\text{е.2}}^{\text{max}} = 2600$ т/год, $Q_{\text{е.3}}^{\text{max}} \approx 2785,7$ т/год.

Продуктивність самоскидів відповідно для Е1 – 520 т/год; Е2 – 390 т/год; Е3 – 433 т/год.

У відкритому циклі спершу насичуємо найвигідніші екскаватори: 6 машин на E1 (по 520), далі 6 машин на E3 (по 433), далі 6 машин на E2 (по 390). Після цього корисними лишаються лише два незабезпечених екскаватори: 7-ма машина на E2 дає +260 т/год (до межі 2600), 7-ма на E3 — +185 т/год (до межі 2785). Така впорядкована віддача і визначає оптимальне розміщення для будь-якого парку K .

Середньогодинну продуктивність Q обчислено для сценарію «E2 тимчасово не працює 10% часу»: у відкритому циклі в цей період звільнені машини переводяться до активних забоїв до насичення їх меж; у закритому — парк закріплений і не перекидається між забоями, тож вклад E2 дорівнює нулю на час простою.

В статичних умовах відкритий цикл уже виграє на невеликих значеннях парку $K = 9, 10, 12, 13$) завдяки спрямуванню одиниць у ті ланки, де маржинальний приріст найбільший. При $K = 16$ відкритий цикл дає т/год, перевищуючи закритий (7236,7 т/год), а за великих K обидві схеми насичуються до технічної межі $Q_{E,1}^{max} + Q_{E,2}^{max} + Q_{E,3}^{max} \approx 8505,7$ т/год.

За появи збурень (10% простою E2) розрив зростає: для всіх наведених K середньогодинна продуктивність відкритого циклу вища або не нижча, бо диспетчеризація «переливає» парк у доступні фронти робіт.

Таблиця 3.2 – Моделювання параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу в стохастичних умовах

Парк самоскидів К	Відкритий цикл				Закритий цикл				Q відкритий (10% простою Е2), т/год	Q закритий (10% простою Е2), т/год
	n ₁	n ₂	n ₃	Q _{відкритий} , т/год	n ₁	n ₂	n ₃	Q _{закритий} , т/год		
9	6	0	3	4420,0	3	3	3	4030,0	4420,0	3913,0
10	6	0	4	4853,3	4	3	3	4550,0	4853,3	4433,0
12	6	0	6	5720,0	4	4	4	5373,3	5720,0	5217,3
13	6	1	6	6110,0	5	4	4	5893,3	6089,6	5737,3
16	6	4	6	7280,0	6	5	5	7236,7	7142,6	7041,7
19	6	7	6	8320,0	7	6	6	8060,0	8078,6	7826,0
22	6	7	7	8505,7	8	7	7	8505,7	8245,7	8245,7

На рис. 3.3 візуалізоване порівняння параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу в закритому і відкритому циклах в статичних умовах.

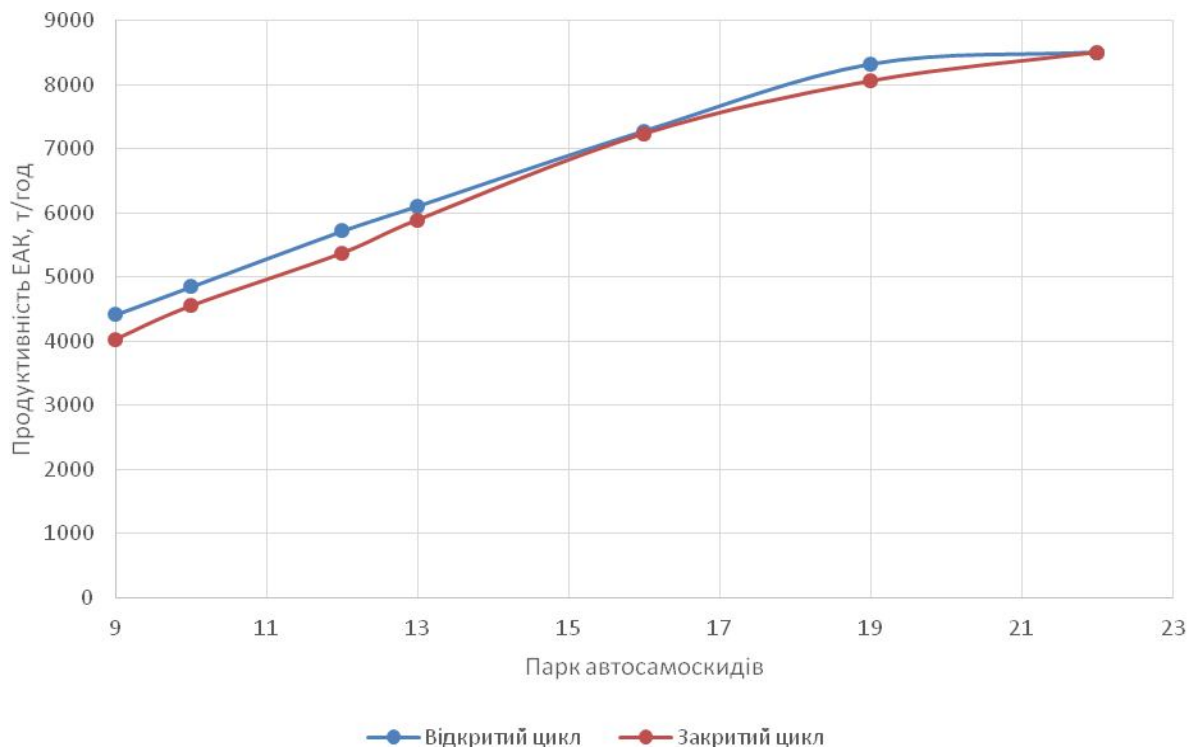


Рис. 3.3 – Моделювання параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу в закритому і відкритому циклах в статичних умовах

Порівняння показників продуктивності в закритому і відкритому циклах при статичних умовах свідчить, що відкритий цикл в середньому забезпечує на 3,5% вищу продуктивність, ніж при закритому.

Якщо ж розглянути динамічні умови, коли один екскаватор тимчасово не працює 10% часу, різниця відкритого і закритого циклів стає ще більш помітною. Порівняння показників продуктивності в закритому і відкритому циклах в динамічних умовах свідчить, що відкритий цикл в середньому забезпечує на 5% вищу продуктивність, ніж при закритому.

На рис. 3.4 візуалізоване порівняння параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу в закритому і відкритому циклах в стохастичних умовах (коли екскаватор №2 не працює 10% своєї зміни).

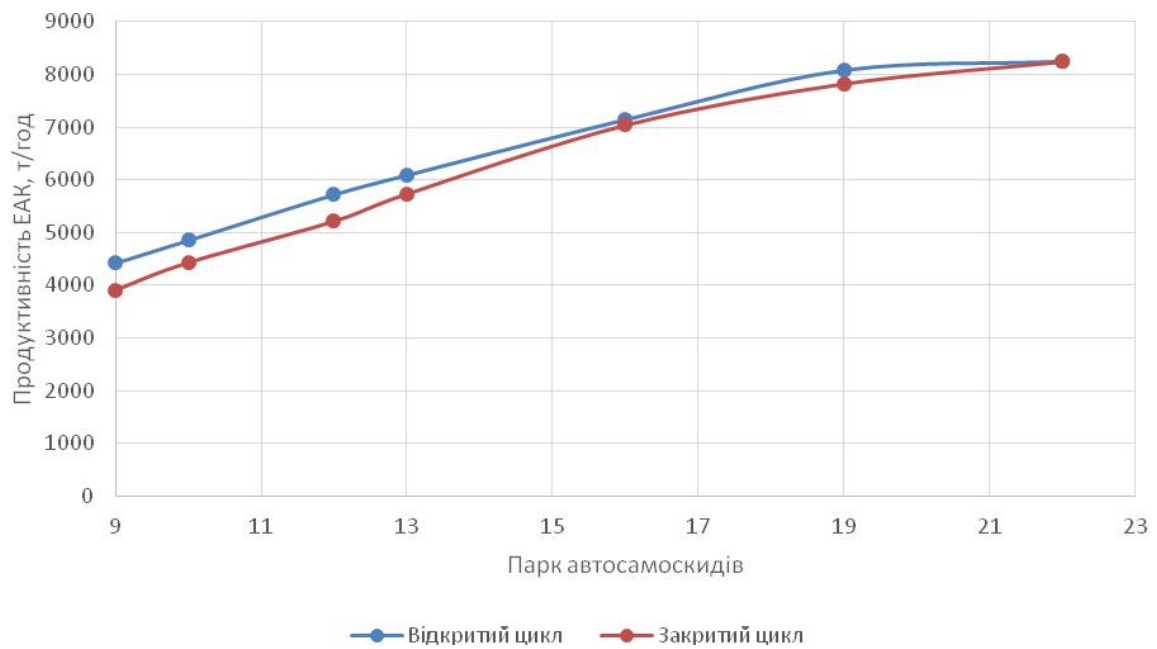


Рис. 3.4 – Моделювання параметрів екскаваторно-автомобільного комплексу в закритому і відкритому циклах в динамічних умовах

У підсумку математичний аналіз показує, що закрита схема є зручною для попередньої оцінки параметрів комплексу й визначення «базових» значень та, тоді як відкрита (диспетчеризована) схема дозволяє, спираючись на ці значення, раціонально розподіляти обмежений парк автосамоскидів між кількома екскаваторами в реальному часі. Поєднання обох підходів забезпечує обґрунтований вибір структури екскаваторно-автомобільного комплексу і створює основу для подальшої оптимізації його роботи з використанням сучасних систем диспетчеризації.

ВИСНОВКИ

Виконаний аналіз досвіду експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів показав, що головними лімітуючими чинниками для глибоких кар'єрів є значні довжини транспортних плечей, зростаюча висота підйому, нерівномірність фронтів робіт і стохастична природа транспортних циклів. За таких умов ефективність визначається не лише технічними характеристиками окремих одиниць техніки, а насамперед узгодженістю роботи технологічного обладнання. Це доводить потребу у встановленні обґрунтованого взаємозв'язку часу навантаження з повним транспортним циклом, раціональному узгодженні вантажопотоків і зменшенні сумарних простоїв.

Огляд впроваджених на кар'єрах систем диспетчеризації засвідчив перехід від ручного закріплення машин до цифрового керування спільним парком із використанням телеметрії, алгоритмів оптимального евристичного призначення рейсів і прогнозування часу прибуття. Такі системи уможливають оперативний перерозподіл автосамоскидів між забоями, підтримання цільових рівнів завантаження екскаваторів та вирівнювання тимчасових дефіцитів. Важливо, що навіть відносно прості правила диспетчеризації, такі як пропорційний розподіл до локальної потреби або призначення за найбільшим маржинальним приростом продуктивності, забезпечують помітне зниження дисбалансів і стабілізують подачу рудної маси.

У третьому розділі проведено математично обґрунтоване дослідження параметрів експлуатації ЕАК для закритої та відкритої схем роботи. Для закритої схеми показано, що оптимальна кількість автосамоскидів під один екскаватор визначається співвідношенням тривалостей рейсу та власне часу транспортування; відповідно, продуктивність комплексу зростає з числом машин до досягнення межі екскаватора, після чого надлишковий парк

спричиняє простої транспорту. Для відкритої, диспетчеризованої, схеми використано поняття цільових часток спільного парку, пропорційних локальним оптимумам, а також міри розбалансованості екскаваторно-автомобільного комплексу як квадратичної відстані від цільового розподілу. Побудовано узагальнені залежності сумарної годинної продуктивності Q_{Σ} від розміру парку K та середньогодинної продуктивності за короткочасних збурень (10 % простою одного з фронтів), що відтворюють фактичну роботу комплексу.

Числові експерименти для характерних параметрів глибоких кар'єрів показали:

- 1) у детермінованих умовах відкритий цикл дає системний, хоч і помірний приріст Q завдяки спрямуванню кожної додаткової машини туди, де маржинальний приріст вищий;
- 2) у динамічних сценаріях зі збуреннями (тимчасова недоступність забою, коливання часу рейсу, локальні затримки на розвантаженні) перевага відкритої схеми зростає за рахунок швидкого перерозподілу парку до активних фронтів, зменшується розбалансованість, підвищуються зведені коефіцієнти використання екскаваторів і зростає продуктивність.

Отримані залежності дозволили встановити мінімальні значення K , починаючи з яких екскаватори стають лімітуючою ланкою, а подальше збільшення парку не підвищує продуктивність, але підвищує простої транспорту.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонований підхід дає інженеру можливість швидко підібрати раціональну кількість екскаваторів і автосамоскидів під задані плечі та висоти підйому, оцінити межі системи і обґрунтовано перейти від закритої схеми до диспетчеризованої. Для умов Кривбасу така модернізація особливо доцільна,

оскільки вона зменшує простої обладнання, підвищує стабільність подачі на фабрику, а відтак покращує показники збагачення і знижує питомі витрати.

Запропоновані моделі та критерії можуть бути безпосередньо застосовані як інструмент попереднього проектування, сценарного аналізу та прийняття рішень щодо переходу від закритих до відкритих схем експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів.

Бібліогграфія.

1. Дриженко А. Ю. Відкриті гірничі роботи : підручник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2014. 590 с. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/168412122.pdf>
2. Дриженко А. Ю., Шустов О. О. Відкриті гірничі роботи: терміни та їх визначення : навч. посіб. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2010. 167 с. URL: <https://ir.nmu.org.ua/bitstreams/3daa92f8-d39b-4d7a-bf35-7f8ac0e83e6c/download>
3. Фролов О. О., Косенко Т. В. Відкриті гірничі роботи. Частина І. Процеси відкритих гірничих робіт : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 151 с. URL: https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/34701/1/Vidkryti_girnychi_roboty.pdf
4. Hustrulid W. A., Kuchta M., Martin R. K. Open Pit Mine Planning and Design. 3rd ed. London : CRC Press, 2013. 1308 p. URL: <https://www.routledge.com/Open-Pit-Mine-Planning-and-Design-Two-Volume-Set-CD-ROM-Pack/Hustrulid-Kuchta-Martin/p/book/9780429170850>
5. Elbeblawi M. M. A., Elsaghier H. A. A., Amin M. T. M., Abdellah W. R. E. Surface Mining Technology. Singapore : Springer, 2022. 344 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-16-3568-7>
6. Lutsenko S., Hryhoriev Y., Kuttybayev A., Imashev A., Kuttybayeva A. Determination of mining system parameters at a concentration of mining operations. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2023. Vol. 1, No. 457. P. 130–140. DOI: <https://doi.org/10.32014/2023.2518-170X.264>
7. Zhang Y., Zhao Z., Bi L., Wang L., Gu Q. Determination of truck–shovel configuration of open-pit mine: A simulation method based on mathematical model. Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 19. Art. 12338. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141912338>
8. Wang X., Dai Q., Bian Y., Xie G., Xu B., Yang Z. Real-time truck dispatching in open-pit mines. International Journal of Mining, Reclamation and

Environment. 2023. Vol. 37, No. 7. P. 504–523. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2201120>

9. Çetin N. Open Pit Truck/Shovel Haulage System Simulation : PhD thesis. Ankara : Middle East Technical University, 2004. 116 p. URL: <http://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12605499/index.pdf>

10. Alarie S., Gamache M. Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. 2002. Vol. 16, No. 1. P. 59–76. DOI: <https://doi.org/10.1076/ijsm.16.1.59.3408>

11. Özdemir B., Kumral M. Simulation-based optimization of truck–shovel material handling systems in multi-pit surface mines. Simulation Modelling Practice and Theory. 2019. Vol. 95. P. 36–48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2019.04.006>

12. Pathan S. M., Memon A. G., Pathan A. G. Simulation optimization of shovel–truck system in open-pit mines considering rockmass parameters. Journal of Advanced Transportation. 2025. Art. 7939037. DOI: <https://doi.org/10.1155/atr/7939037>

13. Yao J., Wang Z., Chen H., Hou W., Zhang X., Li X., Yuan W. Open-pit mine truck dispatching system based on dynamic ore blending decisions. Sustainability. 2023. Vol. 15, No. 4. Art. 3399. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043399>

14. Bissiri Y. Application of agent-based modeling to truck–shovel dispatching systems in open pit mines : PhD thesis. Vancouver : The University of British Columbia, 2002. URL: <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/ubctheses/831/items/1.0091435>

15. Криворізький залізорудний басейн. До 125-річчя з початку промислового видобутку залізних руд / ред. кол.: Ю. Г. Вілкул (відп. ред.) та ін. – Кривий Ріг : Видавничий центр КТУ, 2006. – 583 с.

16. Криворізький залізорудний басейн, Кривбас // Енциклопедія історії України : у 10 т. / редкол.: В. А. Смолій (голова) та ін. – Київ : Наук. думка, 2003–2013. – Режим доступу: <https://resource.history.org.ua>
17. Маланчук З. Р., Корнієнко В. Я., Сорока В. С., Васильчук О. Ю. Транспортні системи гірничих підприємств : навч. посіб. – Рівне : НУВГП, 2018. – 190 с. – Режим доступу: <http://ep3.nuwm.edu.ua/id/eprint/14197>
18. Monastyrskiy Ya., Sistuk V., Bohachevskiy A. The sustainable future of open-pit trucks operation // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 168. – Art. 07005. – DOI: 10.1051/e3sconf/202016807005.
19. Слободянюк В. К. Аналіз і вдосконалення конструкцій перевантажувальних пунктів автомобільно-залізничного транспорту // Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. – 2019. – Т. 30 (69), ч. 2, № 2. – С. 54–60. – Режим доступу:
https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/eng/journals/2019/2_2019/part_2/10.pdf
20. Гайдук М. О. Оптимізація параметрів циклічно-потоккової технології видобутку руди на Інгулецькому ГЗК : кваліфікаційна робота магістра. – Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2018. – 87 с. – Режим доступу:
<https://elibrary.kdpu.edu.ua/bitstream/123456789/2832/1/Кваліфікаційна%20робота%20Гайдука%20М.О.pdf>
21. Hryhoriev I., Lutsenko S., Hryhoriev Yu., Tkachuk Ye., Ghora M. Study of the influence of excavator typesize on the boundaries of open pit mining // Mining Science. – 2020. – Vol. 63. – P. 26–35. – Режим доступу:
https://www.researchgate.net/publication/349317554_Study_of_the_influence_of_excavator_typesize_on_the_boundaries_of_open_pit_mining
22. Технології відкритої розробки корисних копалин : підручник / за ред. О. М. Панчишина. – Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2020. – 452 с.

23. Тролейвоз. Дослідження можливості застосування дизель-тролейвозів у залізрудних кар'єрах України : пояснювальна записка кваліфікаційної роботи. – Харків : ХНАДУ, 2020. – 33 с. – Режим доступу: https://www.khadi.kharkov.ua/fileadmin/P_vcheniy_secretar/ABTOM_TPAHCII/AE/2020R/AT_AE_TROLEIVOZ.pdf

24. What equipment for GMK is offered by the largest dealers // GMK Center. – 2019. – Режим доступу: <https://gmk.center/en/analytics/what-equipment-for-gmk-is-offered-by-the-largest-dealers/>

25. Fleet management systems in mining, often referred to as FMS, are the backbone of surface mines // International Mining FMS Report. – 2020. – 32 p. – Режим доступу: <https://www.ivoive.com/wp-content/uploads/2020/05/International-Mining-FMS-Report-May-2020.pdf>

26. Metinvest Annual Report 2021. – 2022. – 296 p. – Режим доступу: https://metinvestholding.com/Content/Entities/Report/32/en/Metinvest_AR2021.pdf

27. Горпинич О.В. Інтегровані автоматизовані системи управління на вітчизняних гірничо-металургійних підприємствах // Вісник Кременчуцького національного університету. – 2015. – № 5. – С. 194–200. – Режим доступу: <https://core.ac.uk/download/pdf/147457788.pdf>

28. Організація системи управління технологічними перевезеннями автомобільним транспортом на залізрудних кар'єрах: кваліфікаційна робота бакалавра. – Кривий Ріг: ДВНЗ «Криворізький національний університет». – Режим доступу: <https://ds.knu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/7742/1>

29. Wenco International Mining Systems. Fleet Management at Assarel-Medet JSC: Case Study [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.wencomine.com/case-studies-and-white-papers/fleet-management-at-assarel-medet-jsc>

30. Wenco International Mining Systems. Golden Queen Mining Gets Tighter Cycles, More Loads with Wenco Fleet Management System

[Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.wencomine.com/resources/videos>

31. Wenco International Mining Systems. Salares Norte Moves Ahead with New Fleet Management System from Wenco; Technology and team dedication essential to Wenco implementation at Gold Fields Salares Norte [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<https://www.wencomine.com/videos/salares-norte-moves-ahead-with-new-fleet-management-system-from-wenco>; <https://www.wencomine.com/news/technology-team-dedication-essential-to-wenco-implementation-at-gold-fields-salares-norte>

32. Sgurev V., Vassilev V., Dokev N., Genova K. TRASY – An automated system for real-time control of industrial truck haulage in open pit mines // European Journal of Operational Research. – 1989. – Vol. 43. – P. 44–52. – DOI: [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90408-6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(89)90408-6)

33. Temeng V.A., Otuonye F.O., Friendewey J.O. Real-time truck dispatching using a transportation algorithm // International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment. – 1997. – Vol. 11, No. 4. – P. 203–207. – DOI: <https://doi.org/10.1080/09208119708944093>

34. Ahangaran D.K., Yasrebi A.B., Wetherelt A., Foster P. Real-time dispatching modelling for trucks with different capacities in open pit mines // Archives of Mining Sciences. – 2012. – Vol. 57, No. 1. – P. 39–52. – DOI: <https://doi.org/10.2478/v10267-012-0003-8>

35. Wang X., Dai Q., Bian Y., Yang Z. Real-time truck dispatching in open-pit mines // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2023. – Vol. 37, No. 8. – P. 1147–1170. – DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2023.2201120>

36. Smith A., Linderroth J., Luedtke J. Optimization-Based Dispatching Policies for Open-Pit Mining // Optimization Online. – 2020. – 54 p. – Режим доступа: <https://optimization-online.org/wp-content/uploads/2020/02/7646.pdf>

37. Mirzaei-Nasirabad H., Askari-Nasab H., Alizadeh B. An optimization model for the real-time truck dispatching problem in open-pit mining operations // Optimization and Engineering. – 2023. – Online first. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s11081-022-09780-x>
38. Ahumada G.I., Riveros E., Herzog O. An Agent-based System for Truck Dispatching in Open-pit Mines // Proceedings of the 12th International Joint Conference on Computational Intelligence (IJCCI 2020). – 2022. – P. 257–268. – Режим доступу: <https://www.scitepress.org/Papers/2020/89618/89618.pdf>
39. Noriega R., та ін. Deep Reinforcement Learning based real-time open-pit mine truck dispatching // Computers & Operations Research. – 2025. – (у друці). – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0305054824002879>
40. Hazrathosseini A., та ін. Transition to intelligent fleet management systems in open pit mines: a reinforcement learning perspective // Mining, Metallurgy & Exploration. – 2024. – Online first. – DOI: <https://doi.org/10.1177/25726668231222998>
41. Wang Q., та ін. Fleet management drives green and climate-smart open pit mining // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2024. – Vol. 195. – Art. 113231. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113231>
42. Mining Fleet Management System in Real-Time “State of Art” // Open Ukrainian Citation Index (OUCI) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ouci.dntb.gov.ua/en/works/7XrqXOZI/>