

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: **«Багатофакторна оптимізація управління екскаваторно-автомобільними комплексами глибоких кар’єрів»**

Виконав ст. групи ГІВ-23-1м _____ /Куруп’ятник І.П./

Керівник _____ /Григор’єв Ю.І./

Завідувач кафедри _____ /Жуков С.О./

Кривий Ріг

2024 р.

РЕФЕРАТ

Магістерська робота на тему «Багатофакторна оптимізація управління екскаваторно-автомобільними комплексами глибоких кар'єрів» викладена на 56 стр., містить 6 рис., 2 таблиці, 57 джерел літератури та 1 додаток.

Актуальність теми. Зростаючі вимоги до ефективності видобутку корисних копалин та конкурентоспроможності гірничих підприємств вимагають впровадження передових технологій управління та оптимізації виробничих процесів. В умовах економічної нестабільності та зростання вартості енергоресурсів, оптимізація роботи екскаваторно-автомобільних комплексів дозволяє значно знизити виробничі витрати, підвищити продуктивність праці та забезпечити стабільність виробничих процесів.

В той же час, швидкий розвиток інформаційних технологій та автоматизації виробничих процесів відкриває нові можливості для вдосконалення управління екскаваторно-автомобільними комплексами. Використання систем моніторингу, диспетчеризації та автоматизованого планування дозволяє забезпечити оперативний контроль за станом техніки, своєчасно виявляти та усувати проблеми, оптимально розподіляти ресурси та підвищувати загальну ефективність роботи.

Гірничовидобувна галузь є доволі ресурсоємкою, а значні обсяги інвестицій у неї потребують обґрунтованих рішень щодо розвитку та модернізації виробничих потужностей. Багатофакторна оптимізація управління екскаваторно-автомобільними комплексами дозволяє не лише підвищити операційну ефективність підприємств, але й забезпечити їхню інвестиційну привабливість, що сприяє залученню капіталовкладень та розвитку галузі в цілому.

Мета й завдання роботи. Метою даного магістерського дослідження є науково обґрунтоване вдосконалення підходів до динамічного управління

параметрами екскаваторно-автомобільних комплексів. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані **основні задачі дослідження:**

1. Проаналізувати сучасний стан виймально-навантажувальних і транспортних робіт в глибоких кар'єрах.

2. На основі аналізу теоретичних основ і досвіду експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів визначити основні фактори, що визначають їх продуктивність.

3. Обґрунтувати і розробити нейромережеву модель динамічного управління параметрами екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру.

Об'єкт дослідження – процес виймально-навантажувальних і транспортних робіт глибоких кар'єрів.

Предмет дослідження – параметри екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів.

Ідея. Підвищити операційну ефективність відкритих гірничих робіт за рахунок предиктивного динамічного управління параметрами екскаваторно-автомобільних комплексів за допомогою нейромережевих технологій.

Методи дослідження: аналізу та синтезу наукових джерел та досвіду ведення відкритих гірничих робіт; метод нейромережевого моделювання – для дослідження і прогнозування параметрів екскаваторно-автомобільних комплексів.

Наукове значення роботи полягає у аналізі наукових основ і досвіду експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів глибоких кар'єрів, обґрунтуванні чинників, що визначають їх продуктивність, а також нейромережевому моделюванні і прогнозуванні параметрів цих комплексів.

Практичне значення роботи полягає у розробці нейромережевої моделі для динамічного прогнозування продуктивності екскаваторно-

автомобільних комплексів на основі визначених чинників умов їх експлуатації і технічних параметрів.

ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИЙ КОМПЛЕКС, ГЛИБОКИЙ
КАР'ЄР, НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ, ПРОГНОЗУВАННЯ,
БАГАТОФАКТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ НАВАНТАЖУВАЛЬНО-ТРАНСПОРТНИХ РОБІТ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ	7
1.1 Місце та роль планування вантажно-транспортних робіт у забезпеченні ефективного використання вантажно-транспортного обладнання кар'єрів	7
1.2 Аналіз існуючих методів планування вантажно-транспортних робіт у кар'єрі	10
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ УПРАВЛІННЯ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ПОТУЖНИХ КАР'ЄРІВ	24
2.1 Аналіз досвіду планування і контролю експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів	24
2.2 Наукове обґрунтування роботи систем диспетчеризації в динамічних умовах шихтування руди	32
РОЗДІЛ 3. БАГАТОФАКТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ	37
3.1 Визначення факторів впливу на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу	37
3.2 Розробка нейромережевої моделі прогнозування продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу	39
3.3 Оцінка валідності роботи нейромережевої моделі	45
ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	50
Додаток А	57

ВСТУП

Гірничодобувна галузь є одним із ключових секторів економіки, що забезпечує сировинну базу для багатьох галузей промисловості. В сучасних умовах, коли вимоги до ефективності, продуктивності та екологічної безпеки видобутку корисних копалин постійно зростають, особливого значення набуває оптимізація виробничих процесів у кар'єрах. Одним з найбільш важливих та складних завдань є управління екскаваторно-автомобільними комплексами, які відіграють вирішальну роль у видобутку та транспортуванні гірничої маси.

Ефективне функціонування екскаваторно-автомобільних комплексів залежить від багатьох чинників, серед яких ємність ковша екскаватора, вантажопідйомність самоскида, відстань транспортування, гранулометричний склад порід, технічний стан обладнання та організація логістичних потоків. Комплексне врахування цих чинників та їх оптимізація є надзвичайно важливими для забезпечення високої продуктивності, зниження витрат та мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище.

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності роботи гірничих підприємств в умовах зростаючих вимог до економічної та екологічної складових виробничих процесів. Сучасні технології автоматизації та інформаційні системи відкривають нові можливості для вдосконалення управління екскаваторно-автомобільними комплексами, дозволяючи забезпечити оптимальне планування та оперативний контроль за станом виробничої системи.

Таким чином, ця магістерська робота спрямована на вирішення актуальних проблем гірничодобувної галузі, зокрема підвищення продуктивності та економічної ефективності видобутку корисних копалин, що має велике значення для стійкого розвитку галузі та забезпечення конкурентоспроможності гірничих підприємств.

РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ НАВАНТАЖУВАЛЬНО-ТРАНСПОРТНИХ РОБІТ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

1.1 Місце та роль планування вантажно-транспортних робіт у забезпеченні ефективного використання вантажно-транспортного обладнання кар'єрів

Автомобільний транспорт – одна з основних ланок технологічного процесу видобутку корисних копалин відкритим способом. Тому якість функціонування кар'єрного автотранспорту значною мірою визначає ефективність як суміжних із ним ланок, і всього процесу відкритої видобутку загалом. Планування є вихідним пунктом у створенні транспортних робіт. Від якості планування, від того, наскільки повно і адекватно враховується при цьому реальна гірничо-технічна обстановка, залежить технологічна та економічна ефективність кар'єрного автотранспорту.

Істотною властивістю, що не враховується в існуючих методиках, кар'єрного транспорту, як технологічної одиниці, є взаємозв'язок з навантажувачем екскаватором, з перевантажувальним пунктом та з іншими автосамоскидами, що працюють у кар'єрі. Для найбільш повного і всебічного вивчення цієї властивості та впливу на продуктивність автосамоскида інших визначальних факторів необхідно представити автомобіль як елемент системи «екскаваторно-автомобільний комплекс» (ЕАК), що включає вантажний екскаватор, автотранспортні одиниці і пункт розвантаження.

Неповно враховується діючими методиками і кількість автосамоскидів, що працюють в ЕАК. Цей показник визначає продуктивність комплексу загалом та продуктивність кожного автомобіля окремо. Насправді забезпеченість заявок на автотранспорт змінюється у межах від 0,4 до 1,6, що також обумовлює коливання фактичної продуктивності автосамоскидів за інших рівних умов експлуатації [1].

Достовірність рішень, що застосовуються при плануванні роботи ЕАК в даний час визначається тим, що місячні обсяги на кожен екскаватор встановлюються виходячи з емірично підтвердженої у даних гірничо-технічних умовах виробничої потужності екскаватора враховуючи можливості її коригування у бік зменшення за рахунок погіршення якості вибуху, необхідності проведення допоміжних робіт, графіка планових ремонтів тощо. При цьому слід виділити той факт, що основним інструментом оцінки оптимальності прийнятого рішення є досвід та інтуїція плануючого, які дають добрі результати при організації роботи комплексу на ізолюваній ділянці (блок, забій).

Одним з основних показників плану, що відображає взаємозв'язок роботи вантажного та транспортного обладнання, є кількість транспортних засобів, що виділяються щозмінно. Тривалість завантаження зазвичай визначається шляхом проведення хронометражних вимірів для середніх умов екскавації та враховує тільки тип вантажного та транспортного засобу та вид гірничої маси. Однак, як показують спостереження, тривалість виконання основних і допоміжних операцій циклу змінюється у значних межах залежно від параметра вибою та якості підготовки порід до виймання. Таким чином, для встановлення оптимального режиму роботи має змінюватись і кількість транспорту, і це необхідно враховувати під час планування.

Звертаючись до міжнародного досвіду, актуальність цього становища особливо чітко простежується при роботі кар'єра Мурунтау [2], де все кар'єрне поле картировано по геотехнічним властивостям порід. Властивості порід класифіковані за питомим опором копання, коефіцієнт розпушення, стиснення, середнього діаметра куска в розвалі з метою визначення раціональної ємності ковша екскаватора (змінний ківш). Подібне картування може бути використане при плануванні роботи ЕАК як одна із складових бази знань умовної експертної системи планування роботи в кар'єрі.

На планування роботи ЕАК у тій чи іншій мірі впливає велика кількість факторів: гірничо-геологічні властивості порід, що розробляються, якість розпушування підірваної гірської маси, параметри вибою, кваліфікація машиніста, забезпеченість транспортом, надійність екскаватора, стан і пропускна здатність внутрішньокар'єрних автодоріг, віддаленість перевантажувального пункту і т.д.

Найчастіше вплив основних чинників (параметрів вибою, довжини екскаваторного блоку, кусковаті підірваної гірської маси, надійності екскаваторів) розглядається ізольовано. Для планування першорядне значення має отримання досить надійних залежностей, які враховують комплексний вплив факторів. Такі залежності можуть бути отримані за допомогою методу множинної кореляції.

Кореляційний аналіз показує, що продуктивність автосамоскидів значною мірою залежить від висоти підйому у вантажному напрямку. Причому облік відстані транспортування та висоти підйому має бути спільним, оскільки зміна висоти підйому на різних відстанях нерівномірно позначається на продуктивності автосамоскидів.

Метод дисперсійного аналізу може бути застосований для оцінки, наприклад, змінної продуктивності машиністів комплексу та інших факторів, складність оцінки яких обумовлена їх неоднозначністю.

Для складання планів роботи ЕАК у календарній постановці особливого значення набувають питання організаційного забезпечення. Відомо, що для гірничого виробництва характерні прості обладнання, зумовлені багатьма причинами технічного, технологічного та організаційного характеру.

На кар'єрах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» основна частка витрат (до 60%) припадає на технологічні процеси з виймання і транспортування гірничої маси [3]. Отже, якість управління цими процесами визначає якість управління кар'єрами та ефективність їхньої роботи.

Відповідно до звітних показників місячна продуктивність ЕАК коливається залежно від умов роботи від 30-50 до 200-300 тис. т/місяць. Існуючі на кар'єрах комбінату ПАТ «Південний ГЗК» методи планування продуктивності недостатньо точно та адекватно враховують реальні умови експлуатації автосамоскидів та екскаваторів, такі як структурна складність вибоїв, робота на контактній підірваної та не підірваної гірничої маси, параметри вибою та якість розпушування гірничої маси, якість доріг та складність трас руху, робота з відкритого циклу, зміни сезонно-кліматичних умов за періодами року, внутрішньозмінна надійність роботи екскаваторів та автосамоскидів та ряд інших особливостей.

Таким чином, одним із актуальних напрямів підвищення ефективності роботи ЕАК є:

- 1) вдосконалення узгодження їхньої продуктивності за рахунок більш точного та повного обліку визначальних факторів;
- 2) розробка технології автоматизованого планування та контролю роботи комплексів.

1.2 Аналіз існуючих методів планування вантажно-транспортних робіт у кар'єрі

Основні наукові принципи експлуатації ЕАК закладені в роботах Мельникова М.М., Ржевського В.В., Трубецького К.М., Співаковського А.О., Яковлева В.Л., професорів Шешко Є.Ф., Васильєва М.В., Новожилова М.Г., Хохрякова В.С., Потапова М.Г., Томакова П.І., Вінницького К.Є., Сімкіна Б.А., Фіделєва А.С., Михайлова В.А., Шиліна А.М., Леля Ю.І., Кулешова О.А., Смирнова В.П., Алєнічева В.М., Стєніна Ю.В., Мартинова Н.В., Дороненко О.П., Сорокіна Л. А., Котяшева АА, Маслова В.П. та ін.

У працях Мельникова Н.В., Ржевського В.В., Співаковського А.О., Васильєва М.В., Хохрякова В.С., Потапова М.Г. дано основи визначення

планування продуктивності кар'єрних автосамоскидів, результати яких використовуються в «Єдиних нормах виробітку» [4-7]. У зазначених роботах транспортування гірничої маси розглядається як детермінований процес, наводиться значення та методика розрахунку тривалості елементів транспортного циклу автосамоскидів вантажопідйомністю від 5 до 40 т для умов роботи в кар'єрах, враховується інтенсивне та екстенсивне використання автосамоскидів.

Питання, пов'язані з усереднення якості руд, що є нині одними з найважливіших у процесі планування та управління гірничими роботами, досліджені в роботах докторів технічних наук Бастана П.П. [8], Новожилова М.Г. [9], Зарайського В.М. та інших.

Розробка та впровадження автоматизованих систем (АСУ) виробництвом на кар'єрах сприяли перегляду сформованих методів та принципів планування. Основна увага при цьому приділяється розробці математичних моделей та методів поточного та оперативного планування у режимі усереднення якості руд та інформаційного забезпечення планування. З численних публікацій, присвячених питанням цього напрямку, можна виділити роботи професора Новожилова М.Г. [9], професора технічних наук Аленичева В.М., Табакмана І.Б., Суменкова М.І., Прудовського А.Д., Нападайло В.А. та інших [10-11]. Аналіз наукових досліджень цього напрямку показує, що завдання планування вантажно-транспортних робіт є однією з найважливіших і має самостійне значення.

У реальних умовах експлуатації параметри транспортного процесу визначаються цілою низкою факторів в умовах неповної визначеності цих даних. Тому в ряді досліджень останніх років, що стосуються ефективності експлуатації кар'єрних автосамоскидів, наводяться статистичні залежності зміни продуктивності від тих чи інших гірничотехнічних умов [11-13]. Досить потужна плеяда науковців використовують статистичні залежності тривалості елементів транспортного циклу або продуктивності від одного чи

декількох різних факторів.

У роботі [14] описується вплив дальності транспортування на середньотехнічну швидкість автосамоскида регресійними рівняннями другого порядку, але в тривалість транспортного циклу - лінійними регресійними рівняннями. Однак дані залежності складені без урахування фізичної суті впливу дальності транспортування на середньотехнічну швидкість руху автосамоскида, тому вони мають невисоку надійність і можуть бути застосовані лише до умов, в яких отримано вихідні дані. Найбільш вдалою у плані є наведена в [15] гіперболічна залежність швидкості від дальності транспортування. Але, як і в вищевказаних роботах, автор пропонує використовувати її для визначення швидкості як у вантажному, так і в порожньому напрямку без урахування особливостей режимів руху автосамоскида в кожному з цих напрямків.

Однією з особливостей експлуатації автотранспорту у кар'єрі є значна варіація дорожніх умов. Тому низка авторів [8, 16, 17] вважають транспортно-експлуатаційні якості автошляхів одним з основних факторів продуктивності автосамоскидів. Проте ними не досліджено кількісні критерії якості доріг та залежності впливу дорожніх умов на продуктивність автосамоскидів.

Просторове розміщення робочих місць гірничо-транспортного обладнання в кар'єрі зумовлює різноманітність характеристик трас руху автосамоскидів: висоти підйому та середньозваженого ухилу. Дослідження цих показників як чинників продуктивності автосамоскидів проведено у роботах [18-19]. У роботі [19] зокрема наведено регресійну криволінійну залежність середньотехнічної швидкості автосамоскидів БелАЗ-540, лінійну залежність продуктивності автосамоскидів БалАЗ-548А від середньозваженого ухилу дороги. Сорокіним Л.А. [18] встановлено двофакторні закономірності спільного впливу продуктивність автотранспорту висоти підйому і відстані транспортування. При цьому

враховується в основному зміна швидкості руху автомобіля, але залишається поза увагою зміна його внутрішньозмінної надійності та ймовірнісних характеристик вантажно-транспортного процесу.

Д.В. Стенін у роботі [20] обґрунтував і запропонував алгоритм для вибору оптимального ступеня завантаження автосамоскиду та вибору умов експлуатації в конкретному екскаваторно-автомобільному комплексі.



Рис. 1.1 – Алгоритм вибору умов експлуатації самоскиду (за Стеніним Д.В.)

У міру збільшення часу експлуатації швидкість руху, використання в часі, отже, і продуктивність автосамоскидів знижуються. Розроблено статистичні залежності зміни продуктивності автосамоскидів від терміну служби та пробігу з початку експлуатації.

Формування та зміна основних параметрів роботи кар'єрних автосамоскидів відбувається в результаті сукупного впливу та зміни безлічі

факторів. Тому найбільш тотожно закономірності зміни продуктивності та інших параметрів роботи автосамоскидів можуть бути описані методом багатфакторного кореляційно-регресивного аналізу. Цей метод використовувався Кулешовим А.А. для опису швидкостей руху та витрати дизельного палива, Смирновим В.П., Котяшевим А.А., Лелем Ю.І. [22] - для опису швидкостей руху, тривалості транспортного циклу та продуктивності автосамоскидів. Практичне використання накопиченого досвіду дозволяє отримувати достовірніші регресійні моделі у всій області зміни факторів, що визначають описуваний параметр. Наведені у вищезгаданих працях моделі досить повно відображають зміну параметрів роботи автомобілів від визначальних факторів з урахуванням їхньої взаємодії. Однак форми моделей мало точно передають фізичну суть впливу окремих факторів, що обмежує сферу їх застосування та знижує точність. Значною мірою позбавлені цього недоліку багатфакторні залежності, наведені в роботах [11-13]. Але представляється недоцільним описувати багатфакторними регресійними рівняннями транспортний цикл в цілому або безпосередньо продуктивність автосамоскидів, тобто ці параметри складаються з елементів, які діють як не однорідні чинники. Так, транспортний цикл включає не тільки час руху, що визначається діючими в моделі факторами: відстанню транспортування, середньозваженим ухилом траси, часткою тимчасових автошляхів, а й час розвантаження, навантаження і очікування в черзі, які залежать від інших аргументів, що не увійшли в модель.

У цьому плані є певна цінність робіт, де на підставі експериментальних досліджень, виконаних за допомогою спеціальної вимірювальної апаратури, наведені дані про тривалість окремих операцій транспортного циклу автосамоскидів вантажопідйомністю 27-75 т у різних гірничотехнічних умовах. У [23] наведено методику розрахунку на ЕОМ тривалості транспортного циклу, засновану на використанні диференціального рівняння руху автомобіля. Методика дозволяє за допомогою ЕОМ досить точно

розраховувати середню тривалість руху автосамоскида трасою. Вона докладно враховує конструктивні характеристики автомобілів, опір руху на ділянках траси, мікропрофіль та форму траси у плані. Але реалізація її становить певну труднощі через великий обсяг вихідної інформації, методика не враховує технічний стан автомобіля та ймовірнісний характер процесу руху.

Ймовірнісний характер мають і транспортно-експлуатаційні якості дороги, технічні властивості автомобіля та поведінка водія при керуванні автосамоскидом.

The screenshot shows the 'Экскаватор-оптим' software interface. It includes the following sections and data:

- Ввод исходных параметров (Input of initial parameters):**
 - Параметры забоя (Excavation parameters):
 - Высота забоя, м: 12
 - Радиус выгрузки в транспортное средство, м: 9,7
 - Высота выгрузки, м: 8,5
 - Угол поворота на разгрузку, град.: 90
 - Производственная программа (Production program):
 - Мощность предельная, тыс. т/год: 1200
 - Режим работы экскаватора, ч/сут.: 12
 - Климатические условия (Climate conditions):
 - Среднегодовая температура, град.: -4
 - Тип климата: Умеренный
 - Оператор экскаватора (Excavator operator):
 - Рядок назначения экскаватора: 4
 - Опыт работы, лет: 10
- Характеристика горной массы (Rock mass characteristics):**
 - Плотность горной массы, т/м.куб.: 1,8
 - Удельное сопротивление копанью, кПа: 275
 - Коэффициент разрыхления: 0,9
 - Коэффициент наполнения ковша: 1,1
- Калькуляционные параметры (Calculation parameters):**
 - Карьерный автотранспорт: БелАЗ 7535
 - Показатель производительности, м.куб./кВт: 0,2
 - Показатель металлоемкости, т/м.куб.: 7,5
 - Показатель энергоемкости, кВтч/м.куб.: 27
- Оптимальный экскаватор (Optimal excavator):**
 - Тип экскаватора: Правая лопата
 - Модель экскаватора: Hitachi EX 1200
 - Обобщенный показатель качества: 0,912
- Результаты расчета (Calculation results):**
 - Обобщенный показатель качества: 0,905
 - Выбор экскаватора: Caterpillar FX-234

Рис. 1.2 – Интерфейс программного комплекса для динамического выбора состава экскаваторно-автомобильного комплекса

Необхідність обліку імовірнісного характеру процесів нині загальноприйнята у технічній і, зокрема, у гірничотехнічній літературі [24-29]. Ігнорування цього факту та розрахунок вихідних параметрів процесу за середніми значеннями визначальних факторів у більшості випадків спотворює справжній результат. Оцінка «середньої» поведінки системи, виходячи лише із середніх значень випадкових факторів (без урахування

їхнього розсіювання та взаємних впливів), може призвести до грубих ПОМИЛОК.

Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт
Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт	Продукт
BEML LIMITED (BHARAT)	Индия	www.bemlindia.com	Карьерные гидравлические						5
BUCYRUS INTERNATIONAL, INC.	США	www.bucyrus.com	Драглайны; Карьерные гидравлические; Карьерные механические						7
BUMAR PHZ SP. Z O.O.	Польша	www.bumar.com	Карьерные гидравлические						3
CASE CONSTRUCTION EQUIPMENT	Италия	www.casece.com	Карьерные гидравлические						12
CATERPILLAR INC.	США	www.cat.com	Карьерные гидравлические						8
DEERE & COMPANY (JOHN DEERE)	США	www.deere.com	Карьерные гидравлические						9
HEAVY ENGINEERING CORPORATION LTD.	Индия	www.hectfd.com	Драглайны; Карьерные механические						5
HITACHI CONSTRUCTION MACHINERY CO., LTD.	Япония	www.hitachim.ru	Карьерные гидравлические						9
Model of excavator	Working equipment	Drive type	Photo	Browser					
ZX470-5G	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3943/18316/file/ZX470-5G_KS-F					
ZX670-5G	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3949/18347/file/ZX670-5G_KS-F					
ZX870-5G	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3951/18354/file/ZX870-5G_KS-F					
EX 1200-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3934/18281/file/KS-EN112_EX1					
EX 1200-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3934/18281/file/KS-EN112_EX1					
EX 1900-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3935/18283/file/EX1900-6_KS-F					
EX 1900-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3935/18283/file/EX1900-6_KS-F					
EX 2600-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3939/18298/file/EX2600-6_KS-F					
EX 2600-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3939/18298/file/EX2600-6_KS-F					
EX 3600-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3936/18285/file/EX3600-6_KS-F					
EX 3600-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3936/18285/file/EX3600-6_KS-F					
EX 5600-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3938/18371/file/EX5600-6_KS-F					
EX 5600-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/3938/18371/file/EX5600-6_KS-F					
EX 8000-6 (об. лопата)	Обратная лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/4080/22175/file/EX8000-6_KS-E					
EX 8000-6 (прям. лопата)	Прямая лопата	Гидравлический	Package	www.hitachim.ru/content/download/4080/22175/file/EX8000-6_KS-E					
HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO., LTD	Юж. Корея	www.hhi.co.kr	Карьерные гидравлические						12
KOBELCO CONSTRUCTION MACHINERY CO., LTD.	Япония	www.kobelco-kenki.co.jp	Карьерные гидравлические						8
KOMATSU LTD.	Япония	www.komatsu.ru	Карьерные гидравлические						11
LBX COMPANY, LLC (LINK-BELT)	США	www.lbxco.com	Карьерные гидравлические						8
LIEBHERR-INTERNATIONAL AG	Германия	www.liebherr.com	Карьерные гидравлические						10
NEW HOLLAND CONSTRUCTION	Великобритания	www.newhollandconstruction.com	Карьерные гидравлические						4
PRH MINING EQUIPMENT INC.	США	www.phmining.com	Драглайны; Карьерные механические						9
SICHUAN BONNY HEAVY MACHINERY CO., LTD	Китай	www.bonnyhm.com	Карьерные гидравлические						3
SINOWAY INDUSTRIAL CO., LTD	Китай	www.sinoway-sh.com	Карьерные гидравлические						5
SUMITOMO (S.H.I.) CONSTRUCTION MACHINERY	Япония	www.sumitomokenki.com	Карьерные гидравлические						7
TELCON CONSTRUCTION EQUIPMENT CO., LTD	Индия	www.telcon.co.in	Карьерные гидравлические						9
TEREX CORPORATION	США	www.terex.com	Карьерные гидравлические						14
UNEX A.S.	Чехия	www.unex.cz	Карьерные гидравлические						5

Рис. 1.3 – Типова база даних кар'єрного транспорту

Багато авторів щодо продуктивності ЕАК застосовують моделювання з допомогою методів теорії масового обслуговування [19, 30] і статистичних випробувань [31]. Пропоновані в літературі методи обліку ймовірнісного характеру процесу транспортування гірничої маси в кар'єрі можна розділити на два напрями: використання теорії масового обслуговування та статистичне моделювання. Підставою застосування апарату теорії масового обслуговування для опису автотранспортного процесу є припущення про можливість описати потік вимог до обслуговування автосамоскидів, що надходять до екскаватора, і тривалість обслуговування відповідно функцією розподілу Пуассона і показовим розподілом. Однак, більш докладний аналіз та результати емпіричних спостережень [31] показують хибність цих припущень. Відомий у теорії масового обслуговування математичний апарат для умов, коли потік вимог і вихідний потік відмінні від найпростішого,

дуже громіздкий і часом не забезпечує рішення.

Взаємозв'язок екскавації та транспортування при цьому розглядається з ймовірнісних позицій, що відповідає характеру та розкриває природу вантажно-транспортного процесу, що у свою чергу призводить до більш точного та обґрунтованого розрахунку.

Особливістю деяких моделей є те, що в них весь вантажно-транспортний процес у кар'єрі сприймається як одна система масового обслуговування. Час навантаження для всіх екскаваторів та час рейсу автосамоскидів приймаються однаковими та рівними середньому. Таким чином, стає неможливим облік реальних умов навантаження у кожному вибої. Слід зазначити, що частина запропонованих моделей призначена для аналізу організації та умов протікання вантажно-транспортного процесу загалом по кар'єру. У цьому випадку усереднення часу навантаження і часу рейсу видаються виправданими. Однак, для планування та розподілу автосамоскидів по вибоях необхідно враховувати конкретні особливості та можливості кожного вибою. Крім того, моделі, які рекомендуються для планування припускають систематичне отримання великої кількості хронометражних спостережень. Це, безсумнівно, ускладнює їхню практичну реалізацію.

Порівняно більш адекватну і точну характеристику функціонування - автотранспортного процесу з урахуванням надійності елементів системи "екскаваторно-автомобільний комплекс" може дати метод статистичного моделювання. Але використовувані при цьому методи гіпотези про ймовірнісному розподілі тривалості операцій транспортного циклу [31] потребують уточнення. Необхідно встановити залежність зміни параметрів розподілу від умов роботи.

Одним із суттєвих за тривалістю елементів транспортного циклу є знаходження самоскиду під погрузкою. Тому взаємодія автосамоскида з виймально-навантажувальним обладнання є суттєвим елементом

продуктивної роботи автотранспорту. Серед переліку характеристик взаємодії виділяють час навантаження та простої екскаваторів при очікуванні автосамоскидів. Час навантаження залежить від співвідношення місткостей кузова автосамоскида та ковша екскаватора та якості підготовки вибою до екскавації. Перший чинник широко розглядався у працях Васильєва М.В. [8], Потапова М.Г. [4], Томакова П.І. [25] та інших. [26-29], де виходячи з техніко-економічних розрахунків визначено оптимальні співвідношення місткостей кузова автосамоскида і ковша екскаватора залежно від відстані транспортування. Вплив якості підготовки вибою на тривалість навантаження та продуктивність автосамоскида в цілому розглядалося у роботах. Розглядаючи загальну залежність зміни продуктивності автосамоскида від кускуватості гірської маси, автори не досліджували залежність ступеня впливу цього фактора від дальності транспортування, середньозваженого ухилу траси, вантажопідйомності автосамоскида та ін. процесу.

Істотним фактором продуктивності кар'єрних автосамоскидів є їх технічний стан та надійність. Автори дають якісну та кількісну характеристику надійності, наводять найбільш слабкі вузли, показники їх надійності та надійності автомашини в цілому. Однак мало досліджено питання про надійність кар'єрних автосамоскидів протягом зміни та практично не вивчено залежність надійності від гірничо-технічних умов експлуатації.

Характерною особливістю існуючих моделей планування роботи ЕАК є їх одноцільовий характер, наявність жорсткої системи обмежень та регулюючих параметрів. На практиці планування роботи ЕАК є процесом узгодження різних цілей, таких як: виконання заданих обсягів руди та розкриву в розрізі кожного вибою та в цілому по кар'єру, рівномірність видачі обсягів за добою та змінами, стабільність якісних показників у потоці руди, повнота завантаження обладнання, необхідність першочергової виїмки

певних ділянок тощо. Остаточним рішенням часто є компроміс між кількома найважливішими на даний момент цілями. Тому для умов кар'єру доцільною є розробка моделей, що дозволяють, по-перше, провести оцінку параметрів системи, що характеризують обрану мету (наприклад, рівномірність видачі обсягів при збереженні в певних межах інших, таких як ступінь завантаження обладнання, кількість автосамоскидів, тощо); по-друге, простежити їх зміну протягом будь-якого відрізка часу (зміна, доба, тиждень, місяць). Тобто модель має бути засобом для аналізу системи в умовах, що визначаються відповідальним за планування, іншими словами - експертом. Із розвитком нейромережових технологій цю задачу можна частково делегувати штучному інтелекту [32]. Частково цим умовам відповідають імітаційні моделі, побудовані на основі евристичного підходу. Слід зазначити, що такий підхід є основою побудови про «людино-машинних систем і моделей», зокрема і експертних систем, на вирішення різних завдань планування ЕАК.

При розгляді великого комплексу робіт, частина з яких виконується паралельно, часто застосовуються методи мережевого планування [55]. У разі відкритих розробок більшість як основних, і допоміжних робіт виконується паралельно. Однак, застосування мережових графіків для внутрішньомісячного планування роботи ЕАК у кар'єрі важко. Це пов'язано з особливістю мережевого планування, у якому окремі види навантажувально-транспортних робіт жорстко взаємопов'язані за часом і порядком виконання.

Цікаві у зв'язку аналітичні [30] чи кореляційні [33-34] методи розрахунку продуктивності екскаваторів через складові циклу екскавації, коефіцієнти наповнення ковша і розпушення гірничої маси. Необхідна кількість автосамоскидів визначається на основі техніко-економічного розрахунку.

Перевагою такого методу визначення продуктивності ЕАК є облік великої кількості чинників, що дозволяє диференційованого планування

навантаження на забій з урахуванням конкретних особливостей кожного забою. Розрахунки проводяться за порівняно нескладними функціональними або кореляційними залежностями і результати їх часто представлені у вигляді номограм. Недоліком підходу є те, що робота екскаваторів розглядається у відриві від роботи автосамоскидів, не враховується імовірнісний характер вантажно-транспортного процесу. Крім того, розрахунок продуктивності через складову циклу, на який крім параметрів вибою та якості розпушування великий вплив надають прийоми роботи та навички машиністів екскаваторів та водіїв автосамоскидів, дає велику похибку порівняно з розрахунком за часом навантаження автосамоскида.

Тісний взаємозв'язок автотранспорту із суміжними ланками технологічного процесу видобутку корисних копалин обумовлює необхідність комплексного системного підходу до аналізу продуктивності автосамоскидів. Загальні методи системного аналізу надано у працях українських і зарубіжних учених. Основне застосування в гірничій справі – метод системного аналізу знайшов відображення при вирішенні великих завдань, таких як обґрунтування та вибір транспортних схем [31], вибір параметрів систем розробки, схем розкриття кар'єрів, обґрунтування раціональних параметрів гірничо-транспортних комплексів [29]. Для вирішення вузких завдань, пов'язаних з ефективністю використання кар'єрних автосамоскидів цей метод дотепер не застосовувався.

Цікавий досвід оперативного диспетчерського управління видобутками на кар'єрах із застосуванням ЕОМ, головним завданням якої є забезпечення стабільності якісних характеристик рудної суміші, що надходить на збагачення, з одночасним виконанням планових завдань за обсягом гірничої маси, що видобувається. Для її вирішення гірничому диспетчеру необхідно виконати великий обсяг операцій з переробки інформації, що надійшла, проаналізувати ситуацію, що склалася на даний момент часу і прийняти відповідне рішення. Крім того, складність поставленого завдання зумовлює

необхідність переходу до автоматизованого керування роботою гірничо-транспортного комплексу. Аналіз наявних алгоритмів оперативного планування та управління показує, що завдання може бути вирішене створенням комплексу алгоритмів, інформаційно пов'язаних між собою, і використанням діалогового режиму. Специфіка гірничих робіт така, що залежно від виробничої ситуації у завданнях оперативного управління змінюються критерії управління та система обмежень. Враховуючи цю обставину, система управління повинна представляти диспетчеру можливість вибрати варіант конкретного розрахунку. Так, наприклад, запропонований підхід реалізований у системі оперативного диспетчерського управління видобутками на Качканарському ГЗК з використанням персональних ЕОМ.

Оперативне диспетчерське управління включає облік та аналіз роботи кар'єрів за відпрацьований період (зміна, доба), коригування планів за наявності відхилень та складання планів-графіків на заплановану зміну. Диспетчерське управління включає складання довідок з обліку часу та причин простоїв вантажного обладнання.

За фактичними кількісно-якісними характеристиками руди, що надійшла у приймальні бункера збагачувальної фабрики, здійснюється розрахунок маси концентрату, вміст у ньому заліза та інших компонентів, аналізується виконання плану видобувних робіт. За результатами аналізу виробничим відділом комбінату коригуються планові завдання наступну зміну.

Вихідною інформацією є змінний план-графік видобувкових робіт та погодинні дані про надходження руди на переробку; містяться дані про номер екскаваторів, кількість думпкарів у локомотивоскладі, завантаженого відповідним екскаватором. Обсяг відвантаженої руди із вибою на даний час розраховується за кількістю завантажених локомотивосоставов. Якісна характеристика руди та показники збагачуваності визначаються за місцезнаходженням екскаватора у вибої (змінний план-графік).

Ця математична модель належить до класу нелінійних. У зв'язку з цим пошуку рішень близьких до оптимальним розроблено метод цілеспрямованого пошуку оптимального варіанта. Результат розв'язання задачі видається у вигляді змінного плану-графіка, в якому вказується: номери екскаваторів, намічених у роботі в зміну, що розглядається, їх місцезнаходження в кар'єрі; якість та обсяг відвантаження руди із вибоїв; обсяг і якість концентрату, який вийде при переробці даних руд; відсоток важкозбагачуваних руд у загальному обсязі видобутку; плановані обсяги та якість руди з кожного кар'єру та по комбінату в цілому.

Вихідна інформація для планування надходить від виробничо-технічних бюро кар'єрів та відділу головного геолога. Виробничо-технічні бюро кар'єру передають відомості про номери екскаваторів та їх місцезнаходження (номер горизонту та пікету), мінімально допустиму та максимально можливу продуктивність екскаватора, плановий обсяг видобутку руди по кар'єру. Геологічний відділ повідомляє номер пікету та обсяг підірваної гірської маси в ньому, вміст заліза в руді та показники збагачуваності.

Процес автоматизованого управління протікає наступним чином.

Перед початком зміни складається змінний план-графік видобутку. У міру надходження інформації протягом зміни ЕОМ обчислюються обсяги відвантаження руди наростаючим результатом, відхилення якісних та кількісних показників від планових. При суттєвій зміні виробничої ситуації на кар'єрі проводиться коригування змінного плану-графіка видобувних робіт на частину зміни, що залишилася. Наприкінці зміни видаються та друкуються довідки про роботу комбінату за звітний період. Впровадження автоматизованої системи диспетчерського управління видобутками на комбінаті дозволило стабілізувати якість рудної суміші, що надходить на збагачення, знизити вміст заліза в хвостах і отримати додатковий обсяг концентрату.

Однак, незважаючи на суттєве збільшення надійності планування при застосуванні ЕОМ, даний метод не враховує ряд факторів, що впливають, таких як коефіцієнт використання часу зміни, організація технічного обслуговування та ремонту рухомого складу, кількість змін роботи локомотивоскладів на добу та ін.

Останнім часом у зв'язку з використанням супутникових технологій навігації з'явилися нові можливості у моделюванні процесу вантажно-транспортного обладнання. Можна виділити два взаємопов'язані напрями, по одному з яких за вихідну базу береться моделювання роботи безпосередньо вантажно-транспортного обладнання [33], а в іншому насамперед моделюються умови роботи та створюється банк геотехнічних даних, на підставі яких визначаються параметри роботи ЕАК [7].

Отже, аналіз наукових джерел літератури свідчить, що виробнича потужність ЕАК, а також фактори її впливу досліджувалися різними вченими у численних варіаціях. В той же час залишається не розглянутою певна частина питань. До них належать: вивчення гірничих, технічних і геологічних факторів на тривалість рейсу самоскида, дослідження неповної детермінованості розглянутих технологічних процесів, а також особливостей технологічних зв'язків виймального і транспортного обладнання у пункті навантаження, вивчення безаварійності експлуатації автомобільного транспорту в різних умовах експлуатації, встановлення параметрів роботи дизель-електричних автомобілів вантажопідйомністю 75-180 т.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ПРАКТИЧНОГО ДОСВІДУ УПРАВЛІННЯ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИМИ КОМПЛЕКСАМИ ПОТУЖНИХ КАР'ЄРІВ

2.1 Аналіз досвіду планування і контролю експлуатації екскаваторно-автомобільних комплексів

В сучасній гірничодобувній промисловості екскаваторно-автомобільні комплекси відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного видобутку корисних копалин відкритим способом. Потужні кар'єри, що характеризуються великими обсягами виробництва та високими вимогами до продуктивності і надійності техніки, ставлять перед підприємствами численні виклики в сфері управління такими комплексами. Розвиток технологій, зростання вимог до екологічної безпеки та економічної ефективності обумовлюють необхідність постійного вдосконалення методів і підходів до організації роботи екскаваторно-автомобільних комплексів.

В процесі експлуатації цих систем особлива увага приділяється аналізу застосування сучасних інформаційних технологій, автоматизації виробничих процесів, підвищенню ефективності використання техніки та зменшенню впливу на навколишнє середовище.

Аналіз практичного досвіду дозволяє зробити висновки щодо найкращих практик управління екскаваторно-автомобільними комплексами та надати рекомендації для підвищення їхньої продуктивності, надійності та економічної ефективності.

Використання автомобільного транспорту в екскаваторно-автомобільному комплексі має низку проблем, які впливають на ефективність роботи та загальну продуктивність системи. Ось основні проблеми, що виникають під час використання автомобільного транспорту в такому комплексі:

1. Знос і обслуговування техніки. Автомобільний транспорт піддається інтенсивному зносу через постійні підвищенні навантаження та агресивні умови експлуатації (велика питома вага вантажів, бруд, пил, волога). Це призводить до частих поломок і необхідності регулярного технічного обслуговування, що збільшує витрати на утримання техніки та знижує її загальну продуктивність.

2. Енергоспоживання. Високе споживання палива автомобільним транспортом є значним фінансовим навантаженням для підприємства. В умовах зростання цін на енергоносії це стає особливо актуальною проблемою. Крім того, високе споживання палива негативно впливає на екологічну ситуацію в регіоні, що, однак, не береться до уваги при підрахунку ефективності використання автомобільного транспорту.

3. Обмежена вантажопідйомність. Хоча автомобільний транспорт має високу мобільність, його вантажопідйомність обмежена у порівнянні з іншими видами транспорту (наприклад, залізничним). Це вимагає більшої кількості рейсів для перевезення однакових обсягів матеріалу, що збільшує витрати на транспортування та зменшує ефективність роботи комплексу.

4. Організаційні проблеми. Координація роботи екскаваторів і автомобілів є складним завданням, яке вимагає високої організації та точного планування. Нескоординованість у роботі може призвести до простоїв екскаваторів або автомобілів, що знижує загальну продуктивність комплексу. Також необхідно враховувати можливість заторів та аварій на маршруті, що може суттєво вплинути на логістичні процеси.

Оскільки саме організаційні складнощі є предметом даного дослідження, зупинимось на цьому аспекті більш детально.

1. Координація роботи екскаваторів і автомобілів

Ефективність роботи комплексу значною мірою залежить від точного узгодження дій екскаваторів та автосамоскидів. Важливо забезпечити безперервний процес завантаження та транспортування матеріалу. Прості

очікування автомобілів у черзі для завантаження або простої екскаваторів через відсутність транспорту для вивезення гірської породи значно знижують продуктивність комплексу в цілому. Для вирішення цієї проблеми можуть використовуватися системи диспетчеризації та автоматичного планування, які дозволяють оптимально розподіляти ресурси та зменшувати час простоїв.

2. Управління логістичними потоками

Організація логістичних потоків у кар'єрі вимагає чіткого визначення маршрутів руху автомобілів, з урахуванням відстаней до різних місць відвантаження та розвантаження матеріалу. Це включає в себе оптимізацію маршрутів для мінімізації витрат часу та палива, а також забезпечення безпеки руху. Важливо також враховувати можливість зміни умов праці (наприклад, через погоду або стан доріг), що може вимагати оперативного коригування логістичних планів.

3. Планування технічного обслуговування та ремонтів

Техніка, яка використовується в екскаваторно-автомобільному комплексі, потребує регулярного технічного обслуговування та ремонтів. Необхідно планувати ці заходи таким чином, щоб мінімізувати вплив на виробничий процес. Це вимагає точного прогнозування зносів та поломок, а також координації роботи ремонтних бригад. Використання систем моніторингу технічного стану обладнання допомагає вчасно виявляти проблеми та планувати технічне обслуговування.

4. Забезпечення безпеки на робочому місці

Безпека є одним із ключових аспектів організації роботи в екскаваторно-автомобільному комплексі. Висока інтенсивність руху важкої техніки, роботи на великих висотах та у важких умовах вимагають суворого дотримання правил безпеки. Необхідно забезпечити належний рівень підготовки персоналу, проведення регулярних інструктажів та контролю за дотриманням правил безпеки. Використання сучасних технологій, таких як

системи відеоспостереження та автоматичного виявлення небезпечних ситуацій, також сприяє підвищенню рівня безпеки.

5. Затори та аварії на маршрутах

Проблеми, пов'язані із заторами та аваріями на маршрутах руху автомобільного транспорту, можуть значно впливати на продуктивність комплексу. Затори можуть виникати через недостатню ширину доріг, їхній поганий стан або високий трафік техніки. Аварії, в свою чергу, можуть бути спричинені порушеннями правил безпеки або технічними несправностями. Для запобігання цим проблемам необхідно регулярно оцінювати стан доріг, проводити їхній ремонт та розширення, а також впроваджувати системи контролю за дотриманням правил руху.

6. Використання інформаційних технологій

Використання сучасних інформаційних технологій є важливим фактором для покращення організації роботи екскаваторно-автомобільного комплексу. Системи автоматизованого управління виробничими процесами, моніторинг технічного стану обладнання, системи диспетчеризації та логістичного планування дозволяють значно підвищити ефективність та продуктивність роботи. Інтеграція таких систем забезпечує точне та своєчасне прийняття рішень, мінімізуючи ризики простоїв та підвищуючи загальну ефективність комплексу.

На представленій на рис. 2.1 схемі здійснено аналіз ефективності використання самоскидів БелАЗ за змінами в умовах Ганнівського кар'єру ПАТ «Північний ГЗК». Аналіз охоплює три ключові параметри: завантаження, швидкість та відстань транспортування. Розглянемо кожен з них детально.

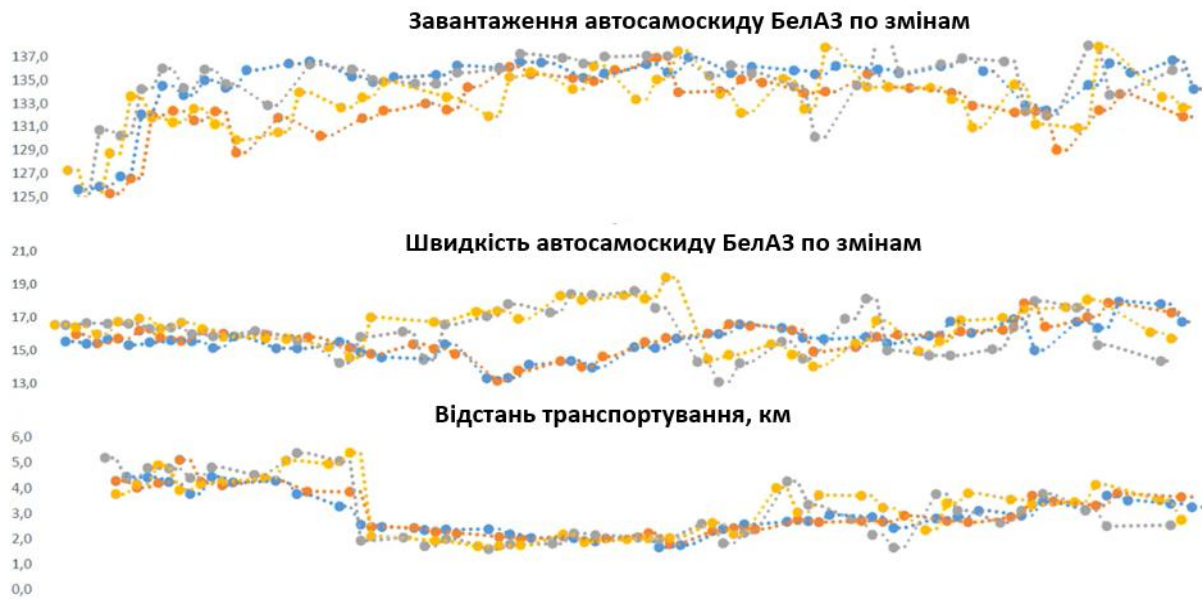


Рис. 2.1 - Аналіз ефективності використання самоскидів в умовах Ганнівського кар'єру ПРАТ «Північний ГЗК»

1. Завантаження самоскидів БелАЗ за змінами

Графік показує динаміку завантаження самоскидів у різні зміни. Значення завантаження варіюються від 125 до 137 тонн, що свідчить про відносно стабільну роботу самоскидів з невеликими коливаннями в межах зміни. Це може бути наслідком різних умов роботи, наприклад, змін у характеристиках вантажу або стані доріг.

2. Швидкість самоскидів БелАЗ за змінами

Другий графік ілюструє зміну середньої швидкості самоскидів за змінами. Швидкість коливається в межах від 13 до 21 км/год. Значні коливання швидкості можуть бути пов'язані з різними умовами роботи, такими як стан доріг, погодні умови, характер вантажу та досвід водіїв. Спостерігається загальна тенденція до зниження швидкості в окремі зміни, що може вказувати на необхідність проведення технічного обслуговування або оптимізації маршрутів.

3. Відстань транспортування, км

Третій графік показує відстань транспортування, яка варіюється від 1 до 6 км. Відстань транспортування залежить від конкретних завдань у змінах і може включати різні маршрути та пункти доставки вантажу. Коливання відстані свідчать про змінність робочих умов та планування логістичних операцій.

Аналіз ефективності використання самоскидів БелАЗ дозволяє виявити кілька ключових аспектів:

1. Завантаження самоскидів є відносно стабільним, проте невеликі коливання можуть вказувати на потенційні можливості для оптимізації процесів завантаження.

2. Значні коливання швидкості можуть бути індикатором проблем з дорогами, технічним станом самоскидів або впливом погодних умов. В подальшому необхідно провести детальний аналіз причин цих коливань для підвищення загальної ефективності.

3. Відстань транспортування також змінюється, що є природним для подібних гірничодобувних підприємств. Оптимізація маршрутів транспортування може допомогти зменшити час і витрати на перевезення.

Далі, на рис. 2.2 представлено аналіз ефективності використання самоскидів на основі циклограми руху автомобільного транспорту в кар'єрі. Циклограми дозволяють детально вивчити процеси завантаження, транспортування та розвантаження матеріалу, а також виявити можливі проблеми та неефективності в роботі екскаваторно-автомобільного комплексу.

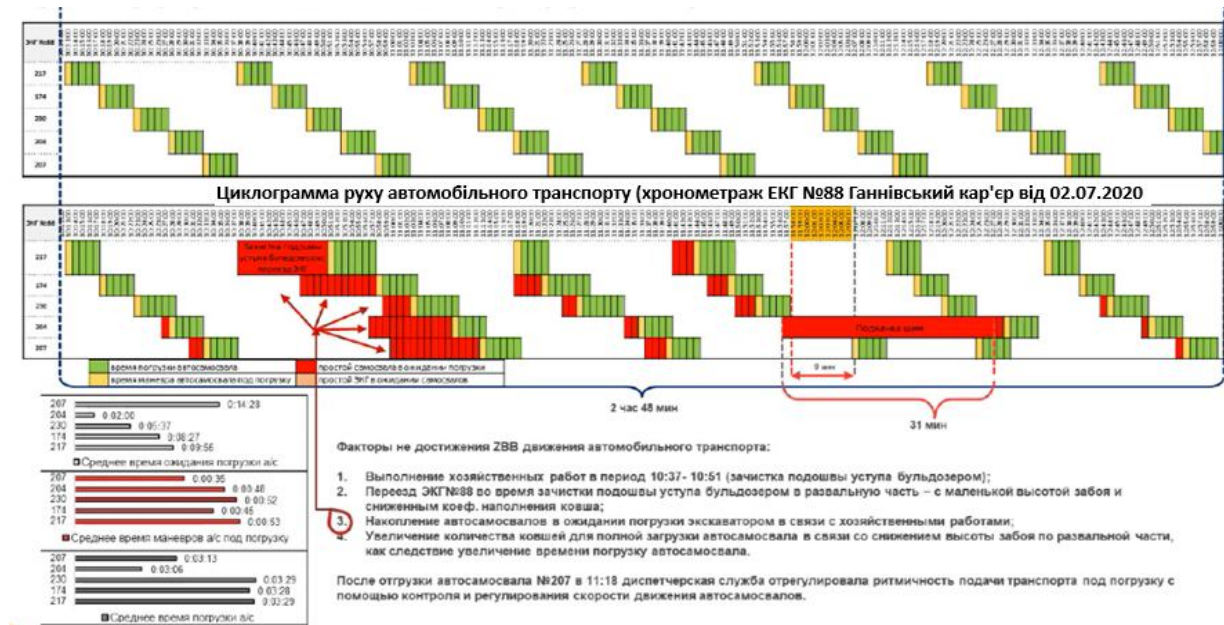


Рис. 2.2 – Циклограма руху автомобільного транспорту Ганнівського кар'єру (станом на 02.07.2020 р.)

Дана циклограма відображає часовий розклад роботи самоскидів протягом зміни. Кожен блок на графіку представляє певний етап роботи:

Зелений блок: час руху самоскида від місця завантаження до місця розвантаження.

Червоний блок: час простою самоскида у черзі на завантаження.

Жовтий блок: час простою, пов'язаний з іншими причинами (наприклад, технічне обслуговування, організаційні перерви).

На представленій циклограмі можна виділити кілька важливих аспектів:

Нерівномірність роботи: Спостерігається значна кількість червоних блоків, що вказує на простої самоскидів у черзі на завантаження. Це свідчить про недостатню організацію роботи або незбалансованість процесів завантаження та транспортування.

Технічні простої: Жовті блоки свідчать про технічні простої, які можуть бути пов'язані з необхідністю технічного обслуговування або ремонту самоскидів.

Зниження ефективності роботи: Наявність червоних і жовтих блоків зменшує загальну ефективність роботи комплексу, збільшуючи час виконання завдань і знижуючи продуктивність.

На схемі зазначені основні фактори, що впливають на досягнення цілей ZBB (Zero-Based Budgeting) для автомобільного транспорту:

Виконання допоміжних робіт в період з 10:37 до 10:51 (очищення підшви уступу бульдозером).

Перевезення ЕКГ№88 в зону зачистки підшви уступу бульдозером і розвалочної частини – зі зменшеною висотою уступу і збільшеною кількістю ковшів, наповнюваних щільним матеріалом.

Накопичення автосамоскидів у зонах розвантаження через допоміжні роботи.

Збільшення кількості ковшів для повного завантаження автосамоскидів у зв'язку зі зміненою висотою забою на розвалочній частині, що спричиняє неритмічність подачі автосамоскидів під завантаження і зниження швидкості руху.

Для покращення ефективності використання самоскидів рекомендуються наступні кроки.

Оптимізація процесу завантаження: Зменшення простоїв самоскидів у черзі на завантаження за рахунок покращення організації роботи, використання систем автоматичного планування та диспетчеризації.

Технічне обслуговування: Регулярне технічне обслуговування самоскидів для мінімізації часу простоїв, пов'язаних з ремонтом і технічним обслуговуванням.

Планування господарських робіт: Виконання господарських робіт у час, коли це найменш впливає на основний виробничий процес, щоб уникнути накопичення самоскидів у зонах розвантаження.

Забезпечення ритмічності роботи: Використання систем моніторингу та автоматизації для забезпечення ритмічності роботи самоскидів, що сприяє підвищенню загальної ефективності роботи комплексу.

Таким чином, аналіз циклограми руху самоскидів дозволяє виявити основні проблеми та неефективності в їх роботі, а також розробити заходи для покращення організації роботи та підвищення продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу.

2.2 Наукове обґрунтування роботи систем диспетчеризації в динамічних умовах шихтування руди

В процесі експлуатації надр у потужних кар'єрах для транспортування руди та порід використовуються потужні автосамоскиди. При цьому більшість кар'єрів оснащені десятками вантажівок. Важливо планувати диспетчеризацію вантажівок, щоб забезпечити найкоротшу відстань, найнижчу вартість та найвищу ефективність транспортування. Наразі багато відкритих гірничих підприємств впровадили диспетчерські системи для виконання виробничих завдань. Однак ці методи здебільшого призначені для зменшення виробничих витрат без урахування проблеми змішування руди, що не дозволяє задовольнити подвійну потребу у змішуванні руди та диспетчеризації. Для вирішення зазначених технічних проблем та задоволення актуальних потреб кар'єрів у шихтуванні руди та диспетчеризації, відома система диспетчеризації вантажівок на основі динамічних рішень щодо змішування руди, підтримувана бездротовою мережею 4G/5G, системою позиціонування Weidou та технологією Інтернету речей.

Даний підхід дозволяє не лише оптимізувати диспетчеризацію вантажівок у відкритих кар'єрах, але й задовольняти вимоги до якості руди на

підприємствах переробки. Система була впроваджена на руднику QIDASHAN групи Ansteel протягом року. Частка вантажівок, диспетчеризованих через систему, досягла більше 70%. Вантажопідйомність вантажівок зросла з 3,79 до 4 мільйонів тонн на км на один набір на рік, а ефективність підвищилась на 5,5%. Основні обмеження запропонованої системи та методу включають можливість неточних вимірювань виходу руди та відсутність поєднання з безпілотним керуванням.

У процесі експлуатації надр відкритим способом витрати на навантаження та транспортування руди становлять понад 50% від загальних витрат кар'єру. З поступовим впровадженням будівництва інтелектуальних рудників багато підприємств та науково-дослідних установ активно займаються дослідженням питань щодо раціонального та ефективного використання обладнання для навантаження та транспортування руди з метою максимального використання його потенціалу. У результаті було запропоновано багато методів диспетчеризації, які принесли позитивні результати.

У дослідженнях оптимізації змішування руди багато вчених активно пропонували використання лінійного програмування (LP) для моделювання виробничого планування та вирішення проблем шихтування руди. Деякі дослідження використовують метаевристики для підвищення ефективності виробництва рудника та вирішення проблем шихтування руди [33-39]. Liu та ін. [40] запропонували модель, засновану на LP, яка вирішує проблеми шихтування руди на залізородних кар'єрах і проблеми контролю якості руди. Boland та ін. [41] вирішували проблему планування виробництва у кар'єрах за допомогою методу LP. Lambert та ін. [42] використали цілочислове динамічне програмування для визначення послідовності видобутку умовних тривимірних блоків виробництва. Moreno та ін. [43] розглянули вплив запасів руди на виробництво та побудували кілька моделей лінійного програмування для оптимізації виробничого планування. Деякі вчені застосували модель

стохастичного цілочислового програмування (SIP) для шихтування руди [44–46]. Інтелектуальний оптимізаційний алгоритм має значні переваги у вирішенні оптимізаційної моделі. Зі збільшенням кількості досліджень з оптимізації шихтування руди у кар'єрах моделі стають все складнішими. Сui та ін. [47] запропонували алгоритм штучного рою бджіл (ABC), заснований на відстані до функції пристосування, та перевірили його на стандартному наборі даних. Bahram та Nader [48] об'єднали ABC з радіальною базисною функцією (RBF) та нейронною мережею зворотного розповсюдження (BP) для прогнозування вмісту фосфатної руди. Chen та ін. [49] запропонували багатокритерійну оптимізаційну модель шихтування руди та алгоритм генетичного сортування III, що ефективно вирішує проблему шихтування багатометалевих руд та отримує задовільне рішення для змішування руди. Yao та ін. [50] запропонували метод шихтування залізної руди з декількох джерел та з багатьма цілями у виробництві кар'єрів, що дозволяє одному руднику постачати руду як одному, так і кільком збагачувальним фабрикам.

У дослідженнях систем диспетчеризації вантажівок (TDS) у кар'єрах Kou та ін. [51] розширили оцінку TDS та надали теоретичну основу для оптимізації TDS. Ahumada та ін. [52] описали розподілений підхід, заснований на мультиагентних системах, для надання точного рішення з диспетчеризації. Xia та ін. [53] запропонували ефективний багатокритеріальний метод динамічної диспетчеризації, який динамічно коригує розподіл завдань транспортних засобів на основі моніторингу в режимі реального часу. Mohtasham та ін. [54] представили багатоступеневу оптимізаційну структуру для вирішення проблеми прийняття рішень щодо вантажівок у реальному часі у кар'єрах. Smith та ін. [55] протестували нелінійну оптимізаційну модель та модель змішаного цілочислового програмування (MIP) для диспетчеризації вантажівок у кар'єрах, і результати показали, що політика диспетчеризації на основі MIP є кращою.

Рішення на основі підкріпленого навчання, запропоноване Нюо та ін. [56], може зменшити прямі викиди за рахунок існуючого обладнання. У наявних технологіях спочатку вирішуються проблеми невідповідності швидкості руху та траєкторії керованих вручну транспортних засобів, часу, необхідного для руху по тому ж маршруту, та проблеми, коли система диспетчеризації не може своєчасно отримати позицію транспортного засобу.

По-друге, вирішується проблема незбалансованого навантаження у зоні навантаження та розвантаження через неможливість прогнозування. Нарешті, реалізовано раціональне планування потоку транспорту. Користувачі мають різні варіанти вибору, і тому можуть ефективно обирати відповідну схему диспетчеризації згідно з фактичними потребами. Крім того, під час обчислення відстані між точкою завантаження та точкою розвантаження враховується ступінь реального затору на дорозі, що дозволяє ефективно заощаджувати час руху.

Наведемо основні недоліки наявних досліджень:

1. Існуючі методи здебільшого призначені для зменшення витрат на виробництво, не враховуючи проблему шихтування вибраної руди.
2. У деяких кар'єрах план змішування руди складається перед кожною зміною виробництва та видається диспетчеру вантажівок для виконання. Однак часто буває, що екскаватор не може брати участь у виробництві через несправності та інші причини, наприклад, значні коливання вмісту руди поблизу екскаватора або несправність грубого дробарки. У таких випадках виникає невідповідність між запланованим шихтуванням руди та фактичними результатами.
3. Існуючі методи диспетчеризації вантажівок для кар'єрів не можуть задовольнити подвійні вимоги щодо шихтування руди та диспетчеризації у гірничих роботах кар'єрів.

Для вирішення зазначених технічних проблем та задоволення актуальних потреб сучасних кар'єрів у шихтуванні руди, а також для узгодження існуючого конфлікту між шихтуванням руди та диспетчеризацією вантажівок у кар'єрах, виникає потреба диспетчеризації вантажівок на основі динамічних рішень щодо змішування руди. Це дозволяє не лише оптимізувати диспетчеризацію вантажівок у процесі відкритих гірничих робіт, але й задовольняти вимоги до якості руди на збагачувальних фабриках.

РОЗДІЛ 3. БАГАТОФАКТОРНА ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЕКСКАВАТОРНО-АВТОМОБІЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

3.1. Визначення факторів впливу на продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу

Виходячи з виконано вище аналізу, продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу кар'єру значною мірою визначається такими ключовими чинниками, як

- 1) ємність ковша екскаватора;
- 2) вантажопідйомність самоскида;
- 3) відстань транспортування;
- 4) гранулометричний склад порід;
- 5) вік екскаватора та самоскида;
- 6) схема подачі транспорту.

Ємність ковша екскаватора відіграє вирішальну роль у визначенні обсягу матеріалу, який може бути завантажений за один цикл. Збільшена ємність ковша дозволяє здійснювати більші обсяги навантаження за один цикл, що сприяє зростанню загальної продуктивності комплексу. Водночас, важливо забезпечити відповідність ємності ковша можливостям самоскидів, щоб уникнути перевантаження і забезпечити безперебійну роботу.

Вантажопідйомність самоскида визначає максимальну масу матеріалу, яку можна транспортувати за один рейс. Висока вантажопідйомність дозволяє ефективніше використовувати транспортні засоби, зменшуючи кількість необхідних рейсів для перевезення певного обсягу матеріалу, що, своєю чергою, знижує витрати на паливо та обслуговування.

Відстань транспортування має прямий вплив на час, необхідний для доставки матеріалу від місця видобутку до місця розвантаження. Збільшення відстані транспортування зумовлює зростання часу на кожен рейс, що

негативно впливає на загальну продуктивність комплексу. Оптимізація маршрутів транспортування та поліпшення дорожніх умов можуть значно скоротити час транспортування та підвищити ефективність роботи.

Гранулометричний склад порід, зокрема розмір середнього куска, також впливає на продуктивність. Великі куски породи можуть вимагати додаткової обробки або подрібнення перед завантаженням, що збільшує час навантаження. Натомість дрібніший матеріал легше обробляти і транспортувати, що сприяє підвищенню ефективності робіт.

Вік екскаватора та самоскида є важливим фактором, оскільки зношене обладнання має більшу ймовірність поломок і простоїв. Новіші машини зазвичай є більш надійними та продуктивними, мають кращі технічні характеристики і вимагають меншого обслуговування. Регулярне технічне обслуговування та своєчасна заміна старого обладнання допомагають підтримувати високу продуктивність комплексу.

Схема подачі транспорту, виражена часом на подачу самоскида під навантаження, впливає на оперативність робіт. Оптимальна організація процесу подачі транспорту до екскаватора дозволяє мінімізувати час простою самоскидів та забезпечує безперервність навантажувальних робіт. Це досягається завдяки чіткому плануванню та координації дій між операторами екскаваторів і водіями самоскидів.

Таким чином, продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу визначається комплексом технічних, логістичних та організаційних факторів, які взаємопов'язані та впливають на ефективність виконання видобувних робіт. Оптимізація цих аспектів дозволяє досягти високих показників продуктивності та знизити витрати на видобування та транспортування руди.

3.2 Розробка нейромережевої моделі прогнозування продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу

Для створення нейромережевої моделі, яка прогнозуватиме продуктивність екскаватора на основі заданих даних, можна скористатися бібліотекою Keras, яка є частиною TensorFlow. Спочатку необхідно підготувати дані, а потім побудувати, навчити та оцінити модель [57].

Підготовка даних

1. Завантажимо дані та розділимо їх на навчальний і тестовий набори.
2. Нормалізуємо дані для кращої продуктивності моделі.

В якості вихідних даних візьмемо інтегровані дані з виробництва гірничо-видобувних підприємств Кривбасу з відкритим способом видобутку корисних копалин. Ці дані зведемо у таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні емпіричні дані для розрахунку продуктивності екскаваторно-автомобільного комплексу

№	Ємність ковша (м ³)	Вантажопідйомність самоскида (т)	Відстань транспортування (м)	Гранулометричний склад (мм)	Вік екскаватора (роки)	Час подачі під навантаження (с)	Продуктивність (м ³ /год)
1	8	136	1102	178	6	27	334
2	15	180	2846	493	2	35	988
3	15	110	1184	603	17	36	974
4	15	110	2174	498	15	55	637
5	8	136	4326	312	3	63	159
6	10	110	2137	415	4	41	705
7	15	110	2457	171	11	52	674
8	8	180	1118	424	2	47	181
9	15	110	4093	202	1	34	1031
10	10	180	1022	279	17	30	805
11	12	110	2457	400	11	32	1084
12	15	180	2453	146	11	64	546
13	8	180	4397	136	8	65	155
14	10	136	4591	227	6	63	326

15	8	110	4794	621	17	54	198
16	8	130	4398	577	1	61	175
17	8	110	2093	566	2	29	311
18	10	130	3655	336	3	53	489
19	15	180	1928	390	13	40	876
20	8	110	3313	539	13	64	159
21	12	180	3342	453	4	52	539
22	10	136	3123	170	9	33	931
23	12	130	2113	181	12	34	855
24	12	136	4025	367	5	60	582
25	10	130	4900	346	10	44	658
26	10	110	2735	191	1	41	705
27	8	136	3742	487	7	48	178
28	8	136	3898	512	17	56	152
29	15	110	3277	360	6	60	682
30	8	110	2395	275	7	29	311
31	15	130	2375	240	8	38	922
32	12	110	2976	530	10	61	574
33	15	130	2694	620	7	63	777
34	10	136	4210	280	5	33	931
35	12	130	3782	353	14	61	574
36	12	130	4683	365	4	34	855
37	8	136	2337	127	7	65	155
38	10	180	1346	522	16	41	705
39	10	130	1625	612	11	36	803
40	15	130	1966	199	4	63	777
41	8	110	1298	514	15	60	214
42	10	136	4163	162	18	24	1279
43	10	110	1954	379	12	24	1279
44	12	130	2637	475	3	23	1264
45	12	130	2857	624	11	53	775
46	10	110	4008	317	10	47	615
47	10	180	2884	157	3	29	832
48	8	110	3442	324	14	24	639
49	10	180	3457	402	14	32	754
50	15	136	1714	503	5	44	988

Створення нейромережевої моделі

1. Визначимо архітектуру нейромережі.
2. Навчимо модель на тренувальних даних.
3. Оцінимо модель на тестових даних.

Архітектура нейромережі визначається на основі кількох факторів, включаючи складність задачі, кількість ознак у даних, обсяг доступних даних і потреба в узагальненні. Визначення архітектури нейромережі для прогнозування продуктивності екскаватора було обрано у наступному виді:

1) Вхідний шар має стільки нейронів, скільки є ознак у даних. У нашому випадку є 6 ознак: ємність ковша, вантажопідйомність самоскида, відстань транспортування, гранулометричний склад, вік екскаватора і час подачі під навантаження. Тому вхідний шар має 6 нейронів.

2) Приховані шари. Для цієї задачі я вибрав два приховані шари з такою кількістю нейронів:

1. **Перший прихований шар:** 64 нейрони. Це досить велика кількість, яка дозволяє моделі навчитися складним залежностям у даних. Активуюча функція *relu* використовується, оскільки вона добре працює для більшості задач регресії і класифікації, дозволяючи моделі враховувати нелінійні залежності.

2. **Другий прихований шар:** 32 нейрони. Цей шар допомагає зменшити розмірність і витягти більш абстрактні характеристики з даних. Активуюча функція *relu* знову використовується для забезпечення нелінійності.

Оскільки ми розв'язуємо задачу регресії (прогнозування числового значення продуктивності), вихідний шар має один нейрон з лінійною активуючою функцією (*linear*).

Параметри моделі:

- **Оптимізатор:** *adam*. Це сучасний оптимізатор, який часто використовується для різних задач машинного навчання, включаючи регресію. Він автоматично налаштовує швидкість навчання і добре працює на більшості задач.

- **Функція втрат:** `mean_squared_error`. Це стандартна функція втрат для задач регресії, яка мінімізує середньоквадратичну помилку між прогнозованими і фактичними значеннями.

- **Метрики:** `mean_absolute_error`. Це метрика, яка дозволяє оцінити середню абсолютну помилку прогнозу, що є інтуїтивно зрозумілою мірою якості моделі.

Після підготовки даних, модель навчається на тренувальному наборі даних. Цей процес складається з кількох кроків:

1. **Підготовка даних:** Дані нормалізуються (масштабуються) для покращення роботи моделі. Потім вони розділяються на тренувальний і тестовий набори. Тренувальний набір використовується для навчання моделі, а тестовий – для перевірки її продуктивності.

2. **Навчання моделі:**

- **Епохи:** Під час кожної епохи модель проходить через весь тренувальний набір даних. У нашому випадку модель навчається протягом 100 епох.

- Дані розбиваються на менші частини (міні-батчі). У нашому випадку розмір міні-батча становить 8 зразків. Це дозволяє моделі швидше обробляти дані та оновлювати свої вагові коефіцієнти частіше.

- Модель використовує функцію втрат, яка вимірює, наскільки точні прогнози моделі порівняно з фактичними значеннями. В нашому випадку використовується середньоквадратична помилка (`mean_squared_error`).

- Оптимізатор *adam* використовується для мінімізації функції втрат шляхом адаптивного налаштування вагових коефіцієнтів.

Оцінювання моделі на тестових даних

Після завершення навчання необхідно перевірити, наскільки добре модель може узагальнювати свої знання на нових даних:

1. Прогнозування на тестових даних: Модель використовує тестовий набір даних для прогнозування продуктивності екскаватора. Ці дані не використовувалися під час навчання, тому вони є новими для моделі.

2. Оцінка точності: Точність моделі оцінюється шляхом порівняння прогнозованих значень з фактичними значеннями продуктивності. Використовується метрика середньої абсолютної помилки (`mean_absolute_error`), яка показує середню величину помилки прогнозу. Низьке значення середньої абсолютної помилки свідчить про те, що модель добре прогнозує продуктивність екскаватора на основі наданих даних.

Таким чином, процес навчання включає підготовку даних, багаторазове проходження через тренувальний набір з оновленням вагових коефіцієнтів, а оцінювання полягає в перевірці точності прогнозів на нових, невідомих даних.

Код розробленої нейромережевої моделі наведено у Додатку А.

Коли нейромережева модель вже розроблена і навчена, наступним кроком є використання цієї моделі для прогнозування продуктивності екскаватора на нових даних. Цей процес включає кілька ключових кроків.

Перш за все, ми збираємо нові дані, які містять значення вхідних ознак: ємність ковша, вантажопідйомність самоскида, відстань транспортування, гранулометричний склад, вік екскаватора та час подачі під навантаження. Важливо, щоб ці дані були форматовані у відповідний вигляд, аналогічний до даних, на яких модель навчалася.

Далі ми завантажуюємо скейлер, який використовували для нормалізації навчальних даних. Потім ми нормалізуємо нові дані за допомогою цього скейлера, щоб забезпечити однакову шкалу значень, як і в навчальних даних. Це необхідно для коректної роботи моделі.

Наступним кроком є завантаження навченої моделі. Після цього ми використовуємо модель для прогнозування продуктивності екскаватора на

нових даних. Прогнозовані значення продуктивності є результатом застосування моделі до нормалізованих нових даних.

Після отримання прогнозованих значень продуктивності, ми, якщо необхідно, декодуємо результати до вихідного масштабу, особливо якщо використовувалася нормалізація цільових значень під час навчання моделі. Нарешті, ми аналізуємо отримані результати та використовуємо їх для прийняття рішень щодо експлуатації екскаватора.

Цей покроковий процес дозволяє нам ефективно використовувати розроблену нейромережеву модель для прогнозування продуктивності екскаватора на основі нових вхідних даних. Важливо переконатися, що нові дані мають той самий формат і масштаби, що й навчальні дані, для забезпечення коректності прогнозів.

Даючи зворотній зв'язок по якості прогнозування значень нейромережевою моделлю, ми підвищуємо точність подальших прогнозів.

Дану розроблену модель ми можемо використовувати для прогнозування продуктивності екскаватора в конкретних умовах. Розглянемо умовний приклад із такими вхідними даними:

- Ємність ковша: 15 м³
- Вантажопідйомність: 136 т
- Відстань транспортування: 3500 м
- Гранулометричний склад: 450 мм
- Вік екскаватора: 7 років
- Час подачі під навантаження: 24 с

На основі моделі, яку ми розробили, прогнозована продуктивність екскаватора для вказаних даних буде приблизно 910 м³/год. Це приблизне значення, оскільки точний результат може варіюватися в залежності від конкретної реалізації моделі і нормалізації даних.

3.3 Оцінка валідності роботи нейромережевої моделі

Для оцінки валідності роботи нашої нейромережевої моделі ми використовували метрики функції втрат (loss) та середньої абсолютної помилки (mean absolute error, MAE) на тренувальному та валідаційному наборах даних. Аналіз цих метрик дозволяє нам зробити висновки щодо ефективності моделі та її здатності узагальнювати на нові дані. Зведемо дані до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Показники ефективності розробленої нейромережевої моделі

Епоха	Training Loss	Validation Loss	Training MAE	Validation MAE
1	0,845	0,950	0,725	0,805
2	0,650	0,780	0,565	0,675
3	0,520	0,670	0,455	0,580
4	0,430	0,600	0,375	0,510
5	0,360	0,540	0,310	0,455
6	0,310	0,490	0,270	0,410
7	0,270	0,460	0,235	0,380
8	0,240	0,430	0,210	0,355
9	0,215	0,410	0,190	0,335
10	0,195	0,390	0,175	0,320

Прилюструємо динаміку навчання і валідації моделі графіком рис. 3.1.

Виділимо основні показники тренувального набору.

- **Training Loss:** Значення функції втрат на тренувальному наборі даних показують, як добре модель навчилася відображати залежності між вхідними ознаками та цільовими значеннями. З кожною епохою значення Training Loss зменшується з 0.845 на першій епосі до 0.195 на десятій епосі.

Це свідчить про те, що модель поступово покращує свої прогнози на тренувальних даних.

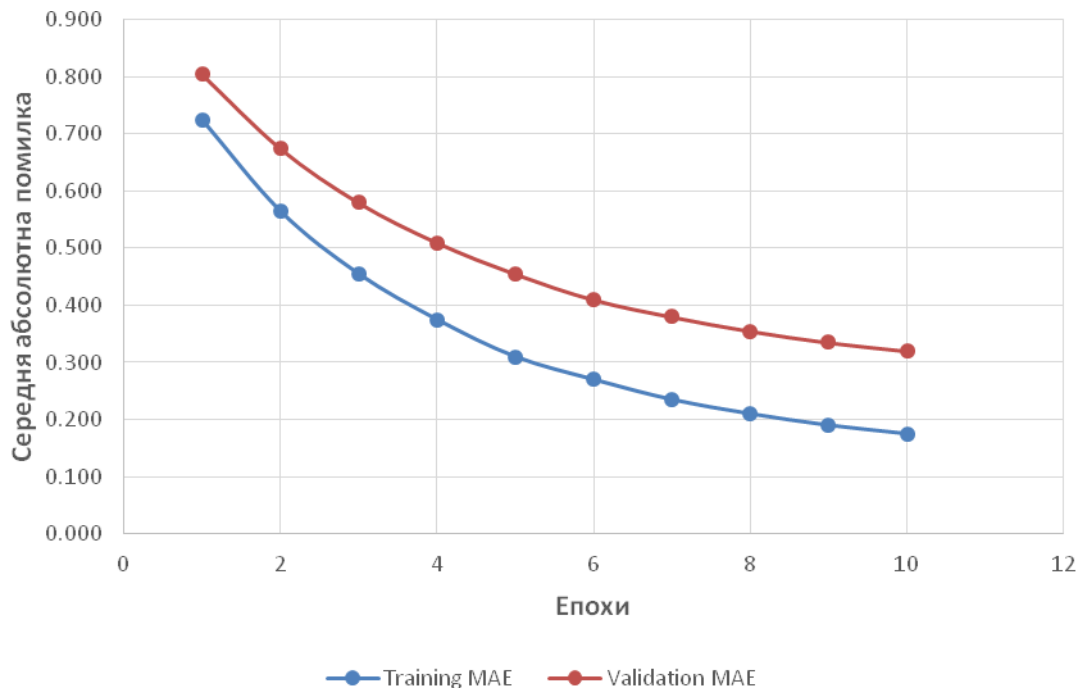


Рис. 3.1 - Динаміка середньої абсолютної помилки для тренувального і валідаційного набору даних по мірі навчання нейромережевої моделі

- **Training MAE:** Середня абсолютна помилка на тренувальному наборі даних також зменшується з 0.725 на першій епосі до 0.175 на десятій епосі. Зменшення значення MAE вказує на підвищення точності моделі при прогнозуванні продуктивності екскаватора на тренувальних даних.

Далі охарактеризуємо показники валідаційного набору.

- **Validation Loss:** Значення функції втрат на валідаційному наборі даних дають нам уявлення про здатність моделі узагальнювати на нові дані, які не використовувалися під час навчання. Validation Loss зменшується з 0.950 на першій епосі до 0.390 на десятій епосі. Зниження Validation Loss свідчить про покращення здатності моделі прогнозувати продуктивність екскаватора на невідомих даних.

- **Validation MAE:** Середня абсолютна помилка на валідаційному наборі даних зменшується з 0.805 на першій епосі до 0.320 на десятій епосі. Це свідчить про те, що модель здатна робити більш точні прогнози на нових даних, що є важливим показником її узагальнювальної здатності.

Зниження значень функції втрат та середньої абсолютної помилки на обох наборах даних вказує на успішне навчання моделі. Модель демонструє покращення у прогнозуванні як на тренувальних, так і на валідаційних даних, що свідчить про її здатність ефективно узагальнювати знання на нові дані.

Зменшення розриву між Training Loss і Validation Loss, а також між Training MAE і Validation MAE, показує, що модель не схильна до перенавчання і здатна підтримувати високу точність прогнозів на нових даних. Це важливо для забезпечення надійності та валідності моделі в реальних умовах експлуатації.

Таким чином, на основі наведених показників можна зробити висновок, що наша модель є валідною і може ефективно використовуватися для прогнозування продуктивності екскаватора на основі вхідних даних.

ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

Перший розділ роботи присвячений аналізу поточного стану та ролі планування навантажувально-транспортних робіт у забезпеченні ефективного використання кар'єрного автотранспорту. Особливу увагу приділено взаємозв'язку автотранспорту з навантажувальними екскаваторами та перевантажувальними пунктами, а також впливу кількості автосамоскидів на продуктивність комплексу. Розглянуто методи кореляційного аналізу для визначення залежностей між різними факторами, що впливають на продуктивність, і наголошено на необхідності вдосконалення планування та контролю роботи комплексів.

Другий розділ присвячений аналізу сучасних методів планування і контролю роботи екскаваторно-автомобільних комплексів. Розглядаються питання технічного обслуговування, управління логістичними потоками, безпеки на робочому місці та використання інформаційних технологій для підвищення ефективності роботи. Окрема увага приділена проблемам координації роботи екскаваторів і автомобілів, а також використанню сучасних систем диспетчеризації для оптимізації логістичних операцій.

В третьому розділі визначаються ключові чинники, що впливають на продуктивність екскаваторно-автомобільних комплексів, зокрема ємність ковша екскаватора, вантажопідйомність самоскида, відстань транспортування, гранулометричний склад порід та інші. Аналізується вплив кожного з цих факторів на загальну ефективність роботи комплексу. Пропонуються методи багатофакторного кореляційно-регресивного аналізу для розробки оптимальних моделей роботи комплексів з урахуванням взаємодії різних факторів, що базуються на використанні нейромережевих технологій.

Підготовлено датасет вхідних даних з кар'єрів Кривбасу для навчання нейромережі. Обґрунтовано архітектуру і розроблено код нейромережевої моделі в середовищі Python. Виконано навчання моделі на основі зібраного

додатку. Зпрогнозовано продуктивність екскаваторно-автомобільного комплексу для конкретних гірничо-технічних умов. В цьому ж розділі виконано оцінку валідності роботи нейромережевої моделі і оцінено динаміку її навчання.

Очевидними недоліками розробленої моделі є обмежений об'єм даних для навчання, оскільки дані показники не завжди знаходяться у відкритому доступі. Також робоча модель має враховувати більше факторів і навчатися у режимі реального часу. Однак запропонований математичний підхід до вирішення задачі багатофакторної оптимізації управління екскаваторно-автомобільними комплексами глибоких кар'єрів вбачається правильним і потребує подальшого розвитку. В ході експлуатації подібної моделі на діючому підприємстві модель продовжуватиме навчання, що підвищуватиме точність її роботи. Включення більшої кількості факторів сприятиме цьому процесу.

Результати виконаних досліджень можуть бути корисними гірничо-видобувним підприємствам з відкритим способом видобутку для підвищення операційної ефективності їх діяльності.

Бібліографія.

1. Демич Л.М. Опыт эксплуатации комплекса ЦПТ на карьере Мурунтау / Л.М. Демич, О.Н. Мальгин, В.Н. Сытенков // Горный журнал. - 1991. - № 7. – С. 43-44.
2. Коломников С.С. Обоснование комплекта сменных ковшей для механических лопат при открытой разработке сложноструктурных месторождений / Горная промышленность, 2002.- № 5. - С. 12-18.
3. АрселорМіттал Кривий Ріг повідомляє виробничі результати за 2023 рік // АрселорМіттал Кривий Ріг. - 2023. - Режим доступу: <https://ukraine.arcelormittal.com/index.php?id=102&pr=813>
4. Потапов М.Г. О целесообразном сроке службы карьерных автосамосвалов / М.Г. Потапов, В.М. Альтшулер, З.Л. Сироткин, А.Н. Казарез // Горный журнал. - 1972. - № 5. - С. 47-49.
5. Шамсутдинов, М.М. Открытые горные работы: учебное пособие / М.М. Шамсутдинов, Э.В. Lupинин. – Бишкек, 2015. – 182 с.
6. Квагинидзе, В.С. Автомобильный транспорт на карьерах. Конструкция, эксплуатация, расчет / В.С. Квагинидзе, Г.И. Козовой, Ф.А. Чакветадзе, Ю.А. Антонов, В.Б. Корецкий: Учебное пособие. – К.: Вид-во «Гірнична книга», 2012. – 408 с.
7. Дубінкін, Д.М. Дослідження процесу транспортування розкритих порід та вугілля на розрізах / Д.М. Дубінкін, В.Ю. Садівець, Г.О. Котієв, А.В. Карташов // Техніка и технологія гірничої справи. – 2019. – №3. – С. 50-66.
8. Васильев М.В. Транспорт глубоких карьеров. - М.: Недра, 1983. - 295 с.
9. Новожилов М.Г. Метод планирования горнотранспортных работ на карьерах / М.Г. Новожилов, Г.Д. Пчелкин, В.И. Прокопенко, А.Ю. Дриженко // Горный журнал. - 1969. - № 11. - С. 15-18.

10. Суменков М.С. Математическая модель оптимизации месячных планов на горно-обогатительных комбинатах / М.С. Суменков, Г.К. Котов, Х.Н. Гизатулин и др. // Горный журнал. - 1969. - № 2. - С. 7-8.
11. Krause, A.; Musingwini, C. Modelling open pit shovel-truck systems using the Machine Repair Model. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, Marshalltown, South Africa., v. 107, n. 8, p. 469–476, 2007.
12. Lizotte, Y.; Bonates, E. Truck and shovel dispatching rules assessment using simulation. Mining Science and Technology, v. 5, p. 45–58, 1987.
13. 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, Taylor and Francis Ltd, v. 16, n. 1, p. 59–76, 2002.
14. Ромашкин Н.Н. Математическая модель погрузочно-транспортного процесса в карьерах с автотранспортом / Известия ВУЗов, Горный журнал. - 1967. - № 8. - С. 22-26.
15. Альтшуллер В.М. Планирование работы автотранспорта на угольных разрезах / В.М. Альтшуллер, А.П. Левчик // Паучные исследования по технике и технологии открытых горных работ: Пауч.сообш.;/ПГД им. А.А. Скочинского. -1974.-Вып. 124.-С. 40-45.
16. Кулешов А.А. Эффективность эксплуатации большегрузного карьерного автотранспорта / Горный журнал. - 1973. - № 11. - С. 20-25.
17. Gendreau, M.; Potvin, J. Dynamic Vehicle Routing and Dispatching. Fleetmanagement and logistics, Kluwer Academic Publishers, p. 115–126, 1998.
18. Сорокин Л.А. Приведение показателей работы карьерного автотранспорта к сопоставимым условиям / Известия ВУЗов, Горный журнал. - 1971.- №5.-С. 116-120.
19. Степанов Б.П. Определение производительности автосамосвалов при оперативном планировании погрузочно-транспортных работ / Б.П. Степанов, В.А. Бабич, Ю.В.Прилучный // Разработка рудных месторождений: Респ. межвед.науч.- техн.сб. - Киев: Техника. - 1975. - Вып. 19. - С. 81-84.

20. Стенин, Д.В. Обоснование влияния ресурса несущих систем и степени загрузки на производительность карьерных автосамосвалов: дис. ... канд. тех. наук: 05.05.06 / Стенин Дмитрий Владимирович. – КузГТУ. –125 с.
21. Коваленко А.А., Тараненко В.В., Лисенко Ю.С. Аналіз продуктивності екскаваторно-автомобільних комплексів на кар'єрах «АрселорМіттал Кривий Ріг» // Вісник Національної гірничої академії України. - 2023. - №3. - С. 55-63.
22. Транспортні системи гірничих підприємств: навч.посібник / З.Р. Маланчук, В.Я.Корнієнко, В.С.Сорока, О.Ю.Васильчук. Рівне: НУВГП, 2018. 190 с.
23. Дубінкін, Д.М. Дослідження процесу транспортування розкривних порід та вугілля на розрізах / Д.М. Дубінкін, В.Ю. Садівець, Г.О. Котієв, А.В. Карташов // Техніка и технологія гірничої справи. – 2019. – №3. – С. 50-66.
24. Блізнюков В.Г., Луценко С.О., Пижик А.М. Гірнича справа: Навчальний посібник. Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О. 2014, 412 с.
25. Відкриті гірничі роботи: Ч. I. Процеси відкритих гірничих робіт: навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво»/ О.О.Фролов, Т.В.Косенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 151 с.
26. Відкриті гірничі роботи: підручник / А.Ю. Дриженко; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т – Д.: НГУ, 2014. – 590 с.
27. Бизов В.Ф. Основи технології гірничого виробництва. – Т. IV “Виробничі процеси”: Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком “Гірництво”. - Кривий Ріг: Мінерал, 2000. – 247 с. з іл..
28. Бизов В.Ф. Основи технології гірничого виробництва. – Т. V “Технологічні засоби”: Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком “Гірництво”. - Кривий Ріг: Мінерал, 2000. – 270 с. з іл.

29. Собко Б.Ю. Організація і планування відкритих гірничих робіт/ Б.Ю. Собко, В.В. Панченко, В.В. Лотоус, Д.В. Вінівітін. – Д: НТУ «ДП», ТОВ «Компанія «Бульвар». – 2020, - 188 с.
30. Хорешок, А.А. Оцінка ступеню взаємного впливу ємності ковша екскаватора і місткості кузова автосамоскида / А.А. Хорешок, Д.М. Дубінкін, С.О. Марков, М.А. Тюленев // Вісник Харківського національного університету. – 2021. – №3. – С. 104-112.
31. Новожилов М.Г., Дриженко А.Ю., Маевский А.М. и др. Высокопроизводительные глубокие карьеры. - Днепропетровск, 1984, 187 с.
32. Ю.І. Григор'єв, С.О. Луценко, І.Є. Григор'єв, Є.М. Швець, І.П. Куроп'ятник. Динамічне проектування техніко-економічних показників відкритих гірничих робіт за допомогою нейромережових технологій. Вісник НГУ. Технічні науки : зб. наук. праць. - Дніпро : НГУ, 2024. - Вип. 2(102). - С. 476-484.
33. Жусупов К.К. Автоматизированная диспетчерско-информационная система «АДИС» для экскаваторно-автомобильных комплексов карьеров / К.К. Жусупов, И.М. Клочков, М.А. Жакеев, Д.Ш. Ахмедов, Е.А. Шабельников // Горный журнал. - 2005. - № 9-10. - С. 89-92.
34. Goodfellow, R., Dimitrakopoulos, R. Algorithmic integration of geological uncertainty in pushback designs for complex multiprocess open pit mines // Min. Technol. – 2013. – Vol. 122. – P. 67-77. DOI: <https://doi.org/10.1179/147490013X13639459465736>.
35. Ferland, J.A., Amaya, J., Djuimo, M.S. Application of a particle swarm algorithm to the capacitated open pit mining problem // Proceedings of the 3rd International Conference on Autonomous Robots and Agents. – Palmerston, New Zealand, 11–14 December 2006. – P. 127–132.
36. Shishvan, M.S., Sattarvand, J. Long term production planning of open pit mines by ant colony optimization // Eur. J. Oper. Res. – 2015. – Vol. 240. – P. 825-836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.040>.

37. Kumral, M. Optimizing ore–waste discrimination and block sequencing through simulated annealing // *Appl. Soft Comput.* – 2013. – Vol. 13. – P. 3737-3744. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.03.005>.
38. Khan, A., Niemann-Delius, C. Production Scheduling of Open Pit Mines Using Particle Swarm Optimization Algorithm // *Adv. Oper. Res.* – 2014. – P. 208502. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/208502>.
39. Montiel, L., Dimitrakopoulos, R. Stochastic mine production scheduling with multiple processes: Application at Escondida Norte, Chile // *J. Min. Sci.* – 2013. – Vol. 49. – P. 583-597. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1062739149040096>.
40. Liu, W.S., Li, F.P. Iron Ore Blending Based on Linear Programming // *Appl. Mech. Mater.* – 2014. – Vol. 443. – P. 657-661. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.443.657>.
41. Boland, N., Dumitrescu, I., Froyland, G., Gleixner, A.M. LP-based disaggregation approaches to solving the open pit mining production scheduling problem with block processing selectivity // *Comput. Oper. Res.* – 2009. – Vol. 36. – P. 1064-1089. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2007.12.006>.
42. Lambert, W.B., Newman, A.M. Tailored Lagrangian Relaxation for the open pit block sequencing problem // *Ann. Oper. Res.* – 2014. – Vol. 222. – P. 419-438. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1287-y>.
43. Moreno, E., Rezakhah, M., Newman, A., Ferreira, F. Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems // *Eur. J. Oper. Res.* – 2017. – Vol. 260. – P. 212-221. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.014>.
44. Consuegra, F.R.A., Dimitrakopoulos, R. Algorithmic approach to pushback design based on stochastic programming: Method, application and comparisons // *Min. Technol.* – 2010. – Vol. 119. – P. 88-101. DOI: <https://doi.org/10.1179/037178410X12780655704761>.

45. Lamghari, A., Dimitrakopoulos, R. A diversified Tabu search approach for the open-pit mine production scheduling problem with metal uncertainty // *Eur. J. Oper. Res.* – 2012. – Vol. 222. – P. 642-652. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.029>.
46. Goodfellow, R.C., Dimitrakopoulos, R. Global optimization of open pit mining complexes with uncertainty // *Appl. Soft Comput.* – 2016. – Vol. 40. – P. 292-304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.11.038>.
47. Cui, L., Zhang, K., Li, G., Wang, X., Yang, S., Ming, Z., Huang, J.Z., Lu, N. A smart artificial bee colony algorithm with distance-fitness-based neighbor search and its application // *Future Gener. Comput. Syst.* – 2018. – Vol. 89. – P. 478-493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.06.054>.
48. Jafrasteh, B., Fathianpour, N. A hybrid simultaneous perturbation artificial bee colony and back-propagation algorithm for training a local linear radial basis neural network on ore grade estimation // *Neurocomputing.* – 2017. – Vol. 235. – P. 217-227. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2017.01.016>.
49. Chen, L., Gu, Q., Wang, R., Feng, Z., Zhang, C. Comprehensive Utilization of Mineral Resources: Optimal Blending of Polymetallic Ore Using an Improved NSGA-III Algorithm // *Sustainability.* – 2022. – Vol. 14. – No. 17. – P. 10766. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141710766>.
50. Yao, J., Liu, C., Huang, G., Xu, K., Yuan, Q. Multi-Source and Multi-Target Iron Ore Blending Method in Open Pit Mine // *Arch. Min. Sci.* – 2022. – Vol. 67. – P. 631-644.
51. Kou, X., Xie, X., Zou, Y., Kang, Q., Liu, Q. Research on Comprehensive Evaluation Model of a Truck Dispatching System in Open-Pit Mine // *Sustainability.* – 2022. – Vol. 14. – No. 17. – P. 9062. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14159062>.
52. Icarte Ahumada, G., Diaz Pinto, J., Herzog, O. A Dynamic Scheduling Multiagent System for Truck Dispatching in Open-Pit Mines // *Agents and*

Artificial Intelligence. – Cham, Switzerland : Springer International Publishing, 2021. – P. 132-148.

53. Xia, B., Tian, T., Gao, Y., Zhang, M., Peng, Y. A Dynamic Dispatching Method for Large-Scale Interbay Material Handling Systems of Semiconductor FAB // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – No. 21. – P. 13882. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142113882>.

54. Mohtasham, M., Mirzaei-Nasirabad, H., Askari-Nasab, H., Alizadeh, B. Multi-stage optimization framework for the real-time truck decision problem in open-pit mines: A case study on Sungun copper mine // Int. J. Min. Reclam. Environ. – 2022. – Vol. 36. – P. 461-491. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2067709>.

55. Smith, A., Linderoth, J., Luedtke, J. Optimization-based dispatching policies for open-pit mining // Optim. Eng. – 2021. – Vol. 22. – P. 1347-1387. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09628-w>.

56. Huo, D., Sari, Y.A., Kealey, R., Zhang, Q. Reinforcement Learning-Based Fleet Dispatching for Greenhouse Gas Emission Reduction in Open-Pit Mining Operations // Resour. Conserv. Recycl. – 2023. – Vol. 188. – P. 106664. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106664>.

57. Григор'єв Ю.І., Куроп'ятник І.П., Григор'єв І.Є. Наукове обґрунтування нейромережевого моделювання показників роботи гірничо-видобувного кластеру. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2024) : матеріали тез доповідей XIV Міжнародної науково-практичної конференції (м. Чернігів, 23–24 травня 2024 р.) : у 2 т. / Національний університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; відп. за вип.: Єрошенко Андрій Михайлович [та ін.]. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2024. – Т. 2. – 368 с.

Додаток А

```
import pandas as pd
import numpy as np
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.preprocessing import StandardScaler
import tensorflow as tf
from tensorflow.keras.models import Sequential
from tensorflow.keras.layers import Dense
# Створення DataFrame з емпіричними даними
data = {
    "Bucket Capacity (m^3)": [8, 15, 15, 15, 8, 10, 15, 8, 15, 10, 12, 15, 8, 10,
8, 8, 8, 10, 15, 8, 12, 10, 12, 12, 10, 10, 8, 8, 15, 8, 15, 12, 15, 10, 12, 15, 12,
8, 10, 10, 15, 8, 10, 10, 12, 12, 10, 10, 8, 10, 15],
    "Truck Capacity (t)": [136, 180, 110, 110, 136, 110, 110, 180, 110, 180,
110, 180, 180, 136, 110, 130, 110, 130, 180, 110, 180, 136, 130, 136, 130,
110, 136, 136, 110, 110, 130, 110, 130, 136, 130, 130, 130, 136, 180, 130,
130, 110, 136, 110, 130, 130, 110, 180, 110, 180, 136],
    "Transport Distance (m)": [1102, 2846, 1184, 2174, 4326, 2137, 2457,
1118, 4093, 1022, 2457, 2453, 4397, 4591, 4794, 4398, 2093, 3655, 1928,
3313, 3342, 3123, 2113, 4025, 4900, 2735, 3742, 3898, 3277, 2395, 2375,
2976, 2694, 4210, 3782, 4683, 2337, 1346, 1625, 1966, 1298, 4163, 1954,
2637, 2857, 4008, 2884, 3442, 3457, 1714, 1714],
    "Grain Size (mm)": [178, 493, 603, 498, 312, 415, 171, 424, 202, 279,
400, 146, 136, 227, 621, 577, 566, 336, 390, 539, 453, 170, 181, 367, 346,
191, 487, 512, 360, 275, 240, 530, 620, 280, 353, 365, 127, 522, 612, 199,
514, 162, 379, 475, 624, 317, 157, 324, 402, 503, 503],
```

```
"Excavator Age (years)": [6, 2, 17, 15, 3, 4, 11, 2, 1, 17, 11, 11, 8, 6, 17,
1, 2, 3, 13, 13, 4, 9, 12, 5, 10, 1, 7, 17, 6, 7, 8, 10, 7, 5, 14, 4, 7, 16, 11, 4, 15,
18, 12, 3, 11, 10, 3, 14, 14, 5, 5],
```

```
"Loading Time (sec)": [27, 35, 36, 55, 63, 41, 52, 47, 34, 30, 32, 64, 65,
63, 54, 61, 29, 53, 40, 64, 52, 33, 34, 60, 44, 41, 48, 56, 60, 29, 38, 61, 63,
33, 61, 34, 65, 41, 36, 63, 60, 24, 24, 23, 53, 47, 29, 24, 32, 44, 44],
```

```
"Productivity (m3/h)": [334, 988, 974, 637, 159, 705, 674, 181, 1031,
805, 1084, 546, 155, 326, 198, 175, 311, 489, 876, 159, 539, 931, 855, 582,
658, 705, 178, 152, 682, 311, 922, 574, 777, 931, 574, 855, 155, 705, 803,
777, 214, 1279, 1279, 1264, 775, 615, 832, 639, 754, 988, 988]
```

```
}
```

```
df = pd.DataFrame(data)
```

```
# Розділення даних на ознаки (X) та цільову змінну (y)
```

```
X = df.drop("Productivity (m3/h)", axis=1)
```

```
y = df["Productivity (m3/h)"]
```

```
# Розділення даних на тренувальний та тестовий набори
```

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2,
random_state=42)
```

```
# Нормалізація даних
```

```
scaler = StandardScaler()
```

```
X_train_scaled = scaler.fit_transform(X_train)
```

```
X_test_scaled = scaler.transform(X_test)
```

```
# Створення нейромережевої моделі
```

```
model = Sequential()
```

```
model.add(Dense(64, input_dim=X_train_scaled.shape[1], activation='relu'))
```

```
model.add(Dense(32, activation='relu'))
```

```
model.add(Dense(1, activation='linear'))
```

```
# Компіляція моделі
```

```
model.compile(optimizer='adam',                loss='mean_squared_error',
metrics=['mean_absolute_error'])
# Навчання моделі
history      =      model.fit(X_train_scaled,    y_train,    epochs=100,
validation_split=0.2, batch_size=8, verbose=1)
# Оцінка моделі
loss, mae = model.evaluate(X_test_scaled, y_test, verbose=0)
print(f"Mean Absolute Error on test set: {mae}")
# Прогнозування продуктивності для тестових даних
y_pred = model.predict(X_test_scaled)
```