

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра гірничої справи

«Допущено до захисту»  
Гарант ОПП

Ігор ГРИГОР'ЄВ

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання  
освітньо-професійної програми  
«Технології відкритої розробки родовищ»  
за спеціальністю 184 Гірництво

на тему «Оцінка ефективності використання обладнання з  
дистанційним керуванням в умовах ПРАТ «Центральний ГЗК»

Керівник роботи

Ігор ГРИГОР'ЄВ

Консультант від бази практики

Дмитро ЄГУПОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.*

Здобувач

Віталій ОРЛОВ

*Підсумкова оцінка за атестацію*

Голова ЕК

Запоріжжя 2025

## ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет гірничо-металургійний  
Кафедра гірничої справи  
Ступінь вищої освіти магістр  
Спеціальність 184 Гірництво  
ОПП Технології відкритої розробки родовищ

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Гарант ОПП

\_\_\_\_\_ Ігор ГРИГОР'ЄВ

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

\_\_\_\_\_ Орлова Віталія Сергійовича \_\_\_\_\_

1. Тема роботи «Оцінка ефективності використання обладнання з дистанційним керуванням в умовах ПРАТ «Центральний ГЗК»  
керівник роботи кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри гірничої справи Григор'єв Ігор Євгенійович  
затверджені наказом Університету від №238 від 14.10.2024.
2. Термін подання роботи 13.02.2025
3. Вихідні дані до роботи Навчальна література, державні стандарти з ..., методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики відкритої розробки родовищ, літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПРАТ «ЦГЗК» м. Кривий Ріг
4. Зміст пояснювальної записки: Вступ, Аналіз теоретичних передумов цифрової трансформації відкритих гірничих робіт; Аналіз рухомого

складу автономного і дистанційно керованого транспортного обладнання; Моделювання впровадження обладнання з дистанційним керуванням в умовах кар'єрів ПРАТ «ЦГЗК»;  
Висновки і рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу: Сучасний стан гірничих робіт; Основні моделі гірничо-транспортного обладнання; Показники надійності роботи гірничого обладнання; Переваги та недоліки систем дистанційного та роботизованого управління гірничотранспортними машинами; Графіки ефективності роботизованого обладнання.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1	Григор'єв І.Є., доцент кафедри ГС
2	Григор'єв І.Є., доцент кафедри ГС
3	Григор'єв І.Є., доцент кафедри ГС

7. Дата видачі завдання: 31.05.2024

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання
1	АНАЛІЗ РУХОМОГО СКЛАДУ АВТОНОМНОГО І ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНОГО ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ	02.12 - 27.12.24
2	АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ	15.12 - 31.12.24
3	МОДЕЛЮВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ З ДИСТАНЦІЙНИМ КЕРУВАННЯМ В УМОВАХ КАР'ЄРІВ ПРАТ «ЦГЗК»	01.02-04.02.25

Здобувач

Орлов Віталій Сергійович

Керівник роботи

Григор'єв Ігор Євгенійович

## АНОТАЦІЯ

*Орлов Віталій Сергійович.*

Оцінка ефективності використання обладнання з дистанційним керуванням в умовах ПРАТ «Центральний ГЗК».

Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 184 Гірництво, ОПП «Технології відкритої розробки родовищ» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2025.

**Об'єктом дослідження** є технологічні процеси гірничого обладнання Петрівського кар'єру Артемівського родовища.

**Предметом дослідження** є технічний стан обладнання та принципи керування та моніторингу ведення гірничих розробок Петрівського кар'єру Артемівського родовища ПРАТ "ЦГЗК".

**Мета роботи:** Провести аналіз і оцінку ефективності використання обладнання з дистанційним керуванням в умовах Петрівського кар'єру Артемівського родовища ПРАТ «ЦГЗК».

**У першому розділі** проведено аналіз теоретичних передумов цифрової трансформації відкритих гірничих робіт. Виконано огляд можливостей, викликів та досягнень цифрової трансформації в гірничодобувній галузі. Наведені досягнення цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості

**У другому розділі** проведено аналіз рухомого складу автономного і дистанційно керованого транспортного обладнання. Наведено огляд технічного забезпечення дистанційного керування транспортного обладнання. Наведені приклади безпілотного транспорту та системи їх керування. Вивчення досвіду експлуатації рухомого складу при транспортуванні кар'єрних вантажів.

**У третьому розділі** приведено приклади моделювання впровадження обладнання з дистанційним керуванням в умовах

кар'єрів ПРАТ «ЦГЗК». Розглянуті проблеми і тенденції у застосуванні роботизованого обладнання у відкритих гірничих роботах. Наведено мінімізацію перебування працівників у зонах підвищеного ризику та зменшення людського фактору для підвищення виробництва. Проведено оцінку ефективності впровадження транспортних технологій в умовах ПРАТ «ЦГЗК»

### **Основні результати та їхнє практичне значення:**

У дослідженні проаналізовано сучасний стан технологій дистанційного керування гірничотранспортним та виймально-навантажувальним обладнанням, а також визначено їх вплив на продуктивність, енергоефективність та безпеку гірничих робіт. Робота включає аналіз техніко-економічних показників експлуатації обладнання з дистанційним керуванням у кар'єрі, оцінку його переваг порівняно з традиційними технологіями, а також визначення потенційних ризиків і обмежень впровадження. Проведено розрахунки ефективності використання дистанційно керованої техніки, зокрема впливу на собівартість видобутку, скорочення простоїв машин та покращення умов праці персоналу. На основі отриманих результатів сформульовано рекомендації щодо подальшої оптимізації впровадження дистанційного керування на ПРАТ «ЦГЗК», що сприятиме підвищенню ефективності виробництва та безпеки гірничодобувних процесів

Обсяг роботи: 75 сторінок.

Кількість ілюстрацій: 17.

Кількість таблиць: 3.

Кількість джерел у списку літератури: 43.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДИСТАНЦІЙНЕ КЕРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯМ, ПРОДУКТИВНІСТЬ, БЕЗПІЛОТНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ, ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ, АВТОНОМНИЙ КАР'ЄРНИЙ ТРАНСПОРТ, РОБОТИЗОВАНЕ

ОБЛАДНАННЯ, ОПЕРАЦІЙНА ЕФЕКТИВНІСТЬ.

## ЗМІСТ

Вступ .....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ .....	9
1.1 Короткий огляд можливостей, викликів та досягнень цифрової трансформації в гірничодобувній галузі .....	9
1.2 Можливості цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості .....	10
1.3 Виклики цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості .....	12
1.4 Досягнення цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості .....	13
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РУХОМОГО СКЛАДУ АВТОНОМНОГО І ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНОВОГО ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ ...	19
2.1 Технічне забезпечення дистанційного керування транспортно го обладнання .....	19
2.2 Вивчення досвіду експлуатації рухомого складу при транспортванні кар'єрних вантажів .....	36
2.3 Дистанційно кероване коротко циклове завантаження сипучих матеріалів у гірничодобувних галузях .....	44
РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ З ДИСТАНЦІЙНИМ КЕРУВАННЯМ В УМОВАХ КАР'ЄРІВ ПРАТ «ЦГЗК».....	51
3.1 Проблеми і тенденції у застосуванні роботизованого обладнання у відкритих гірничих роботах .....	51
3.2 Оцінка ефективності впровадження транспортних технологій в умовах ПРАТ «ЦГЗК» .....	61
ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	71

## Вступ

Вивчення умов експлуатації технологічного устаткування в умовах ПРАТ «Центральний ГЗК» дозволяє зробити висновок про необхідність постійного моніторингу технічного стану машин та обладнання, а також регулярного оновлення технологій ведення гірничих робіт. Особливу увагу слід приділити підвищенню ефективності буро-підривних робіт, оптимізації транспортування гірничої маси та вдосконаленню системи безпеки на всіх етапах видобутку. Стабільна робота кар'єру залежить від своєчасного планування гірничих робіт та дотримання всіх технічних вимог щодо розробки уступів і підготовки вибухових робіт.

Перспективними напрямками технічного забезпечення гірничих робіт в умовах ПРАТ «ЦГЗК» є впровадження автоматизованих систем управління процесами видобутку та транспортування гірничої маси, використання сучасних безпілотних технологій для моніторингу стану бортів кар'єру, а також застосування інноваційних бурових і підривних технологій для підвищення ефективності гірничих робіт. Також важливим є вдосконалення системи водовідведення та зниження рівня обводнення гірничих виробок, що дозволить мінімізувати ризики під час виконання буро-підривних та навантажувальних робіт.

## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ПЕРЕДУМОВ ЦИФРОВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ВІДКРИТИХ ГІРНИЧИХ РОБІТ

### 1.1 Короткий огляд можливостей, викликів та досягнень цифрової трансформації в гірничодобувній галузі

Гірничодобувна промисловість є одним із значних факторів глобального економічного розвитку [1] безпосередньо завдяки постачанню її продукції та опосередковано через залежність від інших секторів, таких як виробництво, енергетика та технології. Згідно із даними звіту Statista, у 2022 році 40 провідних гірничодобувних компаній мали загальний дохід приблизно 943 мільярди доларів США [2]. Незважаючи на те, що гірничодобувна промисловість має ключове значення для світової економіки, вона стикається з численними викликами, що ускладнюють її діяльність. Серед цих проблем — стійке зниження рівня руди та необхідність глибшого видобутку для доступу до цінних мінералів, що створює додаткові ризики для безпеки шахтарів через збільшення відстаней між місцями доступу до шахт і вибоями [3]. До того ж, галузь відчуває зростаючий тиск щодо мінімізації впливу на навколишнє середовище внаслідок викидів парникових газів [4]. За даними бізнес-консалтингової групи McKinsey, видобуток корисних копалин відповідає за 4–7 % світових викидів парникових газів, при цьому викиди, спричинені безпосередньою діяльністю та споживанням електроенергії, становлять 1 %, а неорганізовані викиди метану від видобутку вугілля оцінюються від 3 до 6 % [5]. Крім того, високі потреби в енергії та використанні матеріалів у гірничодобувному секторі класифікуються як непрямі джерела викидів парникових газів [6, 4, 7]. Наприклад, лише на енергетичний сектор припадає понад 72 % глобальних викидів вуглецю [8]. Хоча важко точно визначити, яка частка цього відсотка належить видобутку корисних копалин, Liu et al. зазначають, що значна

кількість парникових газів вивільняється через споживання енергії, виробленої шляхом спалювання викопного палива під час видобутку та переробки [7]. У звіті McKinsey за 2020 рік непрямі викиди оцінюються у 28 % [5]. Усі ці виклики негативно впливають на показники галузі з точки зору охорони здоров'я та безпеки, продуктивності, витрат, ефективності роботи, а також екологічної, соціальної та управлінської діяльності (ESG). Деякі гірничодобувні підприємства розробили стратегії цифрової трансформації для вирішення та пом'якшення наслідків цих проблем. Цей огляд містить аналіз можливостей, викликів та досягнень, зафіксованих у секторі.

## **1.2 Можливості цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості**

Оскільки технологія продовжує розвиватися та процвітати, численні галузі промисловості використали її потенціал, і сектор корисних копалин не є винятком. Поява 4IR відкрила безліч можливостей для гірничодобувної промисловості [9–17]. Ці можливості включають, але не обмежуються ними:

Більш широке використання методів штучного інтелекту (ШІ), дистанційно керованих машин, систем дистанційного моніторингу та технологій автоматизації зменшує вплив на працівників небезпечних середовищ, що призводить до покращення умов безпеки [12, 18].

Інтелектуальні технології, впроваджені у виробничі процеси, оптимізують використання ресурсів, скорочують час простою та оптимізують операції, що сприяє підвищенню загальної ефективності [16, 17].

Сенсорні мережі та методи аналізу даних дозволяють швидко виявляти цінні мінерали, аномалії та потреби критичної інфраструктури, сприяючи оперативнішому прийняттю рішень та розподілу ресурсів [9].

Доступність величезних обсягів даних у поєднанні з прогнозними та директивними моделями дає змогу приймати обґрунтовані рішення, які враховують потенційні ризики та оптимізують результати [14].

Використовуючи прогнозовані ринкові тенденції та розуміння ланцюжка поставок, гірничодобувні компанії можуть динамічно коригувати контроль за виробництвом, щоб відповідати попиту, максимізуючи прибутковість і мінімізуючи відходи [19].

Передові технології дозволяють віддалено контролювати ланцюжок створення вартості гірничодобувної промисловості, включаючи розвідку, видобуток, переробку та транспортування, забезпечуючи прозорість, ефективність та нагляд на всіх етапах операції.

Використання таких технологій, як RFID та GPS, дозволяє відстежувати гірничодобувні активи, обладнання та персонал у режимі реального часу, покращуючи управління логістикою та використання активів [13].

Передові технології сприяють впровадженню стійких методів видобутку, таких як точний видобуток корисних копалин та оптимізація видобутку ресурсів, що мінімізує негативний вплив галузі на навколишнє середовище та сприяє відповідальному управлінню ресурсами [11].

Технологічний прогрес дозволяє краще охарактеризувати та зрозуміти рудні родовища, підвищити ефективність видобутку корисних копалин і відновлювати раніше недоступні або недооцінені ресурси [15].

Завдяки інтеграції технологій гірничодобувні компанії можуть покращити комунікацію та співпрацю з місцевими громадами, регулюючими органами та іншими зацікавленими сторонами, сприяючи довірі, прозорості та сталому розвитку [10].

### **1.3 Виклики цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості**

Інтеграція передових технологій у гірничодобувній промисловості призводить до значних покращень у різних аспектах, включаючи охорону здоров'я та безпеку, операційну ефективність, прийняття рішень на основі даних та екологічну стійкість [20]. Ці досягнення мають потенціал революціонізувати гірничодобувні роботи та прокласти шлях до більш сталого та продуктивного майбутнього. Однак, поряд з цими перевагами, гірничодобувний сектор також стикається з певними проблемами, пов'язаними зі швидким розвитком технологій.

Однією з проблем є нестача кваліфікованих кадрів у сфері цифрових технологій. Для успішного впровадження та використання передових технологій у гірничодобувних роботах потрібна робоча сила, яка володіє цифровими навичками та може ефективно використовувати ці технології [21, 22]. Дефіцит таких кваліфікованих кадрів є перешкодою для широкого впровадження технологій у секторі [23].

Ще один виклик полягає в культурних та організаційних аспектах гірничодобувної промисловості. Проблеми спадщини культури та опір змінам можуть перешкоджати швидкому впровадженню технологій [24].

Крім того, витрати та ризики, пов'язані з інвестиціями в цифрові рішення, створюють проблеми для гірничодобувних робіт. Впровадження передових технологій часто вимагає значних фінансових інвестицій і тягне за собою ризики з точки зору рентабельності інвестицій (ROI) та збоїв у роботі [25, 26].

Зі свого боку, як нові, так і зрілі шахти стикаються з труднощами: для нових гірничодобувних підприємств ці проблеми є відносно керованими, тоді як зрілі шахти вимагають модернізації та інтеграції

сучасних технологічних рішень зі старою інфраструктурою, що може призводити до збоїв у роботі [27].

Вирішення зазначених проблем вимагатиме стратегічного планування, співпраці між зацікавленими сторонами галузі та постачальниками технологій, а також інвестицій у перекваліфікацію та підвищення кваліфікації робочої сили гірничодобувної промисловості. Подолання цих перешкод матиме важливе значення для повного використання переваг і можливостей передових технологій, що дозволить гірничодобувній промисловості прийняти цифрову трансформацію та орієнтуватися на шляху до більш ефективного, сталого та технологічно просунутого майбутнього.

#### **1.4 Досягнення цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості**

Хоча розумний видобуток зазнав експоненціального зростання на початку 21 століття (Fisher & Schnittger, 2012 [28]), його витоки можна простежити ще з 20 століття, а саме з 1960-х років (Bellamy & Pravica, 2011 [29]; Ranjith et al., 2017 [30]; Rogers et al., 2019 [31]). У цей період були відзначені значні віхи в історії автономного видобутку корисних копалин. Одне з примітних зрушень відбулося в 1967 році на шахті General Blumenthal в Німеччині, де були розгорнуті перші безпілотні гірничі залізничні вагони (Bellamy & Pravica, 2011 [29]). Згодом, у середині 1970-х років, були впроваджені підземні машини з дистанційним керуванням, що ще більше розширило можливості автоматизації підземних гірничих робіт (Rogers et al., 2019 [31]; Bonchis et al., 2013 [32]). У середині 1990-х років для надводних гірничих робіт були впроваджені навантажувальні та тягові машини з дистанційним керуванням (Bellamy & Pravica, 2011 [29]; Marshall et al., 2016 [33]). Останніми роками розумний майнінг став свідком постійного прогресу та інновацій. Вчені дослідили та поділилися кількома тенденціями в

розумному майнінгу та досягненнях цифрової трансформації, яких зазнала гірничодобувна промисловість протягом багатьох років (Abdellah et al., 2022 [34]; Gustafson, 2011 [35]; Marshall et al., 2016 [33]). У таблиці 1 представлені деталі деяких технологічних досягнень, надані різними вченими, такими як Abdellah et al., 2022 [34]; Gustafson, 2011 [35]; Bonchis et al., 2013 [32] та Marshall et al., 2016 [33], а також згадані роботи в цих статтях. Зверніть увагу, що інформація в таблиці 1 представлена з урахуванням того, що ми називаємо моделлю TEP (technology, environment and people); ця модель відноситься до сучасного підходу в гірничодобувній промисловості, який зосереджується на технологіях, що відповідають специфіці гірничодобувного середовища та орієнтовані на людину.

Таблиця 1.1 – Інновації, пов'язані з цифровою трансформацією в гірничодобувній промисловості з використанням моделі ТЕП.

Застосування в гірничій справі	Технологічне рішення	Робоче середовище	Вплив на людей
Картографія та геодезія	Передові технології мобільного сканування полегшують як епізодичні, так і безперервні топографічні зйомки, значно підвищуючи точність геологічного картографування. Роботизовані морські судна спеціально розроблені для батиметричних досліджень для картографування підводних обстановок. Сканери з високою роздільною здатністю на базі автомобіля забезпечують більшу	Роботизовані судна фірм Riegl і Trimble призначені для детального обстеження хвостосховищ. Такі компанії, як Atlas Copco та Sandvik, відомі своїми передовими технологіями просторового картографування. Точність картографування бурових свердловин досягається	Цей стрибок у технологічних можливостях оптимізує процес збору даних, забезпечуючи швидкий і точний збір топографічних даних, тим самим значно знижуючи ймовірність людської помилки під час ручного калібрування.

Застосування в гірничій справі	Технологічне рішення	Робоче середовище	Вплив на людей
	<p>точність просторового та часового картографування. Також розгортаються спеціалізовані системи для геопросторового сканування та картографування бурових свердловин для отримання детальних даних про надра.</p>	<p>завдяки сучасному обладнанню Leica Geosystems.</p>	
<p>Земляні роботи, завантаження та транспортування</p>	<p>Автоматизовані машини для транспортування та скидання вантажу (LHD) є багатофункціональними, вони з високою ефективністю виконують такі завдання, як транспортування, трамвайство та засипка. Автоматизована система перевезень FrontRunner являє собою значний стрибок вперед в автономному транспортуванні сировини. Дистанційно керовані та автономні бульдозери зробили революцію в землерийних роботах. Крім того, драглайни тепер оснащені передовими технологіями для</p>	<p>Світові виробники, такі як Komatsu, Atlas Copco, Caterpillar і Sandvik, виробляють ці машини, які використовуються в різноманітних гірничодобувних операціях, починаючи від шахти Габі в Чилі до шахти Вест Анжелас в Австралії, а також на залізрудних шахтах Західної Австралії та алмазних копальнях у Канаді.</p>	<p>Ці передові технології вимагають всебічної підготовки операторів для управління складним обладнанням. У певних режимах роботи, як-от пульт дистанційного керування прямої видимості, оператори можуть наражатися на ризики для безпеки через близькість до обладнання. Навіть у напівавтоматизованих операціях необхідний постійний нагляд для забезпечення оптимальної функціональності обладнання та ефективного управління розподілом ресурсів.</p>

Застосування в гірничій справі	Технологічне рішення	Робоче середовище	Вплив на людей
	великомасштабних земляних робіт і модифікації ландшафту.		
Буріння та поводження з вибуховими речовинами	Автономні бурові установки тепер здатні створювати точні вибухові свердловини, що є критично важливим етапом у процесі видобутку. Були розроблені складні роботизовані системи для точного заряджання та розгортання вибухових речовин. Крім того, телероботизовані машини використовуються для дистанційного розщеплення руди та гірських порід, зменшуючи потребу в ручному зменшенні розміру та підвищуючи безпеку.	Rio Tinto використовує ці технології на своїх шахтах Пілбара в Західній Австралії. Інноваційні підземні рішення CSIRO були випробувані на шахті Каннінгтон в Західній Австралії, дослідницькій шахті INCO в Садбері, Канада, а також на підприємствах Rio Tinto Iron Ore.	Впровадження технологій телекомунікацій та дистанційного керування дозволило значно підвищити безпеку за рахунок мінімізації необхідності присутності людини в потенційно небезпечних операційних зонах. Цей технологічний прогрес також надає значні можливості для професійного розвитку та навчання високотехнологічним гірничим роботам.
Відстеження, контроль та моніторинг активів та персоналу	Мітки радіочастотної ідентифікації (RFID) широко використовуються для точного відстеження обладнання, матеріалів і персоналу в складних гірничих середовищах. Комплексні системи управління автопарком використовуються для ретельного моніторингу	Системи RFID, надані RF Tag South Африка, впроваджуються в складних підземних гірничих роботах. Прикладами можуть служити рудники Goldfields, Harmony Gold	Інтеграція RFID та передових систем управління автопарком значно розширила можливості моніторингу персоналу та активів, забезпечуючи підвищену безпеку, особливо в надзвичайних

Застосування в гірничій справі	Технологічне рішення	Робоче середовище	Вплив на людей
	положення та контролю за виробництвом у поєднанні з розподілом завдань для обладнання. Передові технології інформування та виявлення наближення, а також системи запобігання зіткнень впроваджуються для значного підвищення протоколів безпеки на об'єкті.	Mining і AngloGold Ashanti. Співпраця Caterpillar з шахтою в Багдаді призвела до автономної роботи тягачів, а Центр віддалених операцій Rio Tinto у співпраці з CSIRO керує операціями на відстані понад тисячу кілометрів.	ситуаціях. Хоча ці системи покращують ситуаційну обізнаність про потенційні небезпеки, вони вимагають участі оператора для прийняття рішень щодо керування. Такі інновації також призвели до підвищення ефективності праці, загальної якості життя та надали можливості для набуття робочою силою нових та передових технологічних навичок.

Можливості, виклики та досягнення цифрової трансформації, представлені в цьому розділі, є переконливими показниками впливу передових технологій на майбутнє гірничодобувної промисловості. Щоб перетворити виклики цифрової трансформації на можливості та водночас посилити можливості досягнень, необхідно систематично розуміти вимоги майбутніх інновацій. Таким чином, актуальність даного дослідження по I2ROC. Слід зазначити, що впровадження автоматизації та, певною мірою, механізації стратегій у гірничих роботах є процесом, що розвивається, а не підходом припинення та відновлення. Таким чином, вплив автоматизації на економіку, робочі місця, навколишнє середовище, врядування або структуру суспільства в даний час може бути не піддано стислій кількісній оцінці, але очікується, що він буде спостерігатися протягом тривалих періодів

часу. Швидше за все, мова піде про інтеграцію систем, а не про заміну всіх компонентів. Основною метою залишається покращення розуміння бізнесу, перехід до ініціатив з низькими витратами та нульовим рівнем викидів з точки зору охорони здоров'я та безпеки та зміни клімату. Незважаючи на відсутність ясності щодо впливу автоматизації та віддалених операцій на економіку, робочі місця, навколишнє середовище, врядування чи суспільний склад, IROC мають на меті підвищити ефективність та результативність системи, а також уможливити взаємодію між людиною та машиною, маючи на увазі, що як машинні, так і людські можливості є пріоритетними.

## **РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ РУХОМОГО СКЛАДУ АВТОНОМНОГО І ДИСТАНЦІЙНО КЕРОВАНОГО ТРАНСПОРТНОГО ОБЛАДНАННЯ**

### **2.1 Технічне забезпечення дистанційного керування транспортним обладнанням**

Впровадження передових цифрових технологій демонструє багатообіцяючий потенціал для полегшення деяких проблем гірничодобувної промисловості [36, 37], таких як стійке зниження якості руди, що призводить до необхідності глибшого проникнення в земну кору для доступу до цінних мінералів, а також збільшення відстаней між точками доступу до шахт і місцями видобутку [38]. За останні два десятиліття впровадження передових технологій призвело до значного покращення ключових показників ефективності (KPI) сектора, таких як охорона здоров'я та безпека, прибутковість, ефективність, інклюзивність, сталий розвиток та продуктивність [33, 17, 23]. Хоча впровадження цифрових технологій відкриває кілька можливостей, це також складний процес, який потребує належного управління, оскільки він впливає на всі підрозділи організації [39]. Управління складністю процесів у ланцюжку створення вартості гірничодобувної промисловості (від видобутку сировини до доставки продукції) вимагає операційних моделей, які є гнучкими, стійкими та ефективними для досягнення цільових результатів навіть у мінливих та невизначених умовах.

Пандемія COVID-19, яка призвела до зниження продуктивності [40, 41], підкреслила нагальну потребу в рішеннях, здатних витримати подібні збої в майбутньому. Шокова хвиля пандемії підкреслила переваги безперервної роботи гірничодобувних підприємств та важливість людського фактора в гірничих операціях. Таким чином, перехід до автоматизації гірничодобувної промисловості та інтегрованих віддалених операційних центрів (IROC) став неминучим у

таких галузях, як гірничодобувна, які мають кілька об'єктів, географічно відокремлених і значною мірою залежать від співпраці людського капіталу. Хоча деякі провідні гірничодобувні організації вже впровадили IROC у деякі зі своїх операцій під час пандемії COVID-19 [42], реальність така, що багато інших гірничодобувних підприємств мали лише традиційні центри командування та управління, які зосереджуються на діяльності конкретного сектору. Таким чином, зв'язок і міжфункціональні завдання не могли бути досягнуті на різних об'єктах, що призвело до зупинки роботи більшості шахт.

На відміну від традиційних командно-контрольних центрів, діяльність яких обмежена конкретними підрозділами, Інтегровані Віддалені Операційні Центри (IROC) агрегують інформацію з кількох географічно відокремлених об'єктів в єдиний центр управління, що дозволяє керувати різними елементами на різних об'єктах [43]. IROC також сприяють прямій комунікації між виробничим персоналом і лінійними керівниками, а також співпраці між інформаційними технологіями (ІТ) та операційними технологіями (ОТ), що завжди було викликом у гірничодобувному секторі [17]. Вони надають аналітичну інформацію в режимі реального часу, що дозволяє приймати об'ґрунтовані рішення. Успішне впровадження IROC вимагає встановлення ефективного та надійного зв'язку між різними датчиками, пристроями, машинами та персоналом, незалежно від умов навколишнього середовища та місця розташування. Слід зазначити, що інфраструктура, яка використовується в традиційних диспетчерських, може бути перепрофільована та інтегрована в сучасні IROC, оскільки системи є подібними для більшості функцій, за винятком того, що IROC пропонують повний спектр співпраці між функціями.

Завдяки можливостям четвертої промислової революції (4IR) все більше гірничодобувних компаній почали впроваджувати та

автоматизувати IROC. Rio Tinto, провідна світова гірничодобувна група, першою продемонструвала та впровадила IROC на своїх залізорудних підприємствах у Пілбарі у 2008 році та в Перті у червні 2010 року відповідно [23]. Нагальність впровадження IROC значно зросла через пандемію COVID-19, яка збіглася з початковими етапами цифровізації для багатьох гірничодобувних компаній. Деякі компанії, відомі як «цифрові послідовники», лише починали формулювати свої плани цифровізації в цей період, тоді як інші зіткнулися з проблемою модернізації, особливо серед шахт з різним рівнем операційної зрілості та типами сировини. Цей розрив вимагав рішень для модернізації старих шахт, тоді як нові шахти могли легко впроваджувати нові технології. Після впровадження IROC гірничодобувні компанії повідомили про значне покращення своїх ключових показників ефективності, включаючи охорону здоров'я та безпеку, прибутковість, ефективність, інклюзивність, сталий розвиток та продуктивність [33, 23].

Незважаючи на те, що багато гірничодобувних компаній використовують Інтегровані Віддалені Операційні Центри (IROC) для керування дистанційно керованими машинами, управління автоматизованими системами заводів та логістикою руди до та після переробки, потенціал аналітики та генерації нових ідей залишається недостатньо використаним. Деякі основні процеси видобутку, які були автоматизовані на більшості шахт, включають буріння, вибухові роботи, виїмку, транспортування, дроблення та фрезерування. Для посилення переваг існуючих IROC пропонується підвищити рівень інтелекту, перетворюючи їх на Інтегровані та Інтелектуальні Віддалені Операційні Центри (I2ROC). Концепція Четвертої Промислової Революції (4IR), на основі якої розробляються стратегії цифрової трансформації в гірничодобувній промисловості, зосереджена на взаємозв'язку та інтеграції технологій і розумних пристроїв для

створення цінності. Однак, зосередженість лише на використанні технологій для вирішення проблем галузі створює прогалину в розвитку людських навичок, необхідних для цифрового робочого середовища.

У зв'язку з цим, основна мета цієї статті полягає в наданні всебічного погляду на орієнтовані на людину I2ROC, поясненні їх потенційних переваг та критичних елементів. Особлива увага приділяється ролі людини у досягненні підключених шахт через I2ROC. Наведено ключові фактори, які слід враховувати для забезпечення належно кваліфікованої робочої сили. Зрештою, пропонується підхід до планування та впровадження I2ROC, який покращує показники продуктивності гірничодобувних робіт 21-го століття, не залишаючи людський аспект відстаючим з точки зору знань, навичок та можливостей. Для досягнення цієї мети проведено ретельний аналіз кейсів у гірничодобувній промисловості, вивчено впроваджені IROC та оцінено вимоги до їх перетворення в I2ROC. Також представлено прогнози щодо важливих міркувань для досягнення I2ROC.

У прагненні до I2ROC дуже важливо віддавати перевагу технологіям, орієнтованим на людей, які наголошують на інтелектуальній взаємодії між людьми та машинами. У той час як економія коштів і підвищення продуктивності є незаперечними перевагами віддалених операцій і автоматизації, концепція I2ROC визнає цінність людей-учасників як ключових активів. Тому прийняті і розроблені технології і методики повинні посилювати творчі здібності і здібності людини і долати обмеження.

Процес планування I2ROC можна розділити на три фази, зображені на рисунку 2.1.

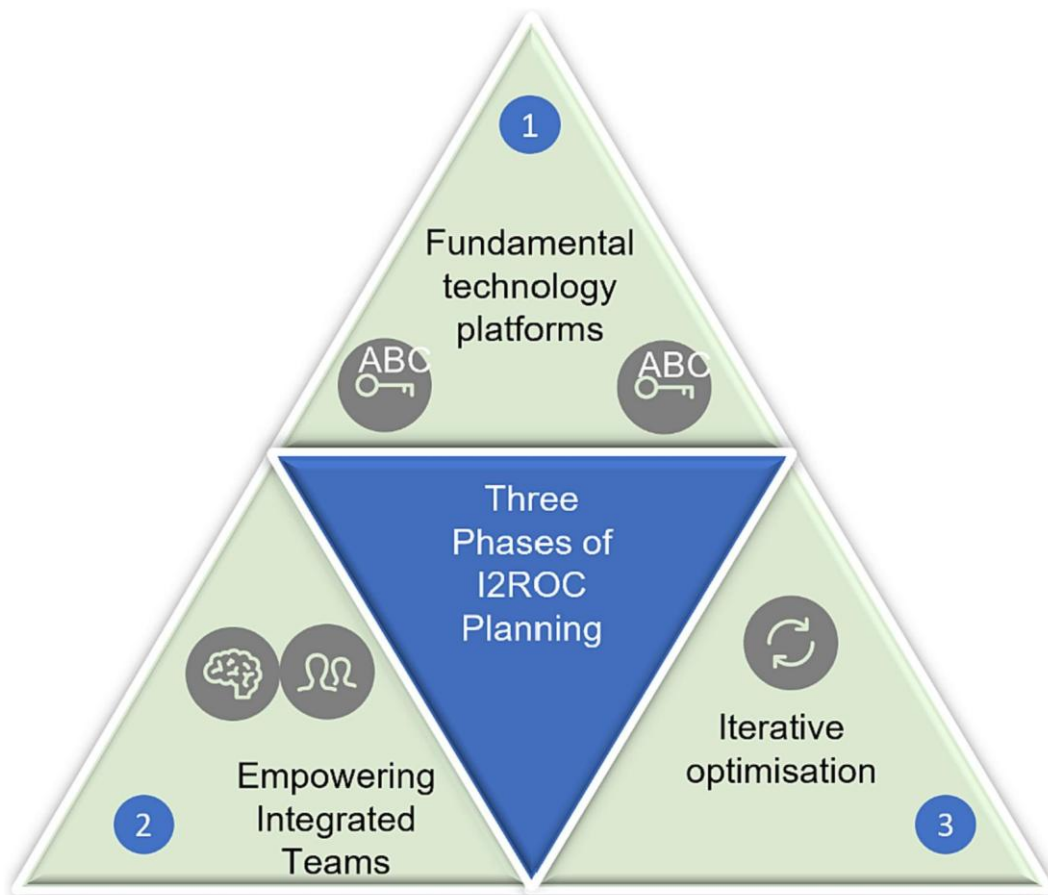


Рисунок 2.1 - Основні етапи планування I2ROC [джерело: 43].

Фаза 1 зосереджена на встановленні основ. Це включає впровадження технологічних платформ з відповідним резервуванням для забезпечення надійності та відмовостійкості. Він також забезпечує всебічну академічну та галузеву підготовку, щоб озброїти співробітників необхідними навичками та знаннями. Крім того, на цьому етапі важливо розвивати культуру, яка охоплює впровадження нових технологій.

Фаза 2 зосереджена на розширенні можливостей інтегрованих команд. Це передбачає надання командам єдиного джерела достовірної інформації, де точна та актуальна інформація є легкодоступною. Обмін знаннями та підходи до спільної роботи наголошуються на заохоченні ефективного спілкування та співпраці між членами команди. Сукупні знання та досвід команди можуть бути

використані для покращення процесів прийняття рішень та вирішення проблем в організації.

Фаза 3 включає ітеративні процедури оптимізації для постійного вдосконалення можливостей різних функцій, що в кінцевому підсумку призводить до досягнення статусу I2ROC. Цей етап підкреслює культуру постійного вдосконалення, де цикли зворотного зв'язку та інсайти на основі даних стимулюють інновації та вдосконалення стратегій віддалених операцій. Гірничодобувні компанії можуть залишатися в авангарді розробок і гарантувати, що їхні I2ROC продовжуватимуть розвиватися та вдосконалюватися шляхом регулярної оцінки та оптимізації процесів, технологій та робочих процесів.

На всіх етапах основна увага приділяється людському фактору, визнаючи, що технології повинні доповнювати та розширювати можливості людства. Мета полягає в тому, щоб створити середовище, в якому люди та машини розумно співпрацюють, використовуючи сильні сторони обох для досягнення оптимальних результатів. Гірничодобувні організації можуть повністю розкрити потенціал ROC, ставлячи людей у центр технічного розвитку та виконання, а також допомагаючи та підвищуючи кваліфікацію своєї робочої сили.

Розвиток гірничодобувної промисловості вимагає впровадження нових економічно ефективних і безпечних технологій видобутку і транспортування корисних копалин. Ця галузь є важливою для народного господарства і потребує вдосконалення. Відкритим способом називається розробка корисних копалин, якщо він передбачає роботу у кар'єрах. У зв'язку зі стрімким збільшенням глибини кар'єрів стає неможливим використання залізничних вантажних перевезень, скреперної чи конвеєрної стрічки через складність організації ефективного та високопродуктивного транспортування порід. Колісний транспорт видається найбільш

придатним для роботи у кар'єрах, оскільки він здатний забезпечити належний рівень продуктивності праці. Одним з таких транспортних засобів є самоскид. Самоскид — саморозвантажувальний автомобіль, призначений для перевезення ґрунту та інших вантажів в умовах бездоріжжя.

Для виявлення сучасних тенденцій розвитку конструкцій самоскидів необхідно провести глибокий техніко-економічний аналіз існуючих зразків гірничошахтної техніки. Пріоритетним завданням техніко-економічного обґрунтування є визначення поточного технічного рівня галузі шляхом проведення патентного пошуку та огляду літератури з даної теми. Аналіз патентного пошуку дає підстави побудувати короткочасний прогноз (на 5 років) розвитку кар'єрного обладнання. Головний тренд у світовому добувному обладнанні – курс на підвищення енергоефективності, основним показником якої є питома витрата палива. Проблема енергоефективності та закон керування автосамоскидами викладені в. Одним із основних шляхів зниження питомої витрати палива є зниження опору руху та перенесення технології на паралельний гібрид або розподілені гібриди.

Наведемо для прикладу патент RU 158 664 U1 «Пристрій керування комплексом тягового електрообладнання транспортних засобів, переважно самоскидів». Цей патент описує пристрій керування електричним тяговим приводом (див. рисунок 2.2) для транспортних засобів. Комплект містить корпус і закріплену в ньому систему рідинного охолодження силових перетворювачів, з'єднаних між собою шинами.

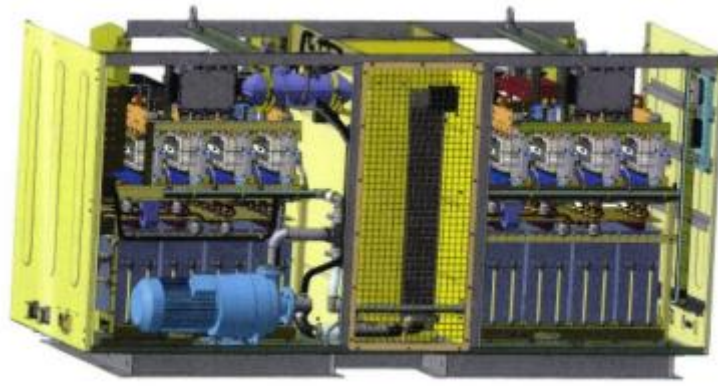


Рисунок 2.2 - Пристрій керування електротяговим приводом

Наведемо приклад патенту US RE 36152 «Спосіб і пристрій для контролю буксування коліс з диференціальним приводом для шарнірно-зчленованої машини». Цей патент описує спосіб і пристрій для керування пробуксовкою коліс із диференційованим приводом для шарнірно-зчленованої машини. Описуваний пристрій містить гальмівний механізм, який має можливість блокувати кожне з коліс окремо, датчики кутової швидкості, датчик взаємного кута повороту шарнірних частин рами, контролер. Застосування системи контролю тяги (див. рисунок 2.3) на самоскиді може зменшити пробуксовку коліс і в той же час зменшити споживання електроенергії для руху.

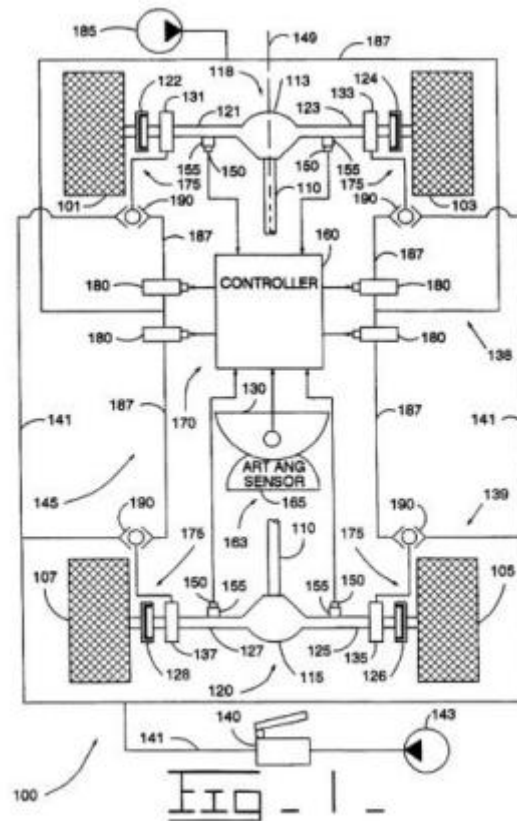


Рисунок 2.3 - Система контролю тяги

Ефективність використання гібридних схем трансмісії показано в [10]–[13]. Шляхи зниження витрати палива та шкідливих викидів в атмосферу шляхом використання самоскидів з гібридною силовою установкою. Проведено моделювання в MATLAB / Simulink трансмісії самоскида з дизель-генераторною гібридною силовою установкою. Подібна модель представлена в [14].

У роботах [15]–[18] виявлено тенденцію до поглиблення глибини кар'єри. Збільшення глибини призводить до погіршення умов експлуатації. Зростає загазованість, особливо в нижній частині кар'єру. В основних роботах відзначається необхідність зменшення шкідливих викидів від роботи гірничого обладнання. У деяких роботах пропонується використовувати тролейбуси, що живляться від контактної мережі. Детально розглянуто переваги тролейбусів перед класичною дизель-електричною схемою. Перехід на електричну тягу знизить рівень шкідливих речовин у повітрі, рівень шуму та вібрації.

Повний перехід на використання тролейбусів ускладнюється недостатньою гнучкістю переміщення контактної мережі. Такий підхід вимагає організації стаціонарних вантажно-розвантажувальних майданчиків. Для вирішення проблем гнучкості та мобільності пропонується використовувати дизельні тролейбуси (див. рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 - БелАЗ-7524-Э792

Проаналізувавши гірничі умови використання тролейбусного транспорту, виділяють наступні умови експлуатації, придатні для використання тролейбусного транспорту на відкритих шахтах: віддаленість тролейбусних ліній від виробничого майданчика, наявність стаціонарного вантажно-розвантажувального пункту, дальність транспортування гірничої маси 3–30 км, ухил доріг від 0 до 10%. Проте з розвитком технологій виробництва електричних акумуляторів стало можливим створювати повністю електричні самоскиди.

Застосування повністю електричної трансмісії крім зниження вартості експлуатації транспорту дозволяє виробникам значно економити на виробництві за рахунок меншої кількості вузлів трансмісії та інших елементів. Крім того, електрифікований шахтний транспорт дозволяє отримати наступні переваги: зменшення маси самоскида на

10–15%, виключення дизельних вихлопів і, отже, відсутність загазованості шахти та утворення туману. , виключення витрат на придбання, зберігання та транспортування дизельного палива, зниження вартості вантажівки за рахунок виключення дизельного двигуна, зниження витрат на шини за рахунок меншої мертвої ваги електровантажівки, простота обслуговування силового агрегату і морозостійкість електродвигуна, що особливо відрізняє його в північних регіонах від дизеля (сильні негативні температури негативно позначаються в основному на акумуляторах).

Одним із таких прикладів є електричний самоскид eDumper (див. рисунок 2.5). Протягом кількох років швейцарський уряд оснащував важку промисловість електричними машинами. Найбільшим за розмірами є електросамоскид eDumper вагою 45 тонн, розроблений компанією Kuhn Schweiz AG, який має довжину 8,5 метра, ширину і висоту 4,2 метра. Електроживлення забезпечує батарея ємністю 600 кВт/год, яка важить 4,5 тонни.



Рисунок 2.5 - Електричний самоскид eDumper

Як і всі електромобілі, eDumper рекуперує енергію, вироблену під час гальмування. Під час гальмування електродвигун переходить у режим заднього ходу, виробляючи електроенергію, яка заряджає акумулятори. eDumper використовується в шахті поблизу Біля (Швейцарія). Він транспортує 65 тонн породи на цементний завод вниз по горі з ухилом 13%. При спуску з гори самоскид має велику інерцію,

за рахунок чого система рекуперативного гальмування заряджає акумулятори. В результаті eDumper заряджається сам і не вимагає частих підключень до мережі. Вимірювання заряду акумулятора проводили після підйому з повністю завантаженим кузовом і після спуску до точки завантаження в кар'єрі. На початку підйому заряд акумулятора був 90%, після підйому 80%. Після спуску завдяки відновленню живлення батареї були заряджені до 88%, що майже дорівнює початковому заряду акумуляторів. Щодня самоскид здійснює близько 20 спусків і підйомів.

Результатом впровадження електротрансмісії та двигунів є економія 50 тонн дизельного палива щорічно, що значно підвищує енергоефективність роботи та робить кар'єрні самоскиди екологічно чистими.

Таким чином, огляд та аналіз публікацій показує, що розробки та дослідження наразі спрямовані на підвищення ефективності, надійності та безпеки гірничих транспортних систем за рахунок використання гібридних та електричних трансмісій.

В даний час автономні транспортні засоби широко використовуються в різних сферах. Використання автономних транспортних засобів у промисловості може бути продиктовано небезпечними умовами праці, а також необхідністю підвищити продуктивність за рахунок скорочення часу простою транспортних засобів під час відпочинку та зміни водія, а також роботи в темний час доби. Створення автономних кар'єрних самоскидів є одним із пріоритетних завдань у розвитку кар'єрної техніки. В першу чергу це пов'язано з безпекою при роботі в кар'єрах, часто супроводжуваних нещасними випадками, пов'язаними з аваріями, і небезпекою шкідливих газів, особливо радіоактивного радону. Також використання автономних самоскидів забезпечує підвищення енергоефективності, пов'язане з використанням гібридної та електричної трансмісії.

Створення повністю автономних автомобілів – складне завдання, яке ще не повністю вирішене на сучасному рівні розвитку технологій. Кар'єрні вантажівки працюють на обмежених ділянках на повторюваних маршрутах. Ці особливості їх роботи дозволяють створювати обладнання для автономного майнінгу з використанням доступних на сьогодні інструментів.

На даний момент провідними компаніями БелАЗ, Volvo, Komatsu, Caterpillar, Hitachi створено декілька автономних гірничодобувних устаткування.

Автономний кар'єрний самоскид БелАЗ.

Російська компанія «ВІСТ Роботікс» спільно з БелАЗом створила прототип автономного кар'єрного самоскида на базі моделі БелАЗ-7513Р, зображеної на рисунку 2.6. Самоскид має вантажопідйомність 130..136 тонн. Може працювати як в автономному режимі, так і в режимі телекерування. режимі, має електромеханічну трансмісію, двигун потужністю 1194 кВт.



Рисунок 2.6 - Автономний кар'єрний самоскид БелАЗ-7513Р

БелАЗ-7513Р працює наступним чином: диспетчер видає в систему змінне завдання, виділяє необхідну кількість одиниць техніки та маршрут виробництва. Вантажівки виїжджають зі стоянки на майданчик і починають безперервну роботу - навантаження, дорога,

розвантаження. Оператор може перепризначити машину на інший маршрут або відправити її на стоянку: робот завершить поточний цикл і попрямує до нового завдання.

У складних умовах дистанційне керування бере на себе оператор, який може одночасно керувати декількома автомобілями.

Система автономного керування рухом самоскида БЕЛАЗ-7513Р включає бортовий блок управління, розташований в передній частині автомобіля поруч з кабіною водія. З лівого і правого боків автомобіля розташовані два приймачі супутникових навігаційних систем.

Для візуального контролю використовуються 11 відеокамер, які встановлені по периметру ТЗ. В автомобілі використовуються камери безпеки серії Orlaco EMOS з інтерфейсом Ethernet. Кілька радарів Delphi ESR, що працюють на середній і дальній дальності, відповідають за виявлення людей та інших об'єктів на маршруті. На самоскид встановлені тривимірні і двовимірні лідари, які відповідають за сканування простору в горизонтальній і вертикальній площинах, а також за моніторинг зони безпеки навколо автомобіля. По периметру автомобіля встановлені ультразвукові датчики (сонари) Banner QT50U для виявлення перешкод на невеликих відстанях, дальність виявлення датчика 0,2 ... 8 м.

Безпілотний самоскид Komatsu.

Komatsu розпочала тестування автономних транспортних засобів на мідному шахті Codelco в Чилі в 2005 році, а через три роки, у січні 2008 року, там же почалося перше комерційне використання AHS (Autonomous Haulage Systems), що підвищує безпеку, комерційну та економічну ефективність. У вересні 2017 року на одному з діючих гірничодобувних підприємств компанії Rio Tinto були проведені успішні випробування комплексу модернізації AHS для електричних мотосамоскид Komatsu 830E з дизель-електричною трансмісією, двигуном 1835 кВт, вантажопідйомністю 231 тонна.

Система управління автопарком AHS працює без участі водія вантажівки. Інформація про їхній маршрут і швидкість передається по бездротовому зв'язку в центральну диспетчерську. Точне місце розташування визначається за допомогою GPS-навігації.

Система керування автопарком контролює все обладнання через GPS і бездротову мережу, включаючи інше обладнання та транспортні засоби, якими керує людина, щоб запобігти зіткненням. Інтегрована система аналізу навколишнього середовища допомагає вантажівкам самим реагувати на раптово з'являються об'єкти і перешкоди.

Японський виробник представив прототип самоскида Komatsu IAHV (рисунок 2.7), який є частиною автономної системи керування вантажним комплексом, у 2016 році на Mine Expo в Лас-Вегасі.



Рисунок 2.7 - Самоскид Komatsu IAHV

Основні особливості цієї моделі — це можливість рухатися вперед і назад з однаковою швидкістю, а також керуваність усіма чотирма колесами. Завдяки цим опціям скорочується час налаштування самоскида на навантаження та розвантаження, а також економиться простір у вибійній та розвантажувальній зонах, оскільки не потрібно повертати вантажівку. Komatsu IAHV може рухатися боком. Центр мас розташований у середній частині вантажівки, що дозволило рівномірно розподілити навантаження на колеса та вирівняти

коефіцієнт зчеплення з дорогою всіх коліс. Сьогодні конструкція знаходиться в дослідній експлуатації.

Безпілотний самоскид Volvo.

Безпілотні самоскиди Volvo HX є частиною проекту Volvo Electric Site розвитку електрифікованої гірничодобувної компанії з мінімальними шкідливими викидами. Перший прототип Volvo HX1 (рисунок 2.8) використовувався для доопрацювання концепції безпілотного електричного самоскида. Компанія Volvo обрала концепцію, яка використовує велику кількість невеликих самоскидів замість кількох із великою вантажопідйомністю та дозволяє зменшити втрати у разі виходу з ладу одного із самоскидів.



Рисунок 2.8 - Самоскид VolvoHX1

Другий прототип Volvo HX2 використовує більше серійних деталей Volvo, таких як тягові електродвигуни, батареї та силова електроніка. У систему контролю руху додали тривимірні лідари для виявлення людей і перешкод. Самоскид має повний привід і повне рульове управління, що дозволяє збільшити маневреність і дає можливість руху вбік. Максимальна швидкість 40 км/год вперед і назад. Самоскид оснащений трьома електродвигунами. Два електродвигуни використовуються в якості тяги, третій двигун приводить в рух гідронасос. Гідравлічна система високого тиску використовується для рульового керування та приводу розвантажувальних циліндрів.

Зарядка тягових акумуляторів самоскида Volvo HX2 відбувається за рахунок пантографа, розташованого на спеціальній підставці під рівнем землі. Коли вантажівка зупиняється, штанга пантографа піднімається над нею і з'єднує контакти з куполом, розташованим під днищем вантажівки.

На основі огляду існуючих розробок транспортних засобів у гірничодобувній сфері, а також патентних досліджень можна виявити основні тенденції розвитку технологій у цій сфері. До них відносяться гібридизація або повна електрифікація силової установки і трансмісії самоскидів, використання безпілотних технологій і повна відсутність кабін в розроблених зразках техніки. Відповідно, формується два шляхи розвитку автономних транспортних засобів: дооснащення існуючих транспортних засобів необхідними агрегатами або проектування нових транспортних засобів з урахуванням можливості автономного руху аж до відмови від ручного керування та виключення кабіни з конструкції автомобіля, подібно до Volvo та Самоскиди Komatsu.

Також одним із перспективних напрямків гібридних самоскидів є дизель-тролейбуси. Для пересування по основних ділянках маршрутів використовується контактна мережа, а для доступу до вантажно-розвантажувальних майданчиків – дизель-генераторна установка.

Використання безпілотних систем у самоскидах порівняно з дорожніми транспортними засобами спрощено за рахунок таких факторів: відсутність багатьох смуг руху, інших учасників дорожнього руху, різноманітність об'єктів навколишнього середовища, низькі швидкості на стандартних маршрутах. Однак існують і негативні фактори, що впливають на роботу безпілотних самоскидів. Це відсутність розмітки, деформованість ґрунту, нерівна опорна поверхня під кутом до горизонту, відсутність якісного зв'язку для роботи GPS.

Безкабінна конструкція самоскидів є найбільш перспективною і переважною і дозволяє істотно збільшити розміри вантажної платформи, а також забезпечити рух в обох напрямках за принципом «виштовхни-тягни».

## 2.2 Вивчення досвіду експлуатації рухомого складу при транспортуванні кар'єрних вантажів

У вантажівці Komatsu 930E-4SE наступні основні компоненти можна визначити як критичні системи, як показано на рисунку 2.9, на додаток до системи рульового управління та гальмування, які, по суті, є критичними системами. Кожне з них представляє прилад, на якому робляться прогнози несправностей.



Рисунок 2.9 - Ідентифікація критичних компонентів на вантажівці Komatsu 930E-4SE

Дизельний двигун: призначення дизельного двигуна полягає в тому, щоб приводити в дію головний генератор змінного струму та подавати механічну енергію для різних гідравлічних пристроїв в

обладнанні та електроенергію для тягових двигунів. У вантажівці Komatsu 930E-4SE використовується дизельний двигун Cummins моделі QSK60 потужністю 3300 к.с.

Головний генератор змінного струму: це компонент, який узгоджується з дизельним двигуном і працює на швидкості двигуна. Генератор змінного струму виробляє змінний струм, який випрямляється на постійний струм у головній шафі керування (Рохас Корреа, 2014). Крім того, він забезпечує охолоджуючим повітрям для основних елементів керування та двигунів тягових коліс і має передові системи збудження, що дозволяє швидко реагувати на потребу в потужності.

Тяговий двигун: перетворює електричну енергію, що надається системою, на механічну енергію, здатну забезпечити крутний момент, необхідний для руху вантажівки, шляхом регулювання струмів до обмоток статора.

Набір затримки: також відомий як банк гриля, це набір резисторів низького омичного значення та високої потужності, які використовуються для розсіювання тепла, що виділяється під час динамічної затримки або гальмування вантажівки. Набір затримки також має два повітрорудки, які охолоджують резистори під час процесу гальмування.

Шафа керування: Компонент, який містить усі елементи, що складають систему керування, яка забезпечує високу напругу для руху та потужності під час динамічної затримки. Контактори, панель електронної плати та інші електричні пристрої є частиною системи керування та шафи управління

Далі представлено набір дуже складних несправностей, які потребують віддаленої експертної підтримки. На рисунку 2.10 показано поведінку доступності парку вантажівок на додаток до KPI середнього часу між відмовами (MTBF), середнього часу до ремонту (MTTR) і

використання вантажівки в останній поточний рік. Потім на рисунку 2.11 показані діаграми Парето відповідно до інформації, яка щодня вводиться в платформу узгодження, за допомогою якої визначається, які критичні системи впливають на парк вантажівок. Нарешті, рисунок 2.12 показує ступінь непередбачуваних подій вантажівок порівняно із запрограмованим відсотком. Можна побачити, що існує високий рівень незапланованих зупинок, що може свідчити про наявність значної кількості перебоїв або несподіваних подій, які впливають на нормальну роботу.

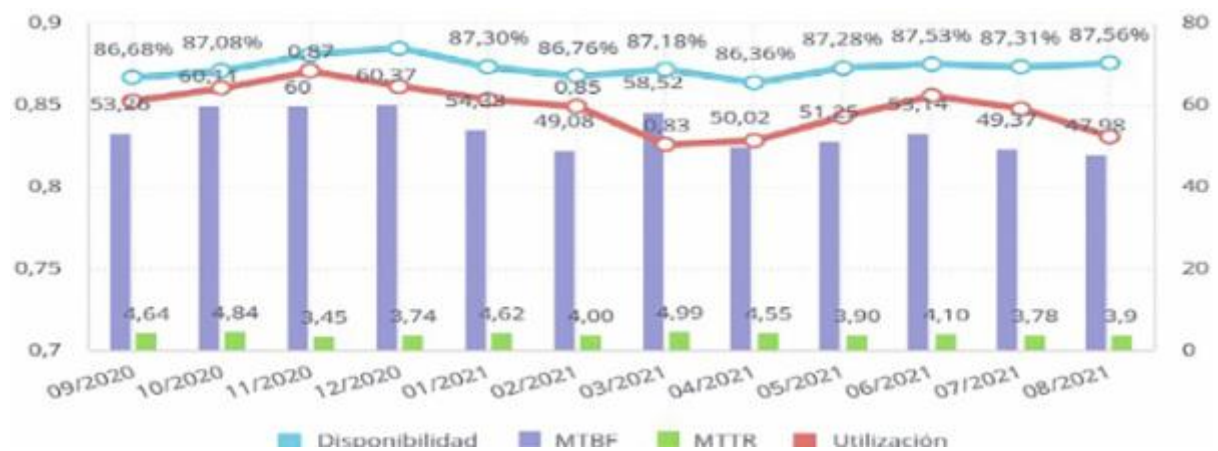


Рисунок 2.10 - Графік індикатора надійності вантажівок Komatsu

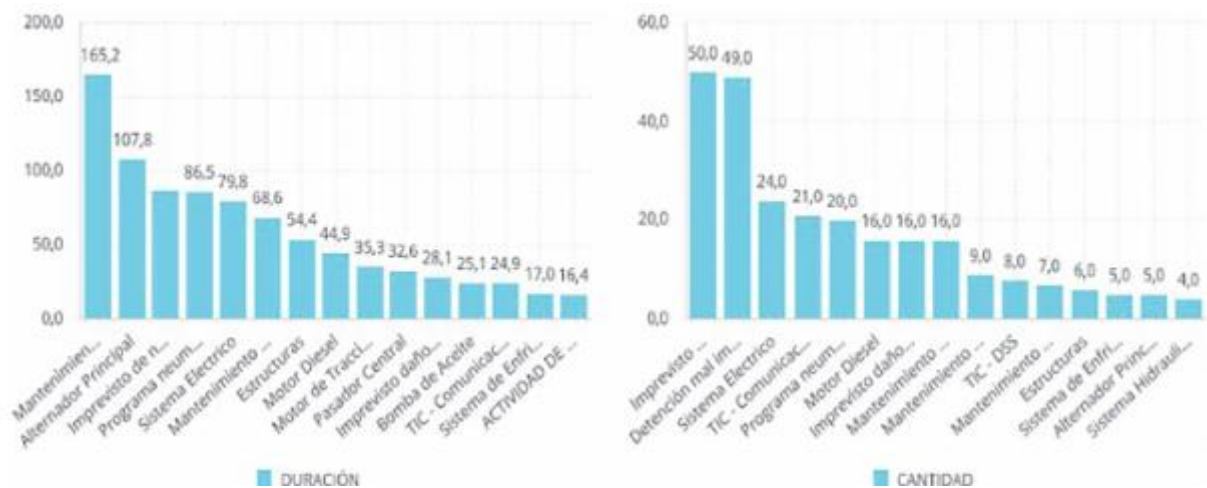


Рисунок 2.11 - Діаграми Парето для несправностей вантажівок Komatsu



Рисунок 2.12 - Графік відсотка запланованого та незапланованого для вантажівок Komatsu

У розумінні даних для навчання інтелектуальному аналізу даних вони надходять в основному з платформи Sisense, яка має історичну інформацію про всі збої обладнання майнінгової компанії. Платформа Sisense генерує щоденні оновлення інформації та звітності KPI на інформаційній панелі, яка показує KPI доступності, діаграми Парето, діаграми Jack-Knife, KPI надійності та співвідношення запланованих і неочікуваних завдань.

Зокрема, у базі даних CAEX 930E-4SE Komatsu міститься інформація з 2016 по 2021 рік із загальною кількістю 127 939 зареєстрованих видів діяльності, що відповідають 58 вантажівкам, з яких 93 358 відповідають позаплановим зупинкам. Збір даних отримано із затримань, які сталися через несправності вантажівок Komatsu, які щодня вводяться на платформу системи узгодження технічного обслуговування шахти.

1) Відповідно до мети охарактеризувати моделі прогнозування відмов та їх застосування в транспортних одиницях майнінгу в рамках широкого спектру алгоритмів, було вибрано алгоритм лінійної регресії як техніку DM для роботи з контрольованим заробітком, а через розширення Python це можливо працювати над моделями прогнозування. Рисунок 2.13 представляє цей опис.

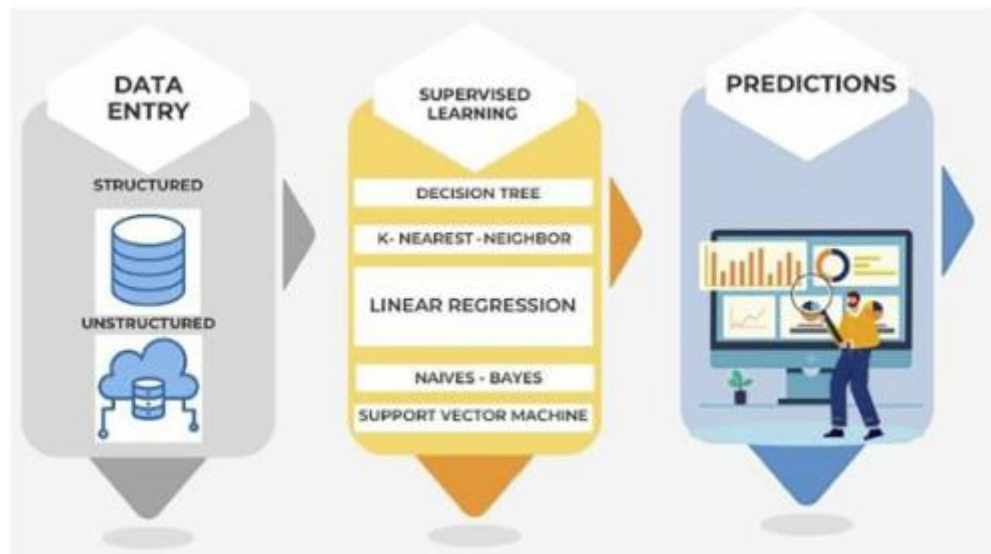


Рисунок 2.13 - Модель навчання під керівництвом

2) Ідентифікація пристроїв, які використовуються в доповненій реальності, і вимоги до передачі даних у реальному часі та підтримка доповненої реальності, запропоновані Team Viewer Pilot, можна використовувати з розумними окулярами Vuzix M400, які сумісні з рішенням віддаленої допомоги.

На рисунку 2.14 зображено роботу розумних окулярів за допомогою програми Vuzix Companion і платформи Team Viewer Pilot для передачі зображення та віддаленої допомоги. Розумні окуляри знімають відео та аудіо з точки зору користувача, передаючи ці дані та будь-яку іншу відповідну інформацію дистанційному помічнику через Інтернет. Дистанційний помічник отримує ці дані та може візуалізувати та прослухати те, що відчуває користувач. Використовуючи цю інформацію, дистанційний помічник надає інструкції, керівництво та допомогу користувачеві. Інструкції та доповнену інформацію можна надсилати назад до розумних окулярів, дозволяючи користувачеві бачити та чути їх. За допомогою цих підказок користувач може виконувати завдання та усувати неполадки за потреби.



Рисунок 2.14 - Схема підключення та віддаленої допомоги за допомогою розумних окулярів

Нарешті, слід зазначити, що для отримання моделі якості для діагностики та ремонту складних несправностей Komatsu 930E-4SE CAEX у гірничодобувній промисловості аналіз даних про несправності, отриманих від JD Edwards ERP, Sisense та Mine система узгодження технічного обслуговування – це дані після Мортена, які використовуються для навчання та налаштування навчальної машини, яка використовується в моделі прогнозування відмов, щоб зосередити зусилля з технічного обслуговування та контролю для створення запобіжних і план коригувального технічного обслуговування, адаптований до галузі.

Вважається, що теоретичні результати, отримані при розробці цього дослідження, є задовільними з точки зору бізнесу, оскільки, в першу чергу, воно виконує конкретні цілі, пов'язані з процесом дистанційної допомоги. Як вони є:

1) Характеристика Komatsu 930E-4SE CAEX, яка була отримана за допомогою інформації, яку можна було отримати з посібників з обслуговування CAEX Komatsu, з інформацією про зупинки та типи

зупинок, отриманими з платформи узгодження технічного обслуговування шахти.

2) Ідентифікація набору дуже складних збоїв, які потребують віддаленої експертної підтримки, отримана шляхом налагодження інформації з платформи Sisense та платформи узгодження технічного обслуговування.

3) Ідентифікація пристроїв, що використовуються в доповненій реальності, була досягнута на основі досвіду, розробленого іншими компаніями на основі використання смарт-окулярів Vuzix як пристрою віддаленої допомоги.

4) Вимоги до передачі даних у реальному часі визначаються в першу чергу наявністю приватної мережі Інтернет всередині шахти, яка може встановити зв'язок між пристроєм розумних окулярів і дистанційним помічником через різні платформи та програми, які існують для цього. мета.

З іншого боку, результати, з точки зору інтелектуального аналізу даних, відповідають теоретичним аспектам створення моделей прогнозування відмов шляхом застосування методології CRISP-DM. Крім того, кожна з цих фаз CRISP-DM виконується шляхом застосування інформації, що міститься в базі даних, і ґрунтується на меті визначення прогнозів несправностей, яка розробляється за допомогою аналізу даних і вибору алгоритму для розробки прогнозу.

Наведена робота дозволяє розробити модель віддаленої допомоги для діагностики та ремонту критичних несправностей у вантажівках Komatsu моделі 930E-4SE, які використовуються для транспортування руди, з використанням доповненої реальності та аналітики даних. Це було розроблено за допомогою аналіз необхідної інформації за допомогою методології CRISP-DM. Завдяки розробці етапів методології CRISP-DM стало можливим охопити від бізнес-розуміння до впровадження. Відповідна частина методології полягає у

створенні моделювання, яке за допомогою введення даних і використання відповідного алгоритму теоретично дозволить створити модель прогнозування несправностей, яка стане фундаментальним внеском у модель дистанційного обслуговування. З точки зору їхнього внеску, можна свідчити про покращення в різних аспектах, пов'язаних зі стовпами сталого розвитку. З економічної точки зору це покращує ефективність роботи, оскільки зв'язок є гнучким і зменшує незаплановані простої. Це мінімізує кількість випадків і несправностей, що перетворюється на меншу кількість втрат через витрати на технічне обслуговування, що становить значну частку від загальної суми, відповідно до того, що зазначено в (Borroto-Penton et al., 2021; Mobley, 2002). З точки зору навколишнього середовища, це дозволяє уникнути забруднення, спричиненого транспортуванням технічного персоналу в зону для проведення діагностики, що безпосередньо сприяє зменшенню викидів. З соціальної точки зору майнінг зміниться і стане безпечнішим, оскільки технологія дозволяє здійснювати видобуток віддалено (Chehri та ін., 2011; Hongjiang та Shuangyou, 2008; Moridi та ін., 2014). Крім того, він пропонує вдосконалення з технічної точки зору, враховуючи процеси навчання та дистанційного навчання.

З огляду на вищезазначене, модель прогнозування невдач може бути пов'язана зі стратегічним плануванням, надаючи цінну інформацію для прийняття рішень і формулювання довгострокових стратегій. Через дані, перетворені в інформацію, можна визначити ймовірнісні тенденції, які слід інтегрувати в динамічну систему планування, яка б постійно створювала оновлені онлайн-плани (Chilena, 2018). Стратегічне планування та належне управління активами відіграють ключову роль у цьому гірничодобувному бізнес-середовищі (Komljenovic та ін., 2015)

Майбутні перспективи цього проекту полягають у можливості реалізації цього дослідження на місці, враховуючи, що розвиток

навчання у віртуальній машині, метою якого є отримання моделей прогнозування відмов з високою надійністю, має бути виконано. Так само, щоб навчити майбутнього клієнта використовувати моделі прогнозування збоїв, згенеровані у віртуальній машині, і застосовувати повну модель віддаленої допомоги. Подібним чином він також може розглянути можливість використання генеративного штучного інтелекту для вимірювання ключових показників ефективності та перевірки продуктивності обладнання в моделі технічного обслуговування (Ван і Чен, 2022). Наприклад, вони можуть бути використані для відстеження кількості відмов з нововведеними контролерами та кількості часу відмов обладнання. Потім ця інформація може бути використана для визначення областей, де модель працює добре, і областей, де вона може покращити свою продуктивність, тим самим покращуючи ваші результати

### **2.3 Дистанційно кероване коротко циклове завантаження сипучих матеріалів у гірничодобувних галузях**

Бездротові IP-мережі високої пропускної здатності з обмеженими затримками сьогодні розгортаються як у підземних, так і відкритих шахтах. Це дозволяє розширене дистанційне керування гірничим обладнанням із покращеним зворотним зв'язком з операторами та широким моніторингом стану машини, зносу та втоми. Однак бездротове з'єднання залежить від погіршення стану каналу, спричиненого перешкодами, завмиранням багатошляхового зв'язку та іншими проблемами радіозв'язку. Таким чином, дистанційне керування та моніторинг повинні мати можливість адаптувати свої швидкості надсилання відповідно до коливань якості зв'язку. У цьому документі представлені ключові проблеми передового дистанційного керування та моніторингу робочих машин через бездротові IP-мережі високої

пропускної здатності в середовищах майнінгу. Ми міркуємо про ці виклики в контексті підземних робіт з коротко цикловим навантаженням, перевезенням і скиданням із великогабаритними колісними навантажувачами та представляємо загальне комунікаційне рішення для концепції допомоги оператору, здатне адаптуватися до різних властивостей зв'язку.

У Швеції компанія Boliden Group розгорнула на своїх підземних і відкритих шахтах бездротові мережі IEEE 802.11ac для зв'язку, а також локалізації в реальному часі як робітників, так і обладнання (Nilsson 2014). Окрім кращої безпеки, ці мережі сприяють ефективному голосовому зв'язку, а також дистанційно керованим і контрольованим обладнанням. У цьому документі представлено ключові проблеми передового дистанційного керування та моніторингу такого обладнання та представлено загальне комунікаційне рішення для промислових робочих машин. Ми міркуємо про ці виклики та комунікаційні рішення в контексті підземних робіт із коротким циклом навантаження, транспортування та відвалу за допомогою великогабаритних колісних навантажувачів у підземних шахтах Боліден.

Мобільні машини з дистанційним керуванням, такі як вантажно-перевантажувальні машини (LHD), використовуються в промислових цілях більше десяти років (Gustafson 2011). Раніше такі машини мали дистанційне керування та були частково автономними через суворі робочі умови в шахтах і для того, щоб уможливити розкопки в той час, коли персонал не може бути присутнім у машині, напр. безпосередньо після вибухових робіт і під час вентиляції. Продуктивність дистанційного керування. Проте LHDs не відповідає бортовій роботі. Одним із конкретних недоліків є нижче середнє корисне навантаження ковшів, що викопуються на відстані (Andersson 2013).

Різниця у фрагментації підірваного матеріалу, який буде видобуто в підземних шахтах із твердих порід, є значно вищою порівняно з

матеріалом гранульованого типу. Таким чином, проблеми з ефективним дистанційним керуванням або автономними розкопками є вищими в підземних шахтах з твердих порід (Філла та ін. 2014 та Маршалл та ін. 2008).

Вважається, що автономне завантаження сипучих матеріалів потребує подальшої роботи та досліджень (Хемамі та Хассані 2009). Ми вважаємо, що функції допомоги оператору для дистанційного керування за допомогою кваліфікованих операторів є більш життєздатним підходом, ніж повністю автономне завантаження в коротко- та середньостроковій перспективі, а також важливим кроком для накопичення досвіду для вдосконалення повністю автономного завантаження для підвищення продуктивності.

Недоліки LHD з дистанційним керуванням також актуальні для колісних навантажувачів, що випускаються великими серіями, таких як будівельні машини, які в багатьох випадках повинні виконувати роботу, подібну до роботи, що і при видобутку руди в шахтах. У деяких випадках такі колісні навантажувачі навіть використовуються для підземного видобутку руди, коли спеціалізовані машини уникають через такі причини, як велика потреба в мобільності та гнучкості маневрування.

Ефективна віддалена робота залежить від надійного та передбачуваного бездротового зв'язку. Дистанційний моніторинг також важливий для того, щоб гарантувати належне відстеження проблем з машиною, хоча персонал не працює на машинах. Тоді важливо підкреслити, що системи дистанційного керування та моніторингу можуть адаптувати свої швидкості надсилання та впоратися з тимчасовим зменшенням пропускної здатності зв'язку або навіть повною втратою зв'язку, а також змінами затримок.

Відповідні віддалені станції оператора з підтримкою для тестування під час розробки та навчання операторів є важливими з

міркувань ефективності та запобігання пошкодженню машини через неправильне використання. Така станція повинна підтримувати оцінювання та навчання, пов'язане з адаптивною допомогою оператора, яка повинна бути розроблена для інтуїтивного використання, щоб уникнути помилок оператора.

Загальна проблема під час експлуатації робочих машин з дистанційним керуванням полягає в тому, як виконувати роботу безпечно та ефективно використовувати паливо з високою продуктивністю, не викликаючи непотрібного зносу та втоми машини. Це пов'язано з тим, що віддалений оператор зазвичай не має зворотного зв'язку за рухом і для керування машиною покладається переважно на відео, що призводить до інформаційної прогалини порівняно з бортовим оператором у кабіні машини. Отже, віддалений оператор повинен базувати керування машиною на інформації з меншим вмістом і нижчою якістю.

Проектування системи, що охоплює колісний навантажувач, оператора та застосування, має великий вплив на енергоефективність і продуктивність (Frank et al. 2012). Це пов'язано зі складним характером роботи будівельного обладнання та взаємодії між машиною та оператором. Тести показують різницю в продуктивності між операторами в кілька сотень відсотків. Ці відмінності в основному залежать від здатності оператора планувати операції. Робочий цикл загиблого оператора зазвичай виконується гладко з мінімальними (непотрібними) рухами машини. Кваліфіковані оператори також гарантують, що наповнення ковша здійснюється з енергоефективністю при досягненні великих навантажень на ковш.

Щоб звести до мінімуму проблеми, пов'язані з низькою ефективністю палива та поганою продуктивністю системи, можливе кілька підходів. Одним із них є навчання операторів, яке, як показує загальний досвід навчання операторів, є ефективним засобом

підвищення ефективності палива та продуктивності. Іншим підходом є бортові системи, які вимірюють та інформують оператора про продуктивність у циклі та навіть пропонують коригувальні дії.

Вплив оператора на продуктивність системи дуже важливий при дистанційному керуванні операціями. Необхідно подолати проблеми з продуктивністю системи, наприклад, затримки в контролі та зворотному зв'язку, особливо в місцях, де бездротове з'єднання є ненадійним. Дистанційна робота за таких обставин додатково спонукає до цілеспрямованого навчання операторів, що включає вправу з дистанційно керованими машинами через моделювання або поєднання обох. У зв'язку з тим, що дистанційні операції ускладнюють операції, вищі вимоги будуть висуватись і до зворотного зв'язку з оператором, а також до функцій допомоги та вказівок.

Отже, важливою проблемою, пов'язаною з безпечною та енергоефективною роботою з одночасним уникненням неправильного використання, є те, як вибрати найкращу комбінацію різних зворотних зв'язків. Візуальний, звуковий, тактильний і, можливо, руховий зворотний зв'язок слід поєднувати, щоб максимально використати можливості дистанційного оператора. Крім того, необхідно визначити найкращу комбінацію децентралізованих контурів керування, які замикаються локально на машині, і циклів, які замикає віддалений оператор. Наприклад, локальні контури керування можуть допомогти досягти великих навантажень на ковш за низьких витрат енергії. З іншого боку, вибір місця підходу до купи матеріалу, який потрібно завантажити, може включати цикл керування, замкнений віддаленим оператором, який приймає рішення на основі відео зворотного зв'язку.

Двома проблемами при автономному підземному завантаженні фрагментованої породи за допомогою оператора порівняно з досвідченим ручним машиністом є (1) отримання високої середньої ваги ковша за низького середнього часу циклу та (2) уникнення

зіткнень зі стінками у вузьких тунелях і робочими машинами поблизу (наприклад, вантажівки).

У випадку з підірваною породою розподіл матеріалу за розміром сильно змінюється, що означає, що оптимальна стратегія керування для функції автоматичного завантаження може відрізнятись від одного ковша до іншого. На рисунку 2.15 (ліворуч) зображено купу вибухового каміння різного розміру та табакерку діаметром 7,5 см. Відповідно до досвіду Болідена, розмір каменю може коливатися від кількох мм до майже 50 см.



Рисунок 2.15 Підірвана порода та точка витягування в шахті з вирізом і заповненням

Розвантаження ковша на вантажівку у разі короткого циклу завантаження є складним у кількох аспектах. Наприклад, вантажівка може перебувати в різних положеннях від одного ковша до іншого,

вантажівку може знадобитися перемістити під час розвантаження, а висота тунелів може накласти обмеження на маневрування ковшем.

## **РОЗДІЛ 3 МОДЕЛЮВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ З ДИСТАНЦІЙНИМ КЕРУВАННЯМ В УМОВАХ КАР'ЄРІВ ПРАТ «ЦГЗК»**

### **3.1 Проблеми і тенденції у застосуванні роботизованого обладнання у відкритих гірничих роботах**

Приблизно з 2000 - 2005 років. у світовій практиці стали виходити на стадію промислового застосування технології дистанційного та роботизованого управління гірничотранспортним обладнанням. Початок подібних проектів присвячений дев'яностим рокам, коли велися дослідження та випускалися досвідчені зразки. Насамперед впровадження новітніх технологій у сферу підземних гірничих робіт відбувається через їхню підвищену небезпеку порівняно з відкритими кар'єрними розробками. На сьогоднішній день накопичено значний досвід у створенні та експлуатації гірничотранспортних комплексів, оснащених частково роботизованим управлінням. В таких комплексах складні операції, що потребують високого рівня точності та контролю, виконуються оператором у ручному режимі з віддаленого пункту управління, тоді як рутинні, менш складні операції — наприклад, рух самоскида по заздалегідь заданій траєкторії до місця розвантаження — виконуються автоматично.

Безумовно, цей підхід має вагоме значення для підвищення ефективності та безпеки гірничих робіт. Чимало гірничодобувних підприємств, що займаються як відкритими, так і підземними розробками, активно працюють над впровадженням роботизованого гірничого обладнання. У зв'язку з цим, провідні світові виробники шахтної та кар'єрної техніки постійно пропонують на ринку як вже готові рішення, так і новітні розробки, спрямовані на інтеграцію роботизованих систем управління у сферу гірничих розробок.

Першим підприємством, яке впроваджує систему віддаленого управління гірничим устаткуванням на кар'єрі, є одне з гірничодобувних підприємств. Для доопрацювання кар'єру в нижній небезпечній зоні зі збільшеними кутами укосу бортів застосовується комплекс із 4 шарнірно-зчленованих самоскидів (ШСС) та одного навантажувача фірми Caterpillar, які керуються дистанційно. Основною метою цього рішення є забезпечення безпеки операторів. Пункт дистанційного керування (ПДК) розташовується в безпечній зоні кар'єру, а рух обладнання в небезпечну зону та робота в вибої здійснюються лише в режимі дистанційного керування з ПДК або за допомогою мобільного ручного пульта. У майбутньому планується автоматизація бурового верстата. Розробку системи дистанційного керування здійснювала компанія Remote Control Technologies.

На сучасному етапі розвитку гірничодобувної промисловості та в перспективі найближчих років спостерігатиметься інтенсифікація процесу впровадження автоматизованих і роботизованих систем управління гірничим обладнанням. Особливу увагу буде приділено розширенню номенклатури механізмів та комплексів, оснащених засобами дистанційного керування, що дозволить підвищити безпеку праці та ефективність видобувних процесів. У цьому контексті актуальним є уточнення термінологічного апарату, пов'язаного з питаннями автоматизованого управління у гірничій галузі.

Загалом, технологічні рішення, які передбачають дистанційне або роботизоване керування без безпосередньої присутності оператора на виробничому об'єкті (експлуатаційній одиниці, гірничій машині або видобувному комплексі), можуть бути узагальнено класифіковані як системи віддаленого керування.

У цьому контексті можна сформулювати таке узагальнене визначення: безлюдні технології видобутку корисних копалин – це комплексні технологічні процеси, що забезпечують проведення

розкривних, підготовчих і видобувних робіт без необхідності присутності робітників у зоні безпосереднього ведення гірничих операцій. Такі технології сприяють підвищенню рівня безпеки виробничих процесів, мінімізації впливу людського фактора на технологічні цикли та оптимізації економічних показників гірничого підприємства.

Необхідно чітко розмежовувати поняття «безлюдних технологій» та застосування «систем віддаленого керування» у процесах видобутку корисних копалин. Зокрема, інтеграція роботизованих механізмів і автоматизованих комплексів не завжди означає перехід до повністю безлюдної технології гірничого виробництва.

Наприклад, упровадження окремих автономних або дистанційно керованих гірничих машин може відбуватися без повного усунення людського фактора. Це має місце у випадках, коли автоматизовано лише окремі ланки виробничого циклу – наприклад, роботизовано лише 1–2 типи технологічного обладнання, тоді як інші стадії процесу все ще передбачають значну участь операторів або робітників безпосередньо в зоні ведення гірничих робіт.

Таким чином, критерієм віднесення технологічного процесу до безлюдних технологій є не лише наявність автономного або дистанційно керованого обладнання, а й рівень виключення людини з технологічного ланцюга у безпосередній зоні видобутку. Повністю безлюдна технологія передбачає комплексну автоматизацію всіх ключових етапів – від розкривних і буропідривних робіт до транспортування і переробки корисних копалин – що дозволяє усунути ризики, пов'язані з перебуванням персоналу в небезпечних умовах гірничих виробок.

Аналіз науково-технічної літератури та узагальнення варіантів управління гірничими машинами дозволяють виділити кілька рівнів віддаленого керування залежно від ступеня автоматизації. Основним

класифікаційним критерієм у цьому випадку виступає ступінь залученості людини (оператора) в процес управління. Відповідно, можна виокремити такі типи:

1. Дистанційне керування (*remote control*). Ця система передбачає управління гірничими машинами за допомогою дистанційного терміналу, що дублює функції традиційного керування з кабіни оператора. Основна мета впровадження таких систем – забезпечення безпеки працівника шляхом його переміщення за межі небезпечної зони, уникаючи впливу шкідливих факторів, таких як запиленість, вібрація, високий рівень шуму та можливі геомеханічні ризики.

2. Напівавтономне (комбіноване) керування (*semi-autonomous system*). Передбачає поділ функцій між оператором і автоматизованою системою. Оператор виконує складні маневри або операції, що потребують аналізу ситуації та творчого підходу (наприклад, вибір оптимальної траєкторії руху в умовах нерівномірного гірничого масиву або здійснення маніпуляцій з навантаженням), тоді як рутинні технологічні дії (рух за запрограмованою траєкторією, розвантаження, коригування положення механізмів) виконуються в автоматичному режимі без безпосереднього втручання людини.

3. Автономне (роботизоване) керування (*autonomous system*). Відзначається повною передачею функцій керування програмно-апаратному комплексу, інтегрованому в конструкцію гірничої машини або механізму. Такі системи функціонують на основі алгоритмів штучного інтелекту, систем машинного зору та автономної навігації, що дозволяє їм виконувати всі етапи технологічного процесу без участі оператора. Це дає змогу застосовувати таку техніку в безлюдних гірничих технологіях, мінімізуючи виробничі ризики та підвищуючи продуктивність гірничодобувних робіт.

Таким чином, перехід від дистанційного до автономного керування є еволюційним процесом, що передбачає поступову інтеграцію інтелектуальних систем управління, підвищення рівня автоматизації та оптимізацію всіх виробничих операцій у гірничодобувній промисловості.

Таблиця 3.1 - Переваги та недоліки систем дистанційного та роботизованого управління гірничотранспортними машинами

Вид віддаленого керування	Переваги	Недоліки
Загальні переваги і недоліки	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Безпечні умови праці операторів.</li> <li>2. Можливість роботи машин у небезпечних умовах за оптимізованих параметрів кар'єру</li> </ol>	Додаткові витрати на придбання та обслуговування системи дистанційного керування
Додатково для дистанційного керування	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Можливість операторам узгоджувати дії, перебуваючи в одному приміщенні.</li> <li>2. Можливість роботи на віддаленні кількох кілометрів, створення єдиного центру управління для групи близьких кар'єрів</li> </ol>	Можливе зниження продуктивності машин
Додатково для роботизованого керування	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Підвищення продуктивності машин.</li> <li>2. Збільшення міжремонтного пробігу машин.</li> <li>3. Оператори перебувають у безпечних та комфортних умовах праці.</li> <li>4. Можливість роботи машин у небезпечних умовах за оптимізованих параметрів кар'єру.</li> <li>5. Знижуються експлуатаційні витрати з допомогою оптимального управління.</li> <li>6. Можливість створення єдиного центру управління кількома ГЗК безпосередньо в розвинених містах на віддаленні в тисячі км від підприємств з мінімальною кількістю персоналу на кар'єрах</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Збільшений термін введення машин у експлуатацію.</li> <li>2. З'являється новий вид персоналу – висококваліфіковані оператори ЕОМ</li> </ol>

Слід відзначити, що впровадження роботизованих систем управління гірничотранспортним обладнанням супроводжується певними технологічними та експлуатаційними обмеженнями, що можуть впливати на загальну ефективність виробничих процесів.

Основними факторами, що обмежують повну автоматизацію, є:

1. Технологічні обмеження автоматизованих систем  
Сучасні роботизовані комплекси мають високий рівень адаптивності, проте повна автоматизація складних технологічних процесів, таких як селективний видобуток, робота в умовах змінної геомеханічної ситуації або необхідність прийняття рішень у нестандартних аварійних випадках, залишається викликом. Для кар'єрів та рудників із складними гірничо-геологічними умовами, де значну частку операцій займають процеси, що потребують гнучкого та творчого підходу, необхідність залучення операторів і технічного персоналу зростає.

2. Необхідність технічного обслуговування та ремонтних робіт  
Незважаючи на автономність функціонування, роботизоване гірниче обладнання потребує регулярного технічного обслуговування, діагностики та ремонту, що вимагає наявності ремонтного персоналу безпосередньо на гірничодобувному підприємстві. Це стосується як механічних вузлів, так і електронних систем навігації, контролю та управління.

Причини розвитку безлюдних технологій видобутку корисних копалин

Інтенсифікація розробки безлюдних технологій у гірничій промисловості зумовлена низкою технічних, економічних і соціальних факторів, серед яких:

1. Дефіцит кваліфікованої робочої сили  
Одним із ключових стимулів до автоматизації є нестача висококваліфікованих спеціалістів у галузі гірничих розробок, особливо у важкодоступних регіонах. Впровадження дистанційного керування та автономних машин зменшує потребу в залученні великої кількості

персоналу та дозволяє скоротити витрати на будівництво житлових містечок і соціальної інфраструктури для працівників у віддалених районах видобутку.

## 2. Підвищення безпеки праці

Мінімізація перебування працівників у зонах підвищеного ризику є одним із головних завдань безлюдних технологій. Використання автономного обладнання дозволяє:

- усунути людський фактор із небезпечних операцій (робота в зонах можливих обвалень, загазованості, високих температур тощо);
- експлуатувати техніку у виробках зі збільшеними параметрами (висота уступів, крутизна бортів кар'єру), які неможливі при традиційних методах ведення гірничих робіт через вимоги безпеки для персоналу.

## 3. Оптимізація виробничих процесів і підвищення продуктивності

Автоматизовані системи керування забезпечують точність виконання операцій та оптимальне використання ресурсів, що позитивно впливає на ефективність роботи гірничодобувних підприємств. Зокрема:

- роботизоване обладнання функціонує за оптимальними траєкторіями руху, що зменшує втрати корисних копалин і скорочує енергетичні витрати;
- відсутність необхідності у відпочинку та змінах робочого персоналу дозволяє здійснювати безперервний виробничий процес.

## 4. Зниження операційних витрат

Автоматизація гірничих процесів сприяє зменшенню витрат за рахунок:

- скорочення чисельності персоналу та відповідних соціальних витрат;
- зниження простоїв обладнання завдяки автоматичному моніторингу технічного стану та прогнозуванню ремонтних робіт;
- оптимального використання пального, матеріалів та зменшення зношення машин за рахунок точного алгоритмічного управління.

Використання безлюдних технологій у гірничодобувній промисловості сприяє підвищенню рівня безпеки праці, оптимізації виробничих процесів та економії ресурсів. Проте їх широкомасштабне впровадження потребує подолання технологічних обмежень та створення ефективної системи технічного обслуговування, що є ключовим викликом на сучасному етапі розвитку гірничої інженерії.

Окрім підвищення рівня безпеки операторів гірничотранспортних машин та покращення умов їхньої праці, безлюдні технології надають широкий спектр технологічних переваг, зумовлених збільшенням продуктивності праці, зниженням енергоємності та ресурсомісткості виробництва. Це досягається шляхом оптимізації алгоритмів комп'ютерного управління та усунення негативного впливу людського фактора на експлуатаційні характеристики техніки.

Для всебічного аналізу ефективності впровадження безлюдних технологій необхідно здійснювати кількісне оцінювання їхнього впливу на ключові показники роботи гірничого транспорту. Порівняльний аналіз із результатами, наведеними в науково-технічній літературі, дозволяє визначити очікувані темпи зростання продуктивності та економії ресурсів.

Основні фактори підвищення продуктивності включають:

- Збільшення швидкості переміщення кар'єрного транспорту  
Впровадження автономного управління дозволяє оптимізувати маршрути руху, що сприяє скороченню простоїв та підвищенню середньої швидкості транспортування корисних копалин.

- Скорочення непродуктивних простоїв  
Виключення потреби у зміні екіпажу, відпочинку персоналу та врахуванні фізіологічних обмежень операторів забезпечує безперервний виробничий процес, що позитивно позначається на коефіцієнті використання часу роботи обладнання.

Одним із ключових резервів підвищення продуктивності при застосуванні безлюдних технологій є збільшення швидкості переміщення самохідної гірничотранспортної техніки по транспортних магістралях кар'єру. Це можливо завдяки таким факторам:

1. Оптимізація алгоритмів управління та виключення людського фактора

- Комп'ютеризовані системи управління забезпечують точне дотримання оптимальних траєкторій руху, що мінімізує втрати часу на маневрування та знижує ризики аварійних ситуацій.

- Виключення впливу людського фактора усуває затримки у прийнятті рішень, що часто спостерігаються у ручному керуванні через інерційність реакції оператора.

2. Зняття обмежень щодо безпечної швидкості руху

- При традиційній експлуатації техніки швидкісні параметри кар'єрних самоскидів та інших транспортних засобів часто обмежуються вимогами безпеки, пов'язаними з наявністю оператора всередині кабіни.

- У випадку автономного керування ці обмеження можуть бути переглянуті, оскільки відсутність оператора усуває ризик травмування під час аварійної ситуації. Це дозволяє підвищити граничні швидкісні характеристики техніки на безпечних ділянках маршруту.

Впровадження безлюдних технологій у гірничодобувній галузі дозволяє суттєво підвищити продуктивність роботи гірничотранспортних комплексів, скоротити простої та забезпечити оптимальні параметри експлуатації техніки. Завдяки автоматизації та усуненню людського фактора можна збільшити середню швидкість руху кар'єрного транспорту, що сприяє зниженню загальних витрат на транспортування корисних копалин.

Такий підхід відкриває нові можливості для підвищення ефективності гірничих робіт та створення безпечних умов експлуатації обладнання, що є ключовими завданнями сучасної гірничої інженерії.

Оптимізація параметрів функціонування гірничотранспортних систем при переході на роботизоване управління дозволяє суттєво підвищити продуктивність перевезення корисних копалин. Основними факторами, що визначають резерви зростання ефективності транспортування, є такі параметри:

1. Досягнута на підприємстві швидкість руху кар'єрних самоскидів на горизонтальних ділянках при ручному керуванні

- У традиційних умовах експлуатації швидкість руху кар'єрного автотранспорту обмежується людським фактором, а саме рівнем кваліфікації водіїв, їх фізіологічними особливостями та необхідністю дотримання заходів безпеки.

- Перехід на автономні або напівавтономні системи керування дозволяє усунути випадкові відхилення у швидкісному режимі, що сприяє стабілізації транспортного циклу та зменшенню нерівномірності навантаження на логістичну систему кар'єру.

2. Дальність транспортування по конкретній трасі

- Чим більша відстань перевезення корисних копалин, тим значніше впровадження автономного керування впливає на продуктивність транспорту.

- Оптимізація маршруту руху та підтримання стабільної високої швидкості дозволяє зменшити загальний час транспортного циклу та збільшити коефіцієнт використання автотранспорту.

3. Тривалість вантажно-розвантажувальних операцій та їх частка у загальному часі рейсу

- Вантажно-розвантажувальні роботи залишаються консервативним фактором, що не змінюється під час впровадження роботизованого управління.

- Проте автоматизовані системи дозволяють точніше координувати прибуття техніки на місце завантаження/розвантаження, що мінімізує простой та забезпечує безперервний логістичний потік.

4. Частка ділянок із значним ухилом (понад 6 %) у загальній протяжності траси

- При ручному керуванні водії змушені зменшувати швидкість на крутих спусках і підйомах через ризик перевищення безпечних гальмівних характеристик або нестабільність тягового режиму.

- Роботизовані системи керування здатні динамічно регулювати режими роботи силового агрегату та гальмівних систем, що дозволяє підтримувати стабільну швидкість руху навіть на ділянках із підвищеним ухилом.

### **3.2 Оцінка ефективності впровадження транспортних технологій в умовах ПРАТ «ЦГЗК»**

Швидкість руху на похилих з'їздах і підйомах суттєво впливає на продуктивність транспорту. При середньому ухилі 8% та питомій потужності сучасних кар'єрних автосамоскидів 5 кВт/т, швидкість на підйомі становить близько 15 км/год.

Автоматизовані системи керування забезпечують:

- Оптимізацію швидкісного режиму на всіх ділянках траси.
- Ефективне використання потужності та динамічне регулювання тягових характеристик.
- Зменшення витрат енергії завдяки точному дозуванню навантаження.

Таким чином, роботизоване керування дозволяє стабілізувати швидкість руху, зменшити циклічність перевезень та підвищити загальну ефективність гірничого транспорту.

$$\Delta\Pi = \frac{(\Delta v - 1) \cdot (2 - \Delta_{\text{уч}})}{\frac{\Delta v \cdot v_1 \cdot t_{\text{п+р}}}{L} + \frac{\Delta_{\text{уч}} \cdot \Delta v \cdot v_1}{15} + 2 - \Delta_{\text{уч}}}, \%, \quad (3.1)$$

$\Delta v$  - кратність збільшення швидкості при застосуванні роботизованого керування;

$v_1$  - швидкість автосамоскида при керуванні водієм з кабіни, км/год;

$L$  - дальність транспортування, км;

$\Delta_{\text{уч}}$  - частка похилих ділянок у протяжності траси;

$t_{\text{п+р}}$  - тривалість вантажно-розвантажувальних операцій за рейс, год.

Аналіз рисунка 3.1 а) демонструє, що для суттєвого підвищення годинної продуктивності необхідне значне збільшення швидкості руху кар'єрного транспорту. Зокрема, при зростанні швидкості у 1,5 рази (з 30 до 45 км/год) продуктивність підвищується лише на 14% при дальності транспортування 4 км.

Як видно з рисунка 3.1 б), зі збільшенням транспортної відстані ефективність впровадження роботизованих систем керування зростає. Це пояснюється зменшенням частки часу, що витрачається на вантажно-розвантажувальні операції, у загальній тривалості рейсу. Аналогічний ефект спостерігається при скороченні тривалості самих вантажно-розвантажувальних процесів, що додатково підвищує продуктивність кар'єрного транспорту.

Таким чином, очікуваний приріст продуктивності за рахунок збільшення швидкості руху кар'єрного транспорту знаходитиметься в межах 10–15% на трасах довжиною понад 2 км з відносно прямолінійною конфігурацією та часткою похилих ділянок понад 0,75%.

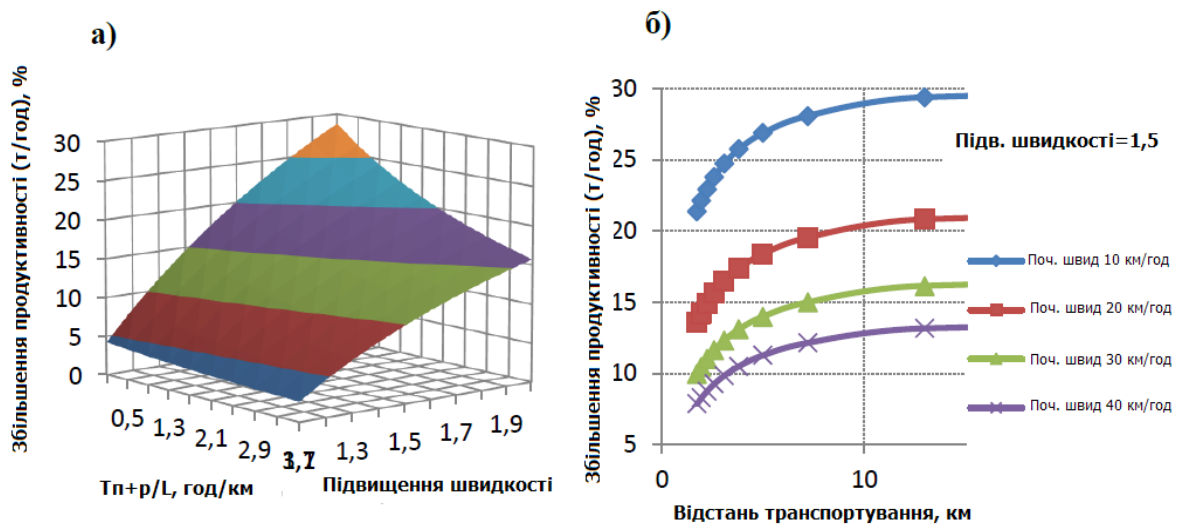


Рисунок 3.1 – Підвищення годинної продуктивності автосамоскида залежно від основних факторів:

а) тривалості вантажно-розвантажувальних операцій щодо дальності транспортування та досяжного підвищення швидкості при переході на роботизоване керування (швидкість автосамоскида при ручному керуванні 30 км/год, частка похилих ділянок у довжині траси становить 0,75‰); б) відстані транспортування за різної швидкості ручного управління (за умови, що підвищення швидкості при переході на роботизоване керування становить 1,5 раза)

У найсприятливіших умовах, зокрема на трасах з незначним перепадом висот та часткою похилих ділянок менше 0,3, перехід на роботизоване керування із підвищенням максимальної швидкості з 30 до 50 км/год може забезпечити зростання продуктивності до 35–40%.

Застосування роботизованих комплексів, що функціонують у автоматичному режимі, дозволяє усунути зупинки обладнання під час перезмінки операторів. Це, у свою чергу, сприяє збільшенню добового видобутку, що підтверджується даними на рисунку 3.2.

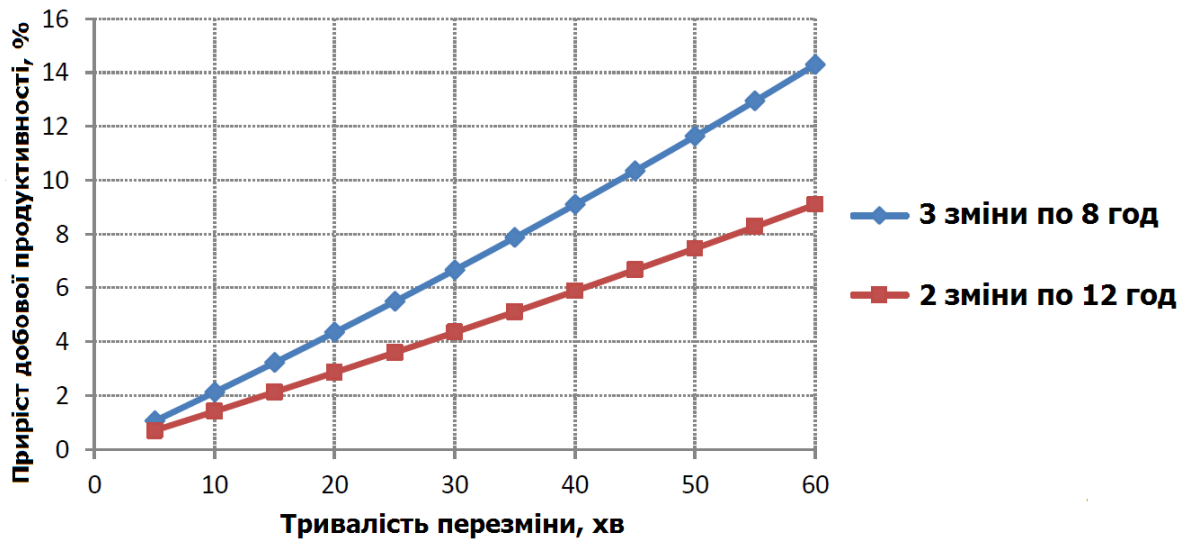


Рисунок 3.2 - залежність приросту добового обсягу перевезень кар'єрного автосамоскида від тривалості перезмінки, яка усувається при впровадженні роботизованих транспортних комплексів. Скорочення простоїв дозволяє підвищити ефективність використання техніки, що сприяє зростанню загального обсягу перевезень упродовж доби.

Таблиця 3.2 містить зведений аналіз можливих переваг впровадження роботизованого керування у гірничотранспортних комплексах. Оцінюються ключові фактори, що впливають на підвищення продуктивності, ефективність використання обладнання та зниження експлуатаційних витрат.

Аналіз тенденцій розвитку дистанційного та роботизованого управління, сучасних проєктів розробки кар'єрів і перспектив впровадження безлюдних технологій видобутку корисних копалин дає змогу визначити основні технологічні вимоги до транспортних систем кар'єрів, що експлуатуються з використанням автомобільних з'їздів.

Таблиця 3.2 - Переваги впровадження роботизованого керування

Чинник	Переваги при роботизованим керуванням	Залежний показник	Досяжне підвищення показника («+» - підвищення, «-» - зниження)	
			Розрахунки	Дані літератури
Перезмінка	Виключається	Вироблення за добу	3 зм. х 8 год: + 4-9%  2 зм. х 12 год: + 3-6%	+ 5-20%
Швидкість руху	Збільшується за рахунок:  - Оптимального управління;  - виключення людини з небезпечних умов	Продуктивність (т/год)  Вироблення за добу	+ 10-15%  + 10-15%	- 7%  (тривалість рейсу)
Трудомісткість ТОiP	Знижується	Витрати на ТОiP	Немає достовірного підтвердження	- 14%  (Витрати)
Кількість персоналу	Знижується кількість операторів, але додатково потрібні наладчики АСУ	Витрати на оплату праці	За високого ступеня автоматизації всіх процесів можливе зниження	- 5%.  один оператор на 4 – 10 машин

Для роботизованих транспортних систем із високим рівнем автономності, особливо у масштабних гірничодобувних комплексах, традиційне диспетчерське управління, що здійснюється операторами, може обмежувати ефективність використання роботизованої техніки. У зв'язку з цим доцільним є впровадження автоматизованих систем оптимізації маршрутів та розподілу транспортних засобів у кар'єрі.

Оптимізація повинна здійснюватися в режимі реального часу, що дозволить підвищити ефективність логістики транспорту. Основою такої системи адаптивного управління може стати програмний

комплекс, який за допомогою імітаційного моделювання прогнозує розвиток виробничої ситуації та визначає найбільш раціональний варіант відповідно до обраного критерію або їх сукупності, таких як максимальна продуктивність, мінімальні експлуатаційні витрати або скорочення кількості задіяної техніки.

Окреслені тенденції розвитку транспортних систем кар'єрів із застосуванням роботизованих машин свідчать про суттєві технологічні зміни у сфері гірничих розробок:

1. У сучасних умовах активно розвиваються технології віддаленого управління гірничодобувними машинами, що охоплюють як відкриті, так і підземні гірничі роботи. Це зумовлено зростаючими потребами гірничодобувних підприємств та вдосконаленням технічних можливостей. Виділяються основні типи дистанційного управління: дистанційне, роботизоване (напів автономне та автономне).

2. На світовому рівні впроваджено та розробляється понад 10 проєктів автоматизації гірничотранспортних комплексів, більшість із яких реалізується за межами країн пострадянського простору. Водночас у деяких країнах здійснюються експериментальні впровадження дистанційного та роботизованого управління, включно з екскаваторно-автомобільними комплексами.

3. Особливості розвитку технологій дистанційного управління включають:

- поетапне впровадження систем із поступовим переходом до повністю автономного режиму;

- готовність провідних виробників гірничого обладнання запропонувати комплексні автоматизовані рішення для гірничотранспортних систем;

- прогнозоване зниження вартості систем дистанційного управління у процесі їх подальшого розвитку.

4. Основними причинами активного впровадження технологій віддаленого управління є:

- оптимізація потреби у робочій силі та скорочення чисельності персоналу;
- підвищення рівня безпеки завдяки усуненню впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів;
- збільшення продуктивності обладнання шляхом автоматизації технологічних операцій;
- зниження витрат, пов'язаних із видобутком корисних копалин.

5. Усунення людського фактора у процесі управління технікою сприятиме:

- підвищенню ефективності експлуатації машин;
- оптимізації режимів навантаження, зниженню витрат експлуатаційних ресурсів (паливно-мастильних матеріалів, шин, запасних частин) та збільшенню строку служби обладнання.

6. Подальше вдосконалення систем роботизованого управління та створення повністю автоматизованих гірничодобувних комплексів сприятиме розвитку концепції «безлюдних» технологій видобутку. Це, ймовірно, призведе до трансформації параметрів і методів ведення гірничих робіт, оскільки відсутність персоналу у небезпечних зонах дозволить змінити проєктні характеристики кар'єрів, зокрема збільшити ухили транспортних комунікацій і швидкість пересування техніки.

7. Адаптація гірничого обладнання до нових умов експлуатації передбачає розробку машин без кабінного компонування, здатних здійснювати човниковий безрозворотний рух по крутонахильних транспортних з'їздах.

8. Впровадження дистанційно керованих машин вимагатиме коригування нормативно-технічної бази гірничих розробок. Подальший розвиток «безлюдних» технологій зумовить потребу у вдосконаленні правових норм, спрямованих не лише на регулювання роботи

автономного обладнання, а й на мінімізацію його впливу на навколишнє середовище та населення.

## ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Обмеження традиційного диспетчерського управління: Застосування роботизованих транспортних систем з високим ступенем автономності у масштабних гірничодобувних комплексах часто стримується традиційними методами диспетчерського контролю, що виконуються оператором. Це свідчить про необхідність впровадження автоматизованих систем для оптимізації маршрутів і розподілу транспортних засобів безпосередньо в кар'єрі.

2. Необхідність режиму реального часу в оптимізації логістики: Сучасні умови вимагають, щоб процес оптимізації логістичних операцій відбувався в режимі реального часу. Базовим елементом такої адаптивної системи управління є програмний комплекс, який через імітаційне моделювання дозволяє прогнозувати виробничу ситуацію та обирати найбільш ефективний варіант за сукупністю критеріїв – від максимізації продуктивності до мінімізації експлуатаційних витрат та оптимізації залучення техніки.

3. Технологічна еволюція систем управління в гірничій галузі: Проведений аналіз тенденцій розвитку транспортних систем кар'єрів із застосуванням роботизованої техніки вказує на суттєві зміни в технологічному забезпеченні гірничих розробок, що проявляються у наступних напрямках:

– Віддалене управління та його класифікація: Сучасні технології спрямовані на впровадження систем віддаленого контролю, які охоплюють як відкриті, так і підземні гірничі роботи. Зростаючі потреби підприємств та розвиток технічних можливостей стимулюють розвиток трьох основних типів – дистанційного, роботизованого.

– Глобальні проекти автоматизації:

На міжнародному рівні реалізовано та розробляється більше 10 проєктів автоматизації гірничотранспортних комплексів, при цьому більшість з них впроваджується за межами пострадянського простору. У деяких країнах також проводяться експериментальні впровадження систем дистанційного та роботизованого управління, зокрема в екскаваторно-автомобільних комплексах.

– Особливості етапності та економічної ефективності:

Розвиток технологій дистанційного управління характеризується поетапним впровадженням із поступовим переходом до повної автономії, активною пропозицією комплексних автоматизованих рішень від провідних виробників та прогнозованим зниженням вартості таких систем у міру їх подальшого вдосконалення.

– Основні мотиватори впровадження технологій:

До ключових причин активного застосування технологій віддаленого управління належать оптимізація чисельності персоналу, підвищення безпеки шляхом виключення небезпечних виробничих факторів, зростання продуктивності завдяки автоматизації технологічних процесів, а також зниження витрат, пов'язаних із видобутком корисних копалин.

– Вплив усунення людського фактора:

Виключення людського фактору з процесу управління технікою сприяє підвищенню ефективності її експлуатації, оптимізації навантаження, зменшенню витрат експлуатаційних ресурсів та продовженню терміну служби обладнання.

– Перспективи розвитку «безлюдних» технологій:

Подальше вдосконалення роботизованих систем управління та створення повністю автоматизованих гірничодобувних комплексів стимулюватиме розвиток концепції «безлюдних» технологій, що, у свою чергу, може змінити параметри та методи ведення гірничих робіт,

дозволяючи переосмислити проектні характеристики кар'єрів (зокрема, збільшити ухили транспортних комунікацій і підвищити швидкість руху техніки).

4. Адаптація обладнання до нових умов експлуатації: В умовах модернізації гірничих технологій виникає необхідність розробки спеціалізованих машин без кабінного компонування, здатних здійснювати човниковий, безрозворотний рух по крутонахильних транспортних з'їздах, що відповідає новим вимогам до експлуатації в сучасних кар'єрах.

5. Вдосконалення нормативно-технічної та правової бази: Впровадження дистанційно керованих машин змушує переглянути чинні нормативи і технічні стандарти в галузі гірничих розробок. Подальший розвиток «безлюдних» технологій потребуватиме адаптації правових норм, що не лише регулюватимуть роботу автономного обладнання, а й мінімізуватимуть його вплив на навколишнє середовище та населення.

6. В умовах глибоких залізородних кар'єрів ПРАТ «ЦГЗК» впровадження роботизованого автомобільного транспорту дасть змогу забезпечити зростання продуктивності до 35–40%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dorin I., Diaconescu C., Topor D. The Role of Mining in National Economies // International Journal of Academic Research in Accounting, Finance and Management Sciences. – 2014. – Vol. 4, No. 3. – С. 155–160.
2. Statista. Top 40 Global Mining Companies Revenue 2022 [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://www.statista.com/topics/1143/mining/> (дата звернення: 13.02.2025).
3. Wagner J. Challenges of Deep Mining and Safety Risks // Mining Industry Review. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – С. 45–52.
4. Irarrázabal P. Environmental Impacts of Mining Operations // Journal of Environmental Management. – 2006. – Vol. 80, No. 2. – С. 123–130.
5. Delevingne B. et al. Indirect Greenhouse Gas Emissions in Mining: A McKinsey Report. – New York: McKinsey & Company, 2020. – 20 с.
6. Carvalho M. Energy Consumption and Material Use in the Mining Sector // Energy Policy Journal. – 2017. – Vol. 45, No. 4. – С. 678–685.
7. Liu X. et al. Greenhouse Gas Emissions from Fossil Fuel Combustion in Mining Operations // International Journal of Mining Science. – 2021. – Vol. 15, No. 3. – С. 210–218.
8. Ritchie H. et al. Global Carbon Emissions and the Role of Energy Consumption [Електронний ресурс] // Our World in Data. – 2020. – Режим доступу: <https://ourworldindata.org/co2-emissions> (дата звернення: 13.02.2025).
9. Chen, W. & Wang, Y., 2021. «Impact of 4IR Technologies on Mining Efficiency» // Journal of Mining Technology. – 2021. – Vol. 5, No. 2. – С. 45–53.

10. Chipangamate, P. et al., 2023. «Digital Transformation in the Mining Sector» // Mining Industry Journal. – 2023. – Vol. 6, No. 1. – C. 67–75.
11. Javaid, U. et al., 2022. «Adoption of Smart Technologies in Mineral Extraction» // International Journal of Mining Innovation. – 2022. – Vol. 4, No. 3. – C. 89–98.
12. Mazibuko, M. & Kraemer-Mbula, E., 2021. «Opportunities and Challenges of 4IR in Mining» // Resources Policy Review. – 2021. – Vol. 8, No. 1. – C. 34–41.
13. Mishra, A. et al., 2014. «Role of Automation in Enhancing Safety in Mining Operations» // Safety Science. – 2014. – Vol. 62, No. 1. – C. 112–120.
14. Nwaila, E., Zhang, L. et al., 2022. «Predictive Models for Resource Optimization in Mining» // International Journal of Mining Data Analytics. – 2022. – Vol. 3, No. 4. – C. 101–110.
15. Nwaila, E., Manzi, S. et al., 2022. «Unlocking Hidden Resources: Advanced Characterization Techniques» // Journal of Mining Research. – 2022. – Vol. 7, No. 2. – C. 77–85.
16. PwC, 2021. «The Future of Mining: Digital Transformation and Industry 4.0» [Электронный ресурс]. – 2021. – 48 с.
17. Young, A. & Rogers, B., 2019. «Efficiency Gains through Intelligent Mining Operations» // Mining Economics Review. – 2019. – Vol. 11, No. 3. – C. 56–63.
18. Ghasemi, M. et al., 2014. «Artificial Intelligence Applications in Mining Safety» // Journal of AI in Industrial Processes. – 2014. – Vol. 2, No. 1. – C. 33–40.
19. Bravo, F. et al., 2014. «Supply Chain Optimization in Mining Operations» // Journal of Industrial Management. – 2014. – Vol. 9, No. 3. – C. 65–72.

20. Gustafson, P., et al., 2013. «Advanced Technologies in Mining: Enhancements in Health and Safety» // Journal of Mining Innovations. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – C. 34–41.
21. Ediriweera, D. & Wiewiora, A., 2021. «Digital Skills in the Mining Sector: Bridging the Gap» // International Journal of Mining Technology. – 2021. – Vol. 8, No. 1. – C. 12–19.
22. Löow, M., et al., 2019. «Challenges in Integrating Digital Technologies in Mining» // Mining and Society. – 2019. – Vol. 6, No. 3. – C. 47–55.
23. Jang, S. & Topal, M., 2020. «Barriers to Digital Transformation in Mining Operations» // Journal of Industrial Management. – 2020. – Vol. 9, No. 4. – C. 76–83.
24. Clausen, T. & Sörensen, L., 2022. «Cultural and Organizational Challenges in Mining Digitalization» // Mining Business Review. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – C. 22–29.
25. Frolova, N., et al., 2021. «Investment Risks in the Adoption of Digital Solutions in Mining» // Financial Mining Journal. – 2021. – Vol. 5, No. 2. – C. 58–65.
26. Litvinenko, O., 2020. «Economic Impacts of Digital Investments in Mining» // Journal of Resource Economics. – 2020. – Vol. 11, No. 3. – C. 101–108.
27. Shimaponda-Nawa, N., et al., 2023. «Integrating Modern Technologies into Legacy Mining Systems» // Journal of Mining Automation. – 2023. – Vol. 10, No. 1. – C. 50–58.
28. Fisher, J. & Schnittger, G., 2012. «Exponential Growth in Intelligent Mining» // Journal of Mining Innovation. – 2012. – Vol. 3, No. 1. – C. 12–20.
29. Bellamy, R. & Pravica, D., 2011. «Early Developments in Autonomous Mining: The Case of General Blumenthal» // International Mining Journal. – 2011. – Vol. 4, No. 2. – C. 34–40.

30. Ranjith, P. et al., 2017. «Tracing the Origins of Intelligent Mining in the 20th Century» // Mining Technology Review. – 2017. – Vol. 5, No. 3. – C. 45–52.

31. Rogers, S. et al., 2019. «Advances in Remote-Controlled Underground Mining Machines» // Journal of Underground Mining. – 2019. – Vol. 6, No. 1. – C. 55–62.

32. Bonchis, D. et al., 2013. «Remote Operation Technologies in Subsurface Mining» // Mining Automation Journal. – 2013. – Vol. 2, No. 4. – C. 70–77.

33. Marshall, L. et al., 2016. «Integration of Remote-Controlled Loading and Haulage Systems in Surface Mining» // Surface Mining Technology. – 2016. – Vol. 7, No. 2. – C. 88–95.

34. Abdellah, M. et al., 2022. «Digital Transformation Trends in Smart Mining» // International Journal of Mining Technology. – 2022. – Vol. 8, No. 1. – C. 30–38.

35. Gustafson, P., 2011. «Milestones in the Evolution of Autonomous Mining» // Journal of Mining History. – 2011. – Vol. 4, No. 3. – C. 40–47.

36. Maroufkhani, P., et al., 2022. «Digital Technologies in Mining: Addressing Industry Challenges» // Journal of Mining Science. – 2022. – Vol. 58, No. 4. – C. 567–579.

37. Onifade, M., et al., 2023. «Implementing Advanced Digital Solutions in the Mining Sector» // Mining Technology Review. – 2023. – Vol. 12, No. 1. – C. 45–53.

38. Wagner, J., 2019. «Challenges of Deep Mining and Safety Risks» // Mining Industry Review. – 2019. – Vol. 12, No. 1. – C. 45–52.

39. Kretschmer, T. & Khashabi, P., 2020. «Digital Transformation and Organizational Complexity» // Journal of Business Research. – 2020. – Vol. 123, No. 2. – C. 1–10.

40. Agbehadji, I. E., et al., 2021. «Impact of COVID-19 on Mining Productivity» // International Journal of Mining Science and Technology. – 2021. – Vol. 31, No. 6. – C. 947–953.

41. Ahadjie, C., et al., 2021. «Assessing the Effects of the COVID-19 Pandemic on Mining Operations» // Resources Policy. – 2021. – Vol. 74, No. 2. – C. 102–110.

42. Duff, J., et al., 2010. «Integrated Remote Operations Centers in Mining: A Case Study» // Mining Engineering. – 2010. – Vol. 62, No. 6. – C. 44–49.

43. Farrelly, C. & Records, L. R., 2007. «Applications of Advanced Analytics in Mining: Safer, Smarter, Sustainable Operations» // Proceedings of the 2007 Australian Mining Technology Conference. – 2007. – C. 67–72.