

Обмеження ж обертів на раніше встановленому рівні, як видно з карти ефективності, не вийде за межі енергетично доцільних змін і підвищить тягові характеристики двигуна, особливо у пусковому режимі, що є позитивною зміною для усієї системи особливо у контексті розгляду її динаміки. Окремий інтерес складає питання значення напруги контактної мережі живлення електровозів. З графіків видно, що досліджуваний двигун має високі показники при роботі від стандартної напруги контактної мережі 250 В, але при підвищенні напруги до значень 300-500 В механічні і швидкісні характеристики покращуються, особливо на високих обертах. Такі недоліки обраного двигуна як вразливість до високих температур та ударних навантажень можуть бути повністю або частково скомпенсовані внесенням незначних змін у конструкцію електровозу, а відносно висока ціна агрегату і деталей до нього виправдовуються одними з кращих на ринку електричних двигунів показниками надійності і ремонтоздатності [12, 13].

#### Список літератури

1. Шахтный подземный транспорт / [Ю. Ф. Бутт, В. Б. Грядущий, В. Л. Дебелий та ін.]. – Донецьк: НДІГМ ім.М.М.Федорова, 2013. – 480 с. – (Видання третє, перероблене і доповнене).
2. Шахтний електровозний транспорт. Теорія, конструкції, електрообладнання: підручник / О. М.Сінчук, Е. С. Гузов, В. Л. Дебелий, Л. Л. Дебелий. – Кривий Ріг: ЧП Щербатых А.В, 2015. – 428 с.
3. Вирівнювання навантаження двохдвигунного тягового електропривода рудникового електровоза при параметричній несиметрії асинхронних двигунів / [О. П. Чорний, І. О. Сінчук, О. А. Зерній та ін.]. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. Михайла Остроградського. – 2008. – №3. – С. 79–83.
4. Шокарев Д. А. Тяговий електропривод рудничного контактано-акумуляторного електровозу / Д. А. Шокарев. // Вісник Національного технічного університету "ХПІ": сб. наук. тр. темат. вип. : Проблеми автоматизованого електроприводу. – 2013. – №36. – С. 222–223.
5. Madichetty, S New trends in electric motors and selection for electric vehicle propulsion systems [Електронний ресурс] / Madichetty, S., Mishra, S., Basu, M // IET Electrical Systems in Transportation. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.1049/els2.12018>
6. Swaraj R. J. Comparison of electric motors for electric vehicle application // R. J. Swaraj, A. Thosar // IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology. – 2017. – №6. – С. 12–17.
7. Torrent M. Permanent Magnet Synchronous Motor with Different Rotor Structures for Traction Motor in High Speed Trains [Електронний ресурс] / M. Torrent, J.I. Perat, J.A. Jimenez // Energies. – 2018, 11, 1549 – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/en11061549>.
8. Aiso K. Performance Comparison of High-Speed Motors for Electric Vehicle [Електронний ресурс] / K. Aiso, K. Akatsu // World Electric Vehicle Journal. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/wevj13040057>.
9. Design of a 45 kW Permanent Magnet Synchronous Motor for a Hybrid Electric Vehicle [Електронний ресурс] / S.Henneberger, S. Van Haute, K. Hameyer, R. Belmans // Katholieke Universiteit Leuven. – 1996. – Режим доступу до ресурсу: [http://bib.iem.rwth-aachen.de/IEMpublications/AltesBib/pub\\_427.pdf](http://bib.iem.rwth-aachen.de/IEMpublications/AltesBib/pub_427.pdf).
10. Making the Case for Electrified Transportation / P.Magne, Y. Yang, M. Preindl, V. Pantelic // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2015. – №1. – С. 4–17.
11. Huynh T. -A. Analysis and Comparison of Operational Characteristics of Electric Vehicle Traction Units Combining Two Different Types of Motors / T. -A. Huynh, P. -H. Chen and M. -F. Hsieh// IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2022. – №6. – С. 5727–5742.
12. Design and Analysis of the 45kW-Class Magnetic Geared Permanent Magnet Synchronous Motor for Traction of Tram Vehicles [Електронний ресурс] / [L. Jae-Hyeon, G. Jeong, L. Hyung-Woo та ін.] // Applied sciences journal. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/app11146360>.
13. A Multi-Criteria Analysis and Trends of Electric Motors for Electric Vehicles [Електронний ресурс] / [H. El Hadraoui, M. Zegrari, A. Chebak та ін.] // World electric vehicle journal. – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://doi.org/10.3390/wevj13040065>

Рукопис подано до редакції 13.03.24

УДК 658.511: 629.113

Ю. А. МОНАСТИРСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., І. С. МАКСИМЕНКО, аспірант  
Криворізький національний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ПРОДУКТИВНОСТІ ДИЗЕЛЬ-ТРОЛЕЙВОЗІВ У ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРАХ КРИВОРІЗЬКОГО БАСЕЙНУ

**Мета.** Підвищення ефективності роботи кар'єрного автомобільного транспорту на основі застосування сучасних розробок модернізації машин шляхом встановлення дизель троллейвозного обладнання.

**Методи дослідження.** Положення теорії транспортних процесів і систем, методи теорії планування експериментів, а також, аналіз літературних джерел, наукове узагальнення раніше виконаних досліджень.

**Наукова новизна.** На підставі дослідження процесу транспортування вантажів кар'єрними автосамоскидами та

дизель тролейвозами встановлені закономірності зміни продуктивності роботи кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 90, 130 та 220 тонн від довжини траси при різній вантажопідйомності автосамоскидів, закономірності зміни питомої продуктивності від довжини траси при різних частинах тролейної ділянки та закономірності зміни питомої продуктивності від питомої частини тролейної ділянки при різних довжинах трас руху.

**Практична значимість.** Результати досліджень будуть використані при оцінці доцільності використання та прогнозування роботи дизель-тролейвозів на базі кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю від 90 до 220 т для визначення продуктивності машин для конкретних трас руху на залізничних кар'єрах.

**Результати.** При збільшенні довжини транспортування з 1 до 5 км продуктивність основних криворізьких технологічних кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 130 т зменшується по ступеневій залежності з 630 до 175 т/год, для самоскидів вантажопідйомністю 220 т зменшення з 1065 до 300 т/год. На питому продуктивність довжина траси впливає по параболічній залежності, а питома частина тролейної ділянки - по лінійній залежності. Збільшення швидкості руху на тролейних ділянках з 10 до 24 км/год забезпечує максимальне збільшення продуктивності не більше як на 40 % (у 1,40 рази) на найдовшій трасі з найбільшою тролейною ділянкою у 70 % від загальної довжини траси. На найкоротшій трасі довжиною 1 км з найменшою довжиною тролейної ділянки у 0,3 км збільшення продуктивності в 1,09 рази. Зростання довжини траси при постійній частці тролейної ділянки не суттєво впливає на питому продуктивність, при питомій вазі тролейної ділянки у 70 % максимальне зростання продуктивності до 1,38 рази.

**Ключові слова:** кар'єр, транспорт, автосамоскид, дизель-тролейвоз, продуктивність, дорожні умови експлуатації, розробка корисних копалин.

doi: 10.31721/2306-5451-2024-1-58-36-40

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Питання підвищення продуктивності роботи кар'єрного транспорту завжди є пріоритетним, особливо в умовах обмеження людських ресурсів [1-3]. Застосування сучасних напрямів у розвитку технологічного автомобільного транспорту може вирішити поставлене питання [4, 5]. Одним з таких напрямів є впровадження дизель-тролейвозів, які показують значно вищі, від звичайних кар'єрних автосамоскидів, швидкості руху, особливо на крутих підйомах [6].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Аналіз останніх досліджень і публікацій, щодо використання в глибоких кар'єрах дизель-тролейвозів показує, що цим питанням займаються більшість провідних світових виробників кар'єрних автосамоскидів та електричних машин [7-14].

Компанія Сіменс (Siemens) на сьогодні є найбільшою компанією, що з 1981 року займається виготовленням та впровадженням електричних машин та комплексів для дизель-тролейвозних систем. Загалом для гірничодобувної та інших галузей промисловості Сіменс поставила обладнання у понад 900 позашляхових та 16000 дорожніх електромобілів з різними конфігураціями гібридів, акумуляторів та паливних елементів. За даними компанії застосування тролейної системи дозволяє машині рухатися по ухилу вдвічі швидше, ніж інші рішення [7].

Компанія Катерпіллар (Caterpillar), яка випускала кар'єрні автосамоскиди виключно з гідромеханічною трансмісією, розширює свій модельний ряд машинами з електромеханічною трансмісією змінного струму (моделі CAT-794 AC, CAT-796 AC та CAT-798 AC та інші) [8]. Впровадження автосамоскидів-тролейвозів CAT-795F AC вантажопідйомністю 313 т на 700-метрової електричної тролейної лінії на руднику Боліден Айтік (Boliden Aitik) у Швеції показало наступне. CAT-795F може рухатися зі швидкістю 28 км/год по 10-відсотковому фізичному ухилу та дорожнім умовам із твердим покриттям, це вище на 100 % проти режиму, з рухом лише на дизельному двигуні [9].

В Австралії впроваджуються дизель-тролейвозні на кар'єрних та відвальних трасах. Отримані результати показують зниження витрат палива (дизель працює на холостому ході «на візку») та збільшено швидкість руху до 20 – 25 км/год [10].

Останнім часом збільшується інформація щодо використання дизель-тролейвозів на кар'єрах. Гірничодобувні компанії в Панамі, Австрії та Канаді мають намір впровадити дизель-тролейвозні системи. Компанія Перші квантові мінерали (First Quantum Minerals) заявила, що обладнає свою мідно-золоту копальню Кобре Панамы (Cobre Panama) у Панамі дизель-тролейвозами Лібхер (Liebherr) T-284 вантажопідйомністю 363 т., австрійська гірничодобувна компанія В А Ерцберг (VA Erzberg) електрифікує головну під'їзну дорогу свого підприємства рудника Ерцберг (Erzberg) та переобладнає у дизель-тролейвози парк автосамоскидів Лібхер (Liebherr) T-236 вантажопідйомністю 100 т, компанія РНЦ Мінералс (RNC Minerals) заявила, що вивчає можливість використання дизель-тролейвозів на своєму нікель-кобальтовому проєкті Дюмон (Dumont) у Квебеку, Канада. На головних гірничих виставках світу Баума (Bauma) з'являється все більше експонатів дизель-тролейвозної тематики [9 - 14].

Таким чином, встановлено, що впровадження дизель-тролейвозів на основі кар'єрних автосамоскидів з електромеханічною трансмісією вантажопідйомністю від 100 т є сучасним ефективним рішенням вдосконалення роботи кар'єрного автомобільного транспорту та підвищення продуктивності його роботи, воно буде доцільним впровадженням на криворізьких залізрудних кар'єрах. Але питання визначення показників роботи особливо продуктивності машин ще потребують досліджень відповідно умов експлуатації машин.

**Постановка задачі.** Необхідно розглянути у відносних величинах зміну продуктивності перевезень від довжини їздки з вантажем, при різному питомому відношенню довжини тролейної частини (ступені троллейзації) для машин різної вантажопідйомності. В якості базових значень прийняті показники роботи кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 90, 130 та 220 т не обладнаних тролейною системою, які можуть бути використані в даних умовах експлуатації. Вказані автосамоскиди використовуються при перевезенні залізних руд та вскрышних порід на українських кар'єрах у Кривому Розі та Горішніх Плавнях.

**Викладення матеріалу та результати.** Дослідження виконувалися на основі положень теорії транспортних процесів і систем, а саме визначення параметрів роботи автомобілів з адаптацією до кар'єрного автомобільного транспорту [15].

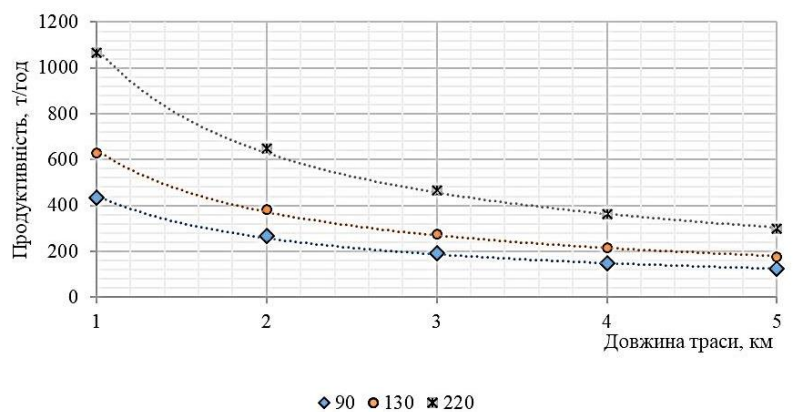
Аналіз автомобільних трас руху в залізрудних кар'єрах України показав, що довжина їздки з вантажем коливається від 1,0 до 5,0 км при ухилах від 6 до 12 %, середня швидкість руху по трасам складає близько 20 км/год, при цьому з вантажем від 8 до 12 км/год при середній 10 км/год, без вантажу швидкість близька до обмеженої нормативами експлуатації для українських кар'єрів величини у 30 км/год.

Вихідними даними для досліджень прийняті: довжина траси руху в навантаженому стані  $l$  від 1 до 5 км, частина траси руху з тролейною ділянкою  $Tr$  від 30 до 70 % від довжини руху з вантажем, ділянки без тролей розташовані у вибоях чи на перевантажувальних майданчиках в основному мають ухил близький до горизонтального, тому швидкості руху автосамоскидів на цих ділянках прийнята середньою при русі з вантажем - 10 км/год.

У загальному вигляді продуктивність кар'єрних автосамоскидів визначається як маса перевезеного вантажу за певний час, при фіксовані вантажопідйомності та коефіцієнті використання вантажопідйомності. Продуктивність залежить від величини транспортного циклу, який складається з часу очікування завантаження (прийняте значення 0,4 хв.), часу установки під завантаження (0,5 хв.), часу завантаження (2,0 хв.), часу руху в навантаженому стані, часу установки під розвантаження (0,5 хв.), часу розвантаження (1,2 хв.), часу руху в порожньому стані. Швидкість руху в навантаженому стані прийнята 10 км/год для нетролейних ділянок і 24 км/год по тролейній ділянці у відповідності до досягнутих значень на інших кар'єрах світу [15], швидкість руху в порожньому стані обмежена нормами експлуатації автотранспорту на кар'єрах України - 30 км/год.

При розрахунку питомої продуктивності у чисельнику була продуктивність на трасі з тролейною ділянкою, у знаменнику – продуктивність на звичайній трасі.

Встановлені значення абсолютної продуктивності (рис. 1) при роботі звичайних автосамоскидів вантажопідйомністю 90, 130 та 220 т на трасах різної довжини. Ці продуктивності послугували базою для порівняння з продуктивністю на трасах з тролейною ділянкою.



**Рис.1.** Закономірності зміни продуктивності від довжини траси при різній вантажопідйомності автосамоскидів

Спостерігається очевидна ступенева закономірність зменшення продуктивності самоскидів при збільшенні довжини транспортування вантажу з 1 до 5 км. При цьому чим більша вантажопідйомність, тим більше падіння продуктивності.

Визначені залежності продуктивності від довжини траси, які описуються ступеневими закономірностями рівняннями для автосамоскидів:

$$\text{вантажопідйомністю 90 т } P = 445,21l^{-0,792};$$

$$\text{вантажопідйомністю 130 т } P = 643,07l^{-0,791};$$

$$\text{вантажопідйомністю 220 т } P = 1088,30l^{-0,792}.$$

На рис. 2 представлені закономірності зміни питомої продуктивності від довжини траси при різних частинах тролейної ділянки. На рисунку 3 представлені закономірності зміни питомої продуктивності від питомої частини тролейної ділянки при різних довжинах трас.

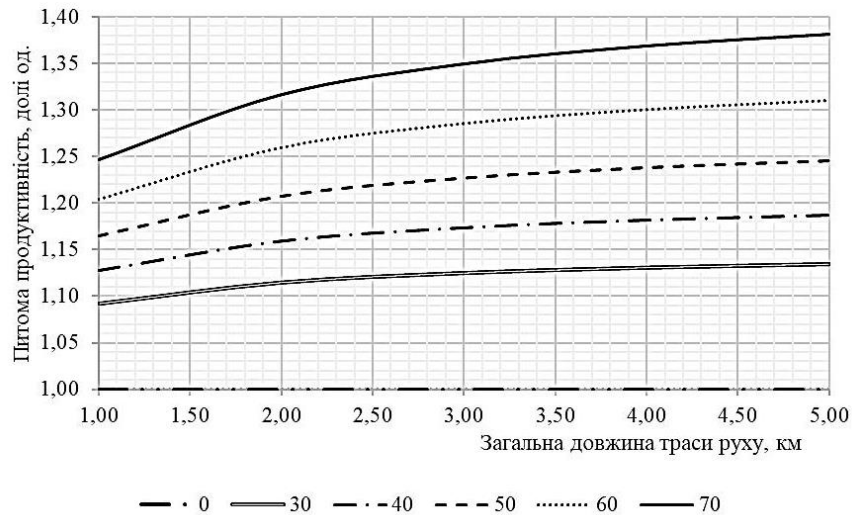


Рис. 2. Закономірності зміни питомої продуктивності від довжини траси при різних частинах тролейної ділянки

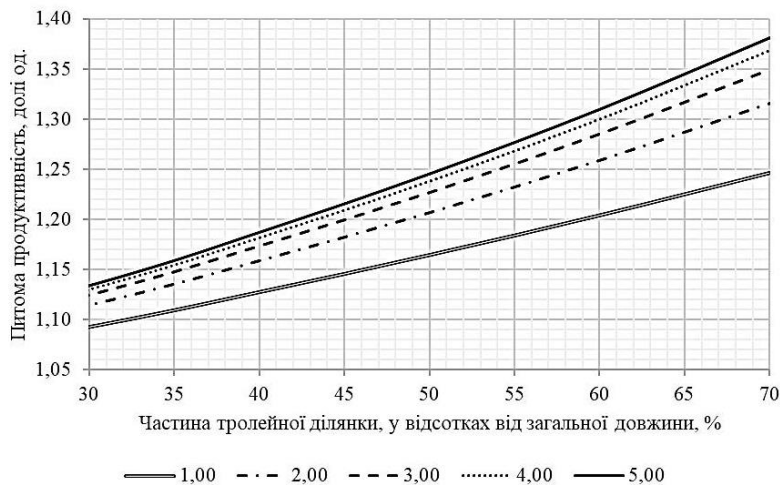


Рис. 3. Закономірності зміни питомої продуктивності від питомої частини тролейної ділянки при різних довжинах трас

Аналіз встановлених закономірностей (рис.2 та 3) показує, що отримані значення практично відповідають інтервалу 10 - 30 % підвищення продуктивності автосамоскидів, які гарантують виробники тролейних систем, що підтверджує правильність методики розрахунків та вихідних даних. Незважаючи на збільшення швидкості руху на тролейних ділянках з 10 до 24 км/год максимальне збільшення продуктивності складе не більше 40 % на найдовшій трасі з найбільшою тролейною ділянкою у 70 % від загальної довжини траси. Одночасно можна констатувати про збільшення продуктивності всього в 1,09 рази на найкоротшій трасі довжиною 1 км з найменшою довжиною тролейної ділянки у 0,3 км. На найкоротшій трасі руху максима-

льне збільшення відносної продуктивності складає 1,25 при 70 % тролейної частини.

Встановлено (рис.2), що зростання довжини траси при постійній частці тролейної дільниці не суттєво впливає на питому продуктивність, лише при питомій вазі тролейної дільниці у 70 % зростання з 1,25 до 1,38 рази. Встановлено, що зростання питомої ваги тролейної дільниці в загальній довжині траси впливає більш суттєво ніж загальна довжина траси. На найкоротшій трасі зростання 15 %, на найдовшій – 25 %. При зростанні довжини траси більше 3 км зростання питомої продуктивності стабілізується.

Для встановлених закономірностей отримана, за допомогою методики раціонального планування експериментів, двох факторна аналітична залежність питомої продуктивності від довжини траси та питомої частини тролейної ділянки, долі одиниць

$$PP = 0.0053p - 0.0059l^2 + 0.0554l + 0.8545,$$

де  $p$  - питома частина тролейної ділянки, процент від загальної довжини траси руху, % (межі від 30 до 70 %),  $l$  - загальна довжина траси руху, км (межі від 1 до 5 км).

Встановлено, що на питому продуктивність довжина траси впливає по параболічній залежності, а питома частина тролейної ділянки впливає по лінійній залежності.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Використовуючи встановлені закономірності можливо визначати прогнозну продуктивність для конкретних трас руху при оцінці доцільності використання та прогнозування роботи дизель-тролейвозів на базі кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю від 90 до 220 т.

### Список літератури

1. Пахомов В. І., Гірін І. В., Тищенко В. Ю., Жалдаченко О. А. Обґрунтування раціональної організації експлуатації кар'єрних автосамоскидів // Вісник Криворізького національного університету Збірник наукових праць Випуск 52, м. Кривий Ріг, КНУ, 2021, с. 58-64
2. Hirin I. V., Tyshchenko V. Yu. Comparative analysis of safety design for electric vehicle and internal combustion engine cars // Вісник Криворізького національного університету Збірник наукових праць Випуск 51, м. Кривий Ріг, КНУ, 2020, с. 57-62
3. Пахомов В. І., Гірін І. В., Гірін В. С. Дослідження та розробка заходів, спрямованих на зниження токсичності викидів промислового автотранспорту // Вісник Криворізького національного університету Збірник наукових праць Випуск 50, м. Кривий Ріг, КНУ, 2020, с. 73-78.
4. Сістук В. О., Монастирський Ю. А. Пошук оптимальної схеми установки кар'єрного автосамоскида під навантаження для умов глибоких кар'єрів // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства», м. Кривий Ріг, КНУ, 2022 р. С.128.
5. Монастирський Ю. А., Погапенко В. В. Адаптивна система технологічного автотранспорту кар'єру // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства», м. Кривий Ріг, КНУ, 2022 р. С.124.
6. Монастирський Ю. А., Максименко І. С. Перспективи застосування дизель-тролейвозів на залізничних кар'єрах Криворізького басейну// Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства», м. Кривий Ріг, КНУ, 2023 р. С.157.
7. Siemens patented all-electric Mobile Mining Truck based on proven technology / <https://im-mining.com/2021/11/04/siemens-patented-electric-mobile-mining-truck-based-proven-technology/>
8. Caterpillar introduces trolley assist system for CAT® electric drive mining trucks / [https://www.cat.com/en\\_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html](https://www.cat.com/en_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html)
9. Trolley assist for diesel-electric trucks in mining: 3 reasons why it is taking off. Thanks to Boliden's recent trial at its Aitik open-pit mine, in Sweden, the subject of trolley assist is back on the mining industry's agenda. <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-electrification/trolley-assist-for-diesel-electric-trucks>
10. An introduction to trolley-assist haulage systems <https://globalroadtechnology.com/trolley-assist-haulage-systems/>
11. 5 things you may not have known about the Trolley Assist System <https://www.liebherr.com/en/ind/latest-news/news-press-releases/detail/5-things-you-may-not-have-known-about-the-trolley-assist-system.html>
12. Can a dirty industry come clean? How mining equipment is becoming more sustainable <https://www.mobilehydraulictips.com/can-a-dirty-industry-come-clean-how-mining-equipment-is-becoming-more-sustainable/>
13. Liebherr Trolley Trucks Testing Success at Austrian Mine <https://www.heavyliftnews.com/liebherr-trolley-trucks-testing-success-at-austrian-mine/>
14. Trolley-assisted haul roads construction and maintenance <https://www.globalroadtechnology-blog.com/industry-articles/trolley-assisted-haul-roads-construction-and-maintenance>
15. Monastyrskiy Y., Sistuk V., Maksymenko I. Prospects for using truck trolley-assisted haulage systems in deep iron ore open pit mines. Vytautas Ostaševičius (pirmininkas). (2023). Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference. P.705 – 709. <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/transport-means-2023.-part-ii.-proceedings-27th-international-scientific-conference/> . doi:10.5755/e01.2351-7034.2023.P2.

Рукопис подано до редакції 21.03.24