

УДК 621.314.5: 622.23.05

DOI <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-11>

ДОСВІД РОЗРОБКИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ПЕРЕГІННОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ

Стрункін Гліб Миколайович,

магістр, інженер-конструктор

ТОВ «ПЛУТОН ІС»

ORCID ID: 0009-0009-1719-4132

Scopus ID: 59565723000

Михайлов Володимир Юрійович,

в. о. начальника відділу приводу та перетворювачів

ТОВ «ПЛУТОН ІС»

Койфман Олексій Олександрович,

кандидат технічних наук, доцент,

завідувач кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0003-2075-7417

Scopus ID: 55808117000

Хілов Віктор Сергійович,

доктор технічних наук, професор,

професор кафедри автоматизації, електро- та робототехнічних систем

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

ORCID ID: 0000-0002-5583-4323

Scopus ID: 6508071339

Косенко Роман Георгійович,

студент групи 141-23-1п

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

У статті розкрито необхідність розроблення мобільних перегінних комплексів для кар'єрних екскаваторів, які забезпечують їх транспортування між робочими ділянками без потреби прокладання тимчасових високовольтних ліній живлення. Проаналізовано сучасний стан речей у цьому напрямі техніки. Наявні перегінні комплекси на базі генератора постійного струму або з високовольтною передачею мають низькі техніко-економічні показники. Доведено, що перспективним є використання низьковольтних електроприводів. Презентовані сучасні експериментальні рішення, які було впроваджено у кар'єрах України вітчизняними та закордонними фірмами. Розкрито їхні позитивні та негативні риси. Подано інформацію про перегінний комплекс з високочастотним перетворювачем фірми "Dalgakiran". Описано роботу автоматизованого електроприводу розробки ТОВ «Плутон ІС» на базі двокомплектного випрямляча для перегінного комплексу ТОВ ІІ «Юромаш». Запропоновано структуру автоматизованого електроприводу перегінного комплексу на базі двокомплектного тиристорного випрямляча, що забезпечує ефективне використання потужності синхронного генератора та підвищує надійність роботи в умовах гірничого виробництва. Показано, що для оптимізації потужності дизель-генераторної установки можна використовувати обмеження швидкості перегону для великих екскаваторів. Визначено, що змінні вхідні параметри не дають можливості провести розрахунки обмеження швидкості для формування завдання на розроблення універсального перегінного комплексу. Запропоновано регресійну модель зі зворотним зв'язком для формування необхідного завдання на швидкість перегону та подальшої оптимізації комплексу за потужністю дизель-генераторної установки. Розраховані коефіцієнти регресії для максимальних умов підтвердили можливість зниження потужності ДГУ з 400 до 240 кВт за забезпечення мінімально допустимої швидкості руху. Обґрунтовано можливе зниження потужності генератора для перегону з обмеженою швидкістю. Визначено подальший напрям досліджень щодо розроблення універсального перегінного комплексу.

Ключові слова: перегінний комплекс, кар'єрні екскаватори, обмеження швидкості перегону, регресійна модель, зворотний зв'язок, низьковольтний електропривід.

який, у свою чергу, живиться або від головного ланцюга, або від додаткового синхронного генератора СГ. Позитивні риси такого електроприводу – витонченість рішення для будь-яких режимів тягової машини (в руховому і гальмівному). За своїм змістом це система «генератор-двигун» (Г-Д), в якій напрямок протікання струму вибирається автоматично залежно від режиму. В режимі тяги енергія споживається від генератора. Під час руху на спуск двигуни екскаватора опиняються в генераторному режимі, їхня електрорушійна сила (ЕРС) стає більшою за ЕРС генератора перегінної станції, тому струм автоматично змінює свій напрямок, а гальмівний момент формується дизелем [4]. За таким принципом виконана перегінна станція, яку експлуатують у кар'єрі ПрАТ «ІНГЗК» [5]. Цей перегінний комплекс не має автомобільного шасі, а кріпиться до екскаватора, що перегоняється, за допомогою жорсткого зчеплення.

Однак машина постійного струму має суттєві недоліки: наявність колекторного вузла, великі габарити і дефіцитність. Цілком логічним виглядає намагання використати як первинне джерело електроенергії загальнопромислового дизель-генераторну установку (ДГУ) змінного струму, розташовану на автомобільному шасі. Становлення такого напрямку гірничої техніки лише розпочинається, тому відчутний брак публікацій стосовно використання низьковольтних ДГУ для побудови перегінного комплексу кар'єрних екскаваторів.

Метою роботи є аналіз можливих структур автоматизованого електроприводу на базі низьковольтних дизель-генераторних установок для побудови перегінного комплексу для кар'єрних екскаваторів та обґрунтування можливості використання обмеження швидкості перегону для побудови універсального електроприводу.

Методи та методики дослідження.

В кар'єрах України основну частку складають електричні екскаватори типів ЕКГ-5, ЕКГ-8, ЕКГ-10 та ЕКГ-12 [6]. Термін їх використання подовжують модернізацією механіки, заміною морально-застарілого електроприводу типу Г-Д на сучасні тиристорні перетворювачі та встановлення компенсаторів реактивної потужності [7]. Тому під час розроблення перегінного комплексу як вхідні дані були використані параметри саме цих типів екскаваторів.

Для розробки структури автоматизованого електроприводу для перегінного комплексу екскаватора надалі будемо орієнтуватися на використання серійних загально-промислових ДГУ з напругою 380 В.

Розроблена ДГУ повинна використовуватися з екскаваторами різних типів шляхом перемикачання перемикача на пульті управління.

Для формування завдання на швидкість перегону використано апарат регресійного моделювання зі зворотним зв'язком, за допомогою якого можна вибирати необхідне завдання, виходячи зі встановленого типу екскаватора та поточного режиму перегону.

Результати. Виходячи з того, що у перегінному комплексі доцільним є використання ДГУ серійних типів, можемо запропонувати узагальнену схему електроприводу, яку зображено на рис. 2.

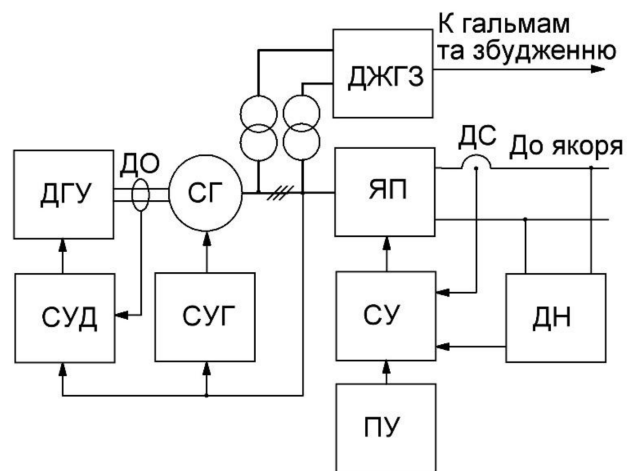


Рис. 2. Схема електроприводу перегінного комплексу екскаваторів на базі генератора змінного струму

На рис. 2 дизель-генераторна установка ДГУ, в складі якої є синхронний генератор СГ, підключена до якірного перетворювача ЯП – АС-DC-перетворювача, який задає потрібні параметри перегону. Від цього ж генератора живляться джерела живлення гальм та збудження ДЖГЗ. Інші позначення аналогічні наведеним на рис. 1.

АС-DC-перетворювач може бути або тиристорним випрямлячем, або некерованим діодним, до виходу якого під'єднано імпульсний перетворювач постійної напруги (ІППН). За такою схемою виконано електропривід перегінного комплексу виробництва турецької фірми "Dalgakiran", який проходив випробування на Північному ГЗК «Метінвест» [8].

До переваг електроприводу такого типу можна віднести такі:

- оптимальне використання синхронного генератора в різних режимах роботи через відсутність необхідності компенсації додаткової реактивної потужності;
- ефективні динамічні режими, які обумовлені лише параметрами генератора та ІППН, що працює на частоті 1...2 кГц;

– можливість забезпечення реверсу по якору.

До недоліків слід віднести такі:

– ККД на рівні 0,85...0,88 через подвійне перетворення та більші динамічні втрати у транзисторах та підвищені вимоги до вентиляторів через це;

– велике навантаження на зворотні діоди транзисторних модулів під час руху на спуск та рекуперації енергії, що призводить до зниження надійності електропривода;

– допустиме перевантаження транзисторних модулів не більше дворазового значення, що вимагатиме підвищеної встановленої потужності останніх;

– рівень шуму у 70–80 дБ (але в разі використання в умовах кар'єру цей недолік несуттєвий).

ТОВ «Плутон ІС» було розроблено якірний перетворювач для перегінного комплексу ТОВ з П «Юромаш» за тиристорною схемою. Тиристорний випрямляч в умовах кар'єру має деякі переваги перед транзисторним перетворювачем. Особливо цінною є можливість працювати з великим короточасним перевантаженням, що забезпечує можливість формувати стопорний струм двигуна без підвищення встановленої потужності напівпровідникових пристроїв та форсування їх охолодження. Головний недолік – неефективне використання синхронного генератора через споживання випрямлячем реактивної потужності – успішно долається.

По-перше, великий фазовий зсув струму спостігається лише під час пуску двигуна та забезпечення стопорного струму, а по-друге, спеціалістами ТОВ «Плутон ІС» було застосовано двокомплектне випрямлення, за якого пуск двигунів та рух на першій швидкості відбувалися від вентиляного комплексу ВК1, підключеного до генератора через понижуючий трансформатор Т, а після розгону та переведення джойстика на другу позицію паралельно вмикався випрямляч ВК2, підключений безпосередньо до генератора (рис. 3). Таким чином, було зменшено фазовий зсув на маленьких швидкостях.

Енергія гальмування під час руху на спуск розсіювалася транзисторним ключем ТК на блоках резисторів БР (рис. 3).

Для економії місця реверс двигунів було виконано за допомогою перемикання їх обмотки збудження контакторами у ДЖГЗ.

Перегінний комплекс було змонтовано на базі автомобіля КрАЗ. Дизель-генераторну установку та електропривід було розташовано у фургоні, а гальмівні блоки резисторів винесено на дах для кращого відведення тепла. Перегінний комплекс проходив дослідну експлуатацію на Південному ГЗК та Інгuleцькому ГЗК у 2019–2020 роках, за результатом якої його було впроваджено до постійної експлуатації. На рис. 4 наведено фотографію процесу перегону екскаватора ЕКГ-10.

Окреме питання, яке потрібно було вирішити: вибір ДГУ за потужністю.

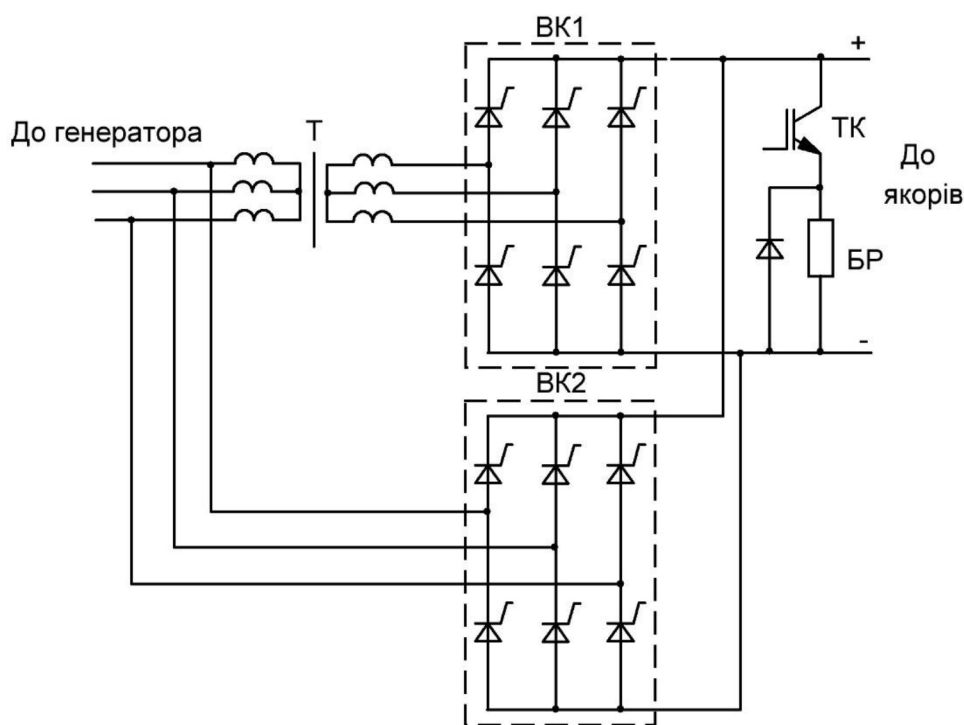


Рис. 3. Схема якірного перетворювача перегінного комплексу



Рис. 4. Перегін екскаватора ЕКГ-10

Для вибору потужності ДГУ потрібно знати потужність, яку споживають двигуни відповідних екскаваторів. В роботі [2] наведено теоретичні розрахунки потужності, яку споживають різні типи екскаваторів під час руху по рівній поверхні та з максимально-допустимим ухилом 12° (табл. 1).

Автори статті [2] доходять висновків, що потужність ДГУ для універсального перегінного комплексу повинна відповідати значенню потужності руху для найбільшого екскаватора серії з найбільшим ухилом (табл. 1).

Однак, як показано у тій самій статті [2], швидкість перегону прямо пропорційна потужності джерела живлення (синхронного генератора) P та обернено пропорційна силі опору руху f та синусу кута ухилу $\sin \alpha$:

$$V \sim \frac{P}{(f, \sin \alpha)}. \quad (1)$$

Можна припустити, що за зниження потужності перегін більш важких екскаваторів можливий з меншою швидкістю. Через те що сила

опору руху, кут ухилу, навіть ККД комплексу величини змінні і взагалі невідомі, під час розроблення першого зразка спеціалістами ТОВ з П «Юромаш» було вибрано ДГУ потужністю 500кВт з великим запасом з огляду на коефіцієнт потужності випрямляча, споживання власних потреб та джерел живлення гальм і збудження.

Для проєктування універсального перегінного комплексу з оптимальною за значенням потужності ДГУ, зважаючи на (1), автори запропонували регресійну модель залежності заданої швидкості перегону V_z від обмеження потужності ДГУ зі зворотним зв'язком на основі теоретичних та експериментальних даних у такому вигляді:

$$V_z = \frac{A \cdot P}{(B + C \cdot \sin \alpha) \cdot mg} + D \cdot (V - V_{cur}), \quad (2)$$

де V_{cur} – поточне значення швидкості екскаватора, км/год;

V – розраховане значення швидкості км/год;

m – маса екскаватора, т;

Таблиця 1

Розрахункові співвідношення потужності руху екскаваторів різних типів

Екскаватор	Маса, т	Швидкість, км/год	Потужність, кВт		
			Рівна поверхня	Рух з ухилом	Рекуперація
ЕКГ-5	197	0,55	55	132	15
ЕКГ-8	373	0,45	85	204	23
ЕКГ-10	410	0,7	145	348	38
ЕКГ-12	430	0,8	174	418	46

g – прискорення вільного падіння, м/с^2 ;

α – кут нахилу;

A, B, C, D – коефіцієнти регресії, причому A характеризує ККД комплексу, B – опір руху, C – коефіцієнт коригування поточного кута ухилу, D – коефіцієнт пропорційності.

Введення поточного значення швидкості в рівняння (2) дає змогу компенсувати вплив інерції та опір поверхні, що залежить від швидкості.

Якщо прийняти $V_{cur} = V$, то за відомих максимальних параметрів (табл. 1) можна знайти коефіцієнти регресії A, B, C та вираховувати швидкість екскаваторів різних типів за обмеженої потужності генератора. Для максимальних значень P та α отримано рівняння (2) у такому вигляді:

$$V_z = \frac{271,6 \cdot P}{(15,04 + 81,54 \cdot \sin \alpha) \cdot mg}. \quad (3)$$

Результати розрахунку теоретичної швидкості за допомогою (3) для генераторів потужністю 160, 200, 240, 320 та 400 кВт за максимального кута ухилу 12° наведено на рис. 5.

Виходячи з отриманих результатів (рис. 5), універсальним генератором для забезпечення перегону будь-якого екскаватора з номінальною швидкістю за максимального кута ухилу вважаємо генератор з потужністю не менш ніж 400 кВт. Однак Інструкція з охорони праці для машиніста екскаватора [9] обмежує лише максимальне значення швидкості перегону, тоді як нижнє значення не регламентується. Якщо задатися умовно прийнятим значенням,

наприклад 0,5 км/год, можна здійснити оптимізацію потрібної потужності генератора для перегінного комплексу. На рис. 6 наведено результати розрахунку максимальної швидкості перегону залежно від кута ухилу для екскаватора ЕКГ-12 для різних типів генераторів. Також позначено максимальне значення 0,8 км/год та мінімальне – 0,5 км/год.

Можна дійти висновку, що під час використання генератора потужністю 240 кВт забезпечується швидкість перегону ЕКГ-12 0,5 км/год за максимально допустимого ухилу 12° (рис. 6). Очевидно, що для екскаваторів меншої маси швидкість перегону з цим генератором буде більшою.

Через постійну зміну кута ухилу та опору руху можна перенавчати регресійну модель (3) під час реального перегону за допомогою зворотного зв'язку. Вибір типу екскаватора фіксує в моделі масу екскаватора, його стопорний струм для захисту та завантажує початкові дані з рівняння (3). Після початку перегону на кожному кроці обчислювань контролер системи управління розв'язує систему чотирьох рівнянь, що отримуються згідно з формулою (2), для значень параметрів поточного стану та трьох попередніх або знаходить нові значення коефіцієнтів регресії, наприклад, за методом градієнтного спуску [10]. Після цього формується завдання на швидкість для наступного кроку розрахунку.

Накопичення масиву інформації для оптимізації вибору мінімально можливої швидкості перегону, визначення впливу реактивної

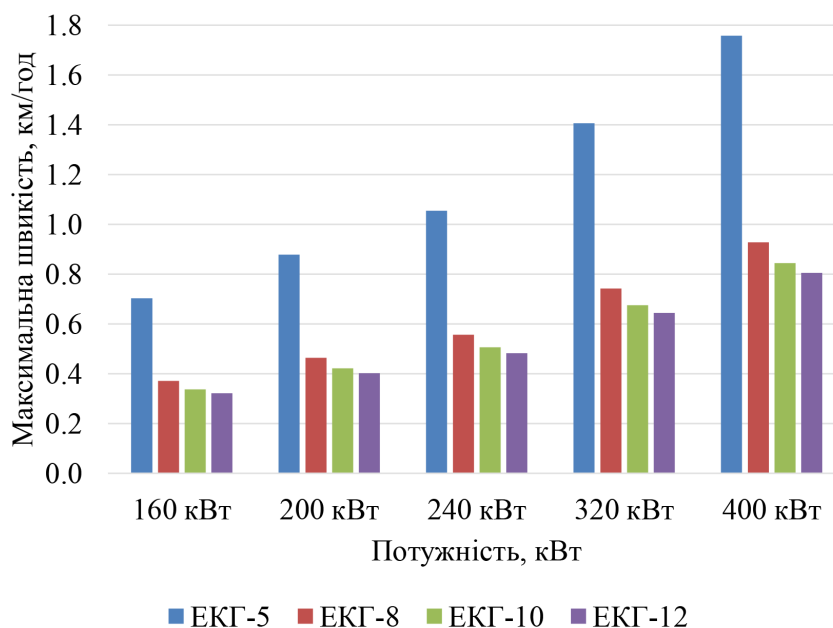


Рис. 5. Максимальна швидкість перегону екскаваторів різних типів під час використання генераторів стандартної потужності

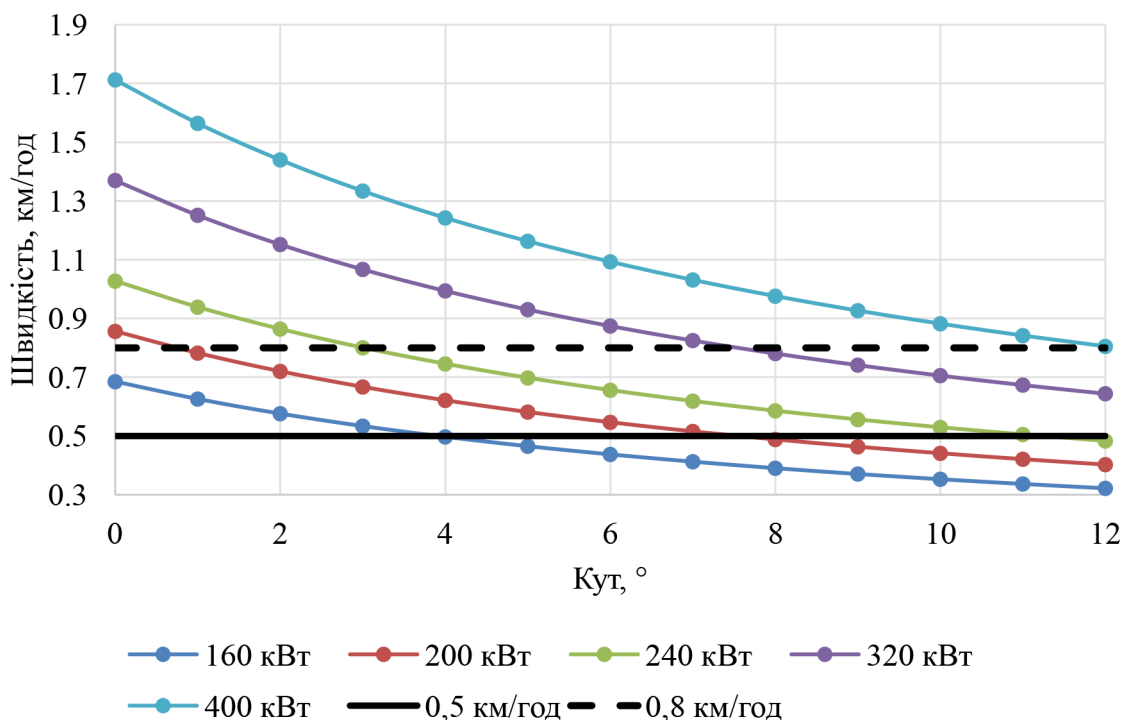


Рис. 6. Залежність швидкості перегону ЕКГ-12 від кута ухилу для генераторів різних типів

потужності, яка споживатиметься від генератора, на обмеження з потужності генератора буде розглянуто в майбутніх дослідженнях авторів.

Висновки. Проведено огляд сучасних тенденцій, пов'язаних з перегонем кар'єрних екскаваторів на ГЗК України. Високовольтні схеми мають неоптимальні показники за масою та об'ємом електрообладнання. Підвищити техніко-економічні показники перегінного комплексу вдається шляхом застосування низьковольтного електрообладнання з якірним перетворювачем з двокомплектним випрямлячем, що було впроваджено на «Південному ГЗК» та «Ігулецькому ГЗК». На основі характеристик потужності руху екскаватора розкрито необхідність оптимізації запропонованого рішення автоматизованого електроприводу перегінного комплексу за потужністю ДГУ. Через змінні параметри рівняння швидкості перегону

побудовано її регресійну модель зі зворотним зв'язком, за допомогою якої можна не тільки формувати завдання на швидкість перегону відповідно до типу екскаватора, але й розраховувати швидкість перегону різних типів екскаваторів за різних умов. Для максимальних параметрів перегону розраховано коефіцієнти регресії, які дали змогу провести аналіз можливої швидкості перегону для генераторів різних потужностей. Якщо необхідно забезпечувати максимальну швидкість перегону ЕКГ 12 0,8 км/год за максимального кута ухилу 12°, то генератор потрібно вибирати з потужністю не менш ніж 400 кВт. За зниження швидкості перегону до 0,5 км/год можна зменшити потрібне значення потужності генератора до 240 кВт. Наявність зворотного зв'язку в регресійній моделі за швидкістю дає змогу оперативно перенавчати регресійну модель в процесі постійних змін умов перегону.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Електрифікація гірничих робіт: підручник. 2-ге вид., допрац. та доп. / Г. Г. Півняк, М. М. Бєлий, Л. П. Ворохов, В. Т. Заїка, Ю. М. Зражевський, Ю. Т. Разумний, А. Я. Рибалко, В. І. Тесленко, Ф. П. Шкрабець; за ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. 615 с.
2. Malafeev S. I., Malafeev S. S. Analysis of a Quarry Mobile Diesel Generator Station During the Moving of an Excavator. In: Radionov, A.A., Gasiyarov, V.R. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_93
3. Zhang T., Fu T., Yunhao Cui Y., Song X. Toward autonomous mining: design and development of an unmanned electric shovel via point cloud-based optimal trajectory planning. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2022, vol. 17, no. 3, article 30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0686-2>

4. Стрункін Г. М. Застосування пристроїв силової електроніки. 2025. ISBN 978-617-8139-59-9. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>
5. Енергія на колесах. *Інгулецький вісник*. № 17 (2632), 8 травня 2018. С. 1.
6. Бондаренко А. О. Гірничі машини для відкритих гірничих робіт: навчальний посібник. М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2017. 123 с.
7. На ІнгЗК провели капітальний ремонт кар'єрного екскаватора: вебсайт. URL: <https://metinvest.media/ua/page/kapitalnyy-remont-karernogo-ekskavatora-na-ingoke> (дата звернення 2.05.2025).
8. Мобільна дизель-генераторна установка для перегону електричних кар'єрних екскаваторів і бурових верстатів на ПівнГЗК: вебсайт. URL: <https://dalgakiran.ua/uk/proekti/proekty-dizelnyh-elektrostantsij/mobilna-dizel-generatorna-ustanovka-dlya-peregonu-elektrichnih-kar-yernih-ekskavatoriv-i-burovih-verstativ-na-pivngzk> (дата звернення: 4.05.2025).
9. Інструкція з охорони праці для машиніста екскаватора: вебсайт. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=47293 (дата звернення: 23.08.2025).
10. Draper Norman, Smith Harry. Applied Regression Analysis, Third Edition. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118625590.ch15>

REFERENCES:

1. Elektrifikaciya gornichih robot: Pidruchnik. [Electrification of Mining Operations: A Textbook]. 2-e vid., doprac. ta dop. / G. G. Pivnyak at all. Dnipropetrovsk: Nacionalnij gornichij universitet, 2005, 615 s.
2. Malafeev, S. I., & Malafeev, S. S. (2021). Analysis of a Quarry Mobile Diesel Generator Station During the Moving of an Excavator. In: Radionov, A. A., Gasiyarov, V. R. (eds) Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020). ICIE 2021. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-54817-9_93
3. Zhang, T., Fu T., Yunhao Cui, Y., & Song, X. (2022). Toward autonomous mining: design and development of an unmanned electric shovel via point cloud-based optimal trajectory planning. *Frontiers of Mechanical Engineering*. Vol. 17, no. 3, article 30. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11465-022-0686-2>
4. Strunkin, G. M. (2025). Zastosuvannya pristroyiv silovoyi elektroniki [Application of power electronics devices]. ISBN 978-617-8139-59-9. Zenodo. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.15256472>
5. Energiya na kolesah [Energy on wheels]. *Inguleckij visnik*. № 17, 8.05.2018.
6. Bondarenko, A. O. (2017). Gornichi mashini dlya vidkritih gornichih robot: navch. Posibnik [Mining machines for open-pit mining: training manual] / M-vo osviti i nauki Ukraini, Nac. gorn. un-t. D., NGU, 123 s.
7. Na InGZK proveli kapitalnij remont kar'yernogo ekskavatora [A major overhaul of a quarry excavator was carried out at InGZK]: website. Retrieved from: <https://metinvest.media/ua/page/kapitalnyy-remont-karernogo-ekskavatora-na-ingoke> (date of access: 2.05.2025).
8. Mobilna dizel-generatorna ustanovka dlya peregonu elektrichnih kar'yernih ekskavatoriv i burovih verstativ na PivnGZK [Mobile diesel generator set for powering electric quarry excavators and drilling rigs at PivnGZK]: website. Retrieved from: <https://dalgakiran.ua/uk/proekti/proekty-dizelnyh-elektrostantsij/mobilna-dizel-generatorna-ustanovka-dlya-peregonu-elektrichnih-kar-yernih-ekskavatoriv-i-burovih-verstativ-na-pivngzk> (date of access: 4.05.2025).
9. Instrukciya z ohoroni praci dlya mashinista ekskavatora [Safety instructions for the excavator driver]: website. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=47293 (date of access: 23.08.2025).
10. Draper, Norman & Smith, Harry. (2014). Applied Regression Analysis, Third Edition. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118625590.ch15>

Стаття надійшла: 24.08.2025

Стаття прийнята: 19.09.2025

Опублікована: 10.11.2025

