

**141 ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА**

УДК 621.311

DOI: 10.31498/2225-6733.50.2025.336322

**ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Якимець С.М.	канд. техн. наук, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5043-3566 , e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com ;
Ходаковський М.С.	студент, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук;
Олійніченко М.Ю.	аспірант, Кременчуцький національний університет ім. М. Остроградського, м. Кременчук, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6651-0175 , e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua ;
Чорна В.О.	канд. техн. наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3641-4152 , e-mail: chornajav@gmail.com

Сучасний світ зіткнувся з подвійною енергетичною кризою: з одного боку, виснажуються запаси викопного палива, з іншого – зростає рівень забруднення навколишнього середовища. У країнах, де основними джерелами енергії залишаються вугілля та нафта, ця проблема особливо гостра, оскільки залежність від традиційних енергоресурсів обмежує економічний розвиток і загрожує екологічній безпеці. Подвійна енергетична криза є серйозним викликом для сучасного світу, але її можна подолати шляхом активного розвитку відновлюваної енергетики. Інвестування у чисті технології, скорочення споживання викопного палива та міжнародне співробітництво у сфері екологічної безпеки допоможуть створити стійку та екологічно чисту енергетичну систему майбутнього. Так, наприклад, металургійні заводи бразильської гірничодобувної компанії Vale S.A., які розташовані в Індонезії, працюють повністю від гідроенергії; гірничорудна транснаціональна корпорація Rio Tinto Group планує інвестувати до 2026 року додаткові 600 мільйонів доларів у будівництво двох сонячних електростанцій потужністю 100 МВт у Пілбарі. Наразі ситуація у гірничо-металургійному комплексі України вкрай складна. Сектор, який до 24 лютого 2022 року забезпечував більшу частину експорту країни, перебуває на межі виживання. З втратою «Азовсталі» та Маріупольського металургійного комбінату імені Ілліча економіка одночасно втратила понад 40% вироблення металу. Через бойові дії знизили виробництво інші металургійні підприємства, працюючи лише на 20%. Періодично призупиняють свою діяльність Ігулецький, Південний та Північний гірничозбагачувальні комбінати (ГЗК) у м. Кривий Ріг, на 47% скоротився видобуток ГЗК групи Ferrexpo, до складу якої входять Полтавський, Біланівський та Єристівський ГЗК [1]. Заблоковані морські порти та введені логістичні обмеження та підвищення на 70% тарифів «Укрзалізниці» на вантажні перевезення погіршили і без того важкий стан підприємств галузі. Разом з видобувною галуззю третій рік під терористичними ударами окупантів перебуває енергетична галузь України. Спеціалісти Світового банку оцінюють втрати країни на суму понад 4,4 трильйони грн. Зруйновано 80% відсотків теплової генерації, майже 100% гідроенергетики, більшість вітрових електростанцій та половина фотовольтаїчних станцій [2]. Мінімальний запас міцності забезпечує атомна енергетика, яка теж зазнала суттєвої втрати – захоплення ядерними терористами найбільшої в Україні та Європі ЗАЕС в Энергодарі. В таких критичних для країни умовах як ніколи гостро стоїть питання подальшого розвитку атомної генерації, розосередження (децентралізація) вироблення електроенергії та забезпечення захисту від руйнації об'єктів енергоінфраструктури. Основними джерелами сировини залізорудної промисловості України є три басейни: Білозерський залізорудний район (Запорізька область); Керченський залізорудний басейн та Криворізький залізорудний басейн. До складу останнього входять не лише ГЗК м. Кривий Ріг, а також ряд ГЗК, розташованих у м. Горішні Плавні (виробляють руду в межах Криворізько-Кременчуцької структурно-металогенної зони). Зважаючи на той факт, що внесок підприємств Білозерського та Керчинського басейнів у загальний видобуток руди складає менше 10%, а також те, що підприємства Кривого Рогу та Горішніх Плавнів працюють, фактично, в межах одного басейну, в представленій роботі загальний аналіз виконано на основі виробничих даних комбінату групи Ferrexpo Poltava Mining. Це дозволить з достатньою достовірністю формалізувати висновки на всі підприємства залізорудної галузі з відкритим способом видобутку руди. У даній роботі на основі проведених розрахунків виконано порівняльний аналіз потенціалу джерел відновлюваної енергетики в умовах ПрАТ «Полтавський гірничозбагачувальний комбінат». Встановлено, що найбільш перспективним напрямом розбудови розосередженої генерації є вітрові та сонячні електростанції. Зважаючи на особливості

експлуатації, подальший потенціал розвитку рекомендовано акцентувати увагу на побудову саме фотовольтаїчних станцій в розглянутих умовах.

Ключові слова: відновлювана енергетика, сонячні панелі, вітрова електростанція, енергія, потенціал, генерація, залізорудне підприємство.

Постановка проблеми

Затверджені Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та план заходів з його виконання [3] передбачає розвиток генерації альтернативними джерелами на гірничих видобувних підприємствах, для яких аварійні відключення від централізованої мережі електропостачання неприпустимі. Крім того, декарбонізація бізнесу є обов'язковою умовою євроінтеграції, а отже важливим чинником, який стримує доступ видобутої сировини підприємствами галузі на світові ринки. За даними міжнародної компанії McKinsey, яка спеціалізується на вирішенні завдань, пов'язаних з стратегічним управлінням, гірничодобувна промисловість, споживаючи 38% промислової енергії та 15% світової електроенергії, забезпечує від 2-3% світових викидів CO₂ і здатна відіграти значну роль у зменшенні екологічного впливу [4].

Розбудова сучасних систем електропостачання діючих та тимчасово законсервованих залізорудних підприємств потребує реальної оцінки можливостей впровадження автономних міні- та мікроелектростанцій з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Питання ефективної інтеграції ВДЕ потребує глибокої комплексної оцінки на таких рівнях, як технологія, економіка, суспільство, та не залишилося без уваги наукового світу. Широкий спектр досліджень потенціалу та техніко-економічного обґрунтування систем ВДЕ в гірничому виробництві було представлено у роботах [5-8], в яких подано загальний огляд та багатофакторну оцінку систем з альтернативними джерелами з урахуванням технічних, екологічних та економічних аспектів, описано пошук оптимізованого рішення в багатофакторному просторі. Системам ВДЕ, призначеним для інтеграції або заміни частин традиційних дизельних і газогенераторних установок, а також електромереж в умовах австралійських шахт, було присвячено роботу [9]. Аналіз фотоелектричного потенціалу в умовах відкритих копалин розглянуто у роботах [10-11]. Серед вітчизняних дослідників слід виділити роботи [12-15], присвячені аналізу стану електроенергетики залізорудних підприємств України та підвищенню їх енергоефективності. Найбільш повно дослідження ряду авторів щодо застосування ВДЕ в умовах відкритого видобутку залізорудних копалин систематизовано у роботі [16], в якій розглянуто теоретичні аспекти та практичні рішення щодо підвищення ефективності електропостачання територіально віддалених споживачів шляхом застосування вітрових генеруючих установок в системі електроживлення.

Проведений авторами аналіз підтвердив необхідність комплексної багатофакторної оцінки потенціалу джерел відновлюваної енергетики в зазначених умовах та висвітлення пріоритетів джерел з урахуванням закордонного досвіду.

Мета статті

Метою даної роботи є дослідження технічної можливості використання потенціалу джерел відновлюваної енергетики в системах електропостачання промислових залізорудних підприємств.

Виклад основного матеріалу

Аеродинамічний розрахунок вітроустановки

Як свідчить практика, при оцінці вітрового потенціалу місцевості більшість дослідників розглядає пряму задачу теорії вітроенергетичних установок (ВЕУ), в якій вихідними даними є геометричні розміри ВЕУ, характерні швидкості вітру та ефективність самих складових установок [17, 18]. Обернена задача полягає у визначенні швидкості вітру, який має обдувати вітроколесо визначених розмірів для забезпечення генерування визначеної потужності. При всій універсальності та поширеності застосування в умовах, коли необхідно накласти певні обмеження, застосування цих методів супроводжується рядом складнощів.

Необхідність прийняття обмежень щодо висот опор в умовах розрахунків, приведених авторами у даній статті, зумовлюється, насамперед, особливостями розташування ВЕУ, які плануються інстальувати на відвалах виробіток з характерною для них щільністю та їх гранулометричним складом. Таким чином, авторами запропоновано комбіновану методику розрахунку, коли ставиться задача визначення кількості вітрових установок зазначеної потужності та їх сумарне вироблення електроенергії в умовах обмеженості висоти опор які можуть бути розміщені на визначеній території.

Розрахуємо параметри однієї вітрової енергетичної установки для метеорологічних умов м. Горішні Плавні, встановленої на висоті 25 м; призначеної для генерування потужності 15000 Вт. При розрахунках враховано коефіцієнт корисної дії електричної частини вітрогенератора $\eta_e = 0,73$.

Під час вибору схеми вітроколеса скористуємось усередненими значеннями розподілу напрямку вітрів за даними багаторічних спостережень [19].

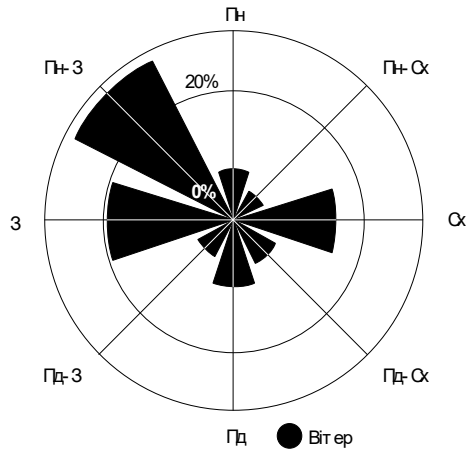


Рис. 1 Діаграма напрямків вітру у м. Горішні Плавні

Відсотковий розподіл напрямів вітрів наведено у табл. 1.

Таблиця 1
Розподіл напрямків вітру у м. Горішні Плавні
за усередненими багаторічними даними

Пн↓	Пн-Сх↙	Сх←	Пд-Сх↘	Пд↑	Пд-З↗	З→	Пн-З↖
7,9 %	5,1 %	16,0 %	7,3 %	10,1 %	6,2 %	19,6 %	27,8 %

Виходячи з даних табл. 1 обрано тип ВЕУ – крильчастий вітроподвигун з системою орієнтації за вітром.

За даними метеорологічних спостережень з урахуванням прогнозованої висоти розміщення ВЕУ, розраховано геометричні розміри вітрового колеса, необхідні для генерування указаної у завданні потужності:

$$N = \zeta \eta_e \frac{\pi D^2 P V^3}{4 R_{нов} T},$$

$$D = 2 \sqrt{\frac{N R_{нов} T}{\zeta \eta_e \pi P V^3}}; \quad (1)$$

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{287}{3,14}} \cdot \sqrt{\frac{N T}{\zeta \eta_e P V^3}} = 19,12 \sqrt{\frac{N T}{\zeta \eta_e P V^3}}.$$

Під час розрахунків було враховано співвідношення $P_{ПА} = 133,22 P_{мм.рм.см}$.

Абсолютна температура в останньому виразі розрахована, виходячи із формули:

$$T = t + 273,15. \quad (2)$$

Результати розрахунків мінімальних геометричних розмірів багатолопатевого тихохідного та малоллопатевого тихохідного вітрових коліс наведено у табл. 2.

Розрахунки доводять, що найбільш несприятливим з точки зору вітрових навантажень для указаних географічних умов виявляється липень. Діаметр вітрового малоллопатевого швидкохідного колеса для генерування указаної потужності повинен складати від 9,08 до 9,5 метрів (залежно від обраного конструктиву). У разі використання тихохідного багатолопатевого колеса величина D повинна лежати в межах від 11,24 до 12,31 м.

Для подальших розрахунків прийнято $D_{ш} = 9,5$ м, $D_m = 12,3$ м.

Частота обертання вітрових коліс визначена з використанням виразу:

$$n = \frac{60 V Z}{L} = \frac{60 V Z}{\pi D}, \quad (3)$$

де $L = \pi D$ – довжина окружності, яку описує кінець лопаті, довжиною $\frac{D}{2}$, м.

Результати розрахунків зведено у табл. 3.

Під час розрахунків прийняті наступні параметри: для тихохідних коліс кількість лопатей $m_m \geq 6$, для швидкохідних – $m_{ш} \leq 3$.

Таблиця 2

Розрахунок геометричних розмірів вітрових коліс

№	Місяць	D, м			
		$\xi_{ш} = 0,42$	$\xi_{ш} = 0,46$	$\xi_m = 0,25$	$\xi_m = 0,3$
1	Січень	8,98	8,58	11,64	10,63
2	Лютий	5,8	5,54	7,51	6,86
3	Березень	9,1	8,69	11,78	10,76
4	Квітень	6,03	5,76	7,82	7,14
5	Травень	9,39	8,98	12,17	11,11
6	Червень	9,46	9,04	12,26	11,19
7	Липень	9,5	9,08	12,31	11,24
8	Серпень	9,48	9,06	12,28	11,21
9	Вересень	9,36	8,95	12,13	11,08
10	Жовтень	9,23	8,82	11,96	10,92
11	Листопад	9,15	8,74	11,86	10,82
12	Грудень	9,05	8,65	11,73	10,71

Таблиця 3

Розрахунок частот обертання вітрових коліс

№	Місяць	n, об/хв				
		$Z_{m=1}^u = 9,0$	$Z_{m=2}^u = 7,0$	$Z_{m=3}^u = 5,0$	$Z_{m=6}^m = 3,0$	$Z_{m=12}^m = 1,2$
1	січень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
2	лютий	82,2	63,93	45,67	21,17	8,47
3	березень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
4	квітень	82,2	63,93	45,67	21,17	8,47
5	травень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
6	червень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
7	липень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
8	серпень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
9	вересень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
10	жовтень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
11	листопад	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35
12	грудень	61,65	47,95	34,25	15,88	6,35

Для подальших розрахунків обрано мінімальні з розрахованих частот:

$$\begin{aligned} n_{m=1}^u &= 61,65 \text{ об/хв}; \quad n_{m=2}^u = 47,95 \text{ об/хв}; \\ n_{m=3}^u &= 34,25 \text{ об/хв}; \quad n_{m=6}^m = 15,88 \text{ об/хв}; \\ n_{m=12}^m &= 6,35 \text{ об/хв}. \end{aligned}$$

Кутова швидкість обертання визначається з виразу:

$$\omega = \frac{\pi n}{30}. \quad (4)$$

Результати розрахунку наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Розрахунок кутової швидкості обертання ω , с^{-1}

$\omega_{m=1}^u$, с^{-1}	$\omega_{m=2}^u$, с^{-1}	$\omega_{m=3}^u$, с^{-1}	$\omega_{m=6}^m$, с^{-1}	$\omega_{m=12}^m$, с^{-1}
6,45	5,02	3,58	1,67	0,66

Розрахунок відцентрової сили $F_{\text{вц}}$ кожного вітрового колеса проводиться за виразом [6]:

$$F_{\text{вц}} = m\omega^2 R = \frac{m\omega^2 D}{2}. \quad (5)$$

Результати розрахунку наведено у табл. 5.

Таблиця 5

Розрахунок відцентрової сили вітроколів $F_{\text{вц}}$

$F_{\text{вц } m=1}^u$, Н	$F_{\text{вц } m=2}^u$, Н	$F_{\text{вц } m=3}^u$, Н	$F_{\text{вц } m=6}^m$, Н	$F_{\text{вц } m=12}^m$, Н
197,98	239,53	183,31	102,02	33,62

Стартовий обертовий момент $M_{\text{см}}$ вітрових коліс може бути оцінений за наближеною формулою:

$$M = \frac{V^2 R^3}{Z^2} = \frac{V^2 D^3}{8Z^2}. \quad (6)$$

Результати розрахунку наведено у табл. 6.

Таблиця 6

Розрахунок стартового обертового моменту $M_{\text{см}}$

$M_{\text{см } m=1}$, Н·м	$M_{\text{см } m=2}$, Н·м	$M_{\text{см } m=3}$, Н·м	$M_{\text{см } m=6}$, Н·м	$M_{\text{см } m=12}$, Н·м
15,43947	25,52238	50,02387	13,80662	86,29138

За умовою мінімізації відцентрової сили та забезпечення високого стартового моменту та практики застосування обираємо вітрове колесо з трьома лопатями.

За каталожними даними [20, 21] з урахуванням діаметру вітрового колеса попередньо обрано ВЕУ EuroWind 15 з характеристиками: номінальна потужність $P = 15$ кВт; діаметр ротора $D = 11$ м; кількість лопатей $m = 3$; напруга генератора $U_g = 380$ В; напруга інвертора $U_i = 380$ В; швидкість обертання ротора $\omega = 20,93 \text{ с}^{-1}$.

Отримана оцінка потужності є мінімальною, зважаючи на нехтування місцем розташування вітрової установки. Вона може бути використана в подальших розрахунках після уточнення всіх необхідних даних.

Оцінюємо потенційну встановлену потужність ВЕС в умовах рудовидобувних підприємств, беручи за основу основний чинник – місце розташування вітрових станцій. Найбільш раціональним бачиться розміщення вітряків на відвалах кар'єрів. В першу чергу, перспектива полягає у можливості збільшення баричних перепадів завдяки висоті піднесення насипів пустої руди. Так, в умовах ПрАТ «Полтавський ГЗК» (ПГЗК) ця висота складає до 130 метрів, що дасть суттєву «прибавку» до середньостатистичних швидкостей вітру. Крім того, оцінка площ східного та західного відвалів ПГЗК дає значення 5200 тис. м^2 та 7166 тис. м^2 відповідно. Зважаючи на той факт, що відвали є робочими, оцінка раціональної площі повинна бути знижена удвічі.

На рис. 2 наведено схематичне розташування відвалів відносно основного кар'єру.

Беручи за основу оцінку площ відвалів, розраховується потенційна кількість вітроустановок, які можна встановити. Зважаючи на повторюваність переважаючих напрямів вітрів у регіоні, раціонально розмістити ВЕУ рядами, які будуть перпендикулярні до переважаючих напрямів вітрів.

Згідно з рекомендаціями [22], мінімальна відстань між сусідніми вітроустановками повинна складати не менше трьох висот ВЕУ. Складену розрахункову схему розміщення установок для прийнятих в роботі умов показано на рис. 3.

Виходячи з цієї схеми, для побудови чотирьох вітряків необхідно зайняти площу:

$$S_{4BEU} = 100 \cdot 100 = 10000 \text{ м}^2.$$

Виходячи з оціненої загальної площі відвалів визначається кількість квадратних вітряків, які теоретично можна розмістити в умовах ПГЗК:

$$n_{4BEU}^{cx} = \frac{S_{роб}^{cx}}{S_{4BEU}} = \frac{0,5 \cdot 5200 \cdot 10^3}{10000} \approx 260 \text{ од.} \quad (7)$$

$$n_{4BEU}^{зах} = \frac{S_{роб}^{зах}}{S_{4BEU}} = \frac{0,5 \cdot 7166 \cdot 10^3}{10000} \approx 358 \text{ од.} \quad (8)$$



Рис. 2 – Схема розташування відвалів ПГЗК

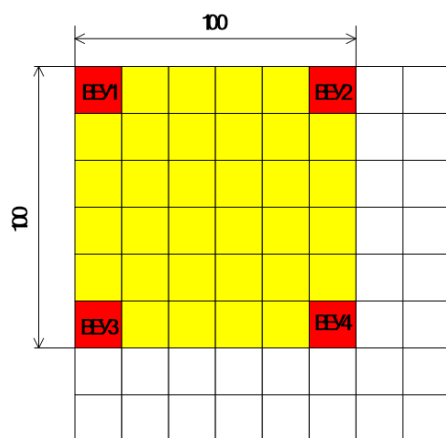


Рис. 3 – Схема розташування ВЕУ

Таким чином, загальна кількість вітряків, які теоретично можуть бути розміщені на відвалах, складає:

$$n_{BEU} = 4 \cdot (260 + 358) = 2472 \text{ од.}$$

Реалізувати на практиці розрахункову схему достатньо проблематично в силу неправильності геометрії відвалів, тому для реалістичної оцінки прийнято кількість вітроустановок, зменшену на третину. Таким чином, розрахована потенційна кількість вітроустановок, яка може бути встановлена у вказаних умовах, складає $n_{BEU} = 1648$ од.

Зважаючи на попередні розрахунки, сумарна теоретична встановлена потужність ВЕС складатиме:

$$T_{BEC} = 1648 \cdot 15000 = 25,72 \text{ МВт.}$$

Розрахунок фотовольтаїчної станції (ФЕС)

Для проведення розрахунків характеристик ФЕС, яку планується встановити в умовах ПГЗК, в якості основного модуля обрано модуль Risen RSM144-6-380M [23]. Задаючись проєктною встановленою потужністю генерації $P_{пр}^{ФЕС} \geq 20000$ кВт, враховуючи паспортну потужність одного модуля $P_{мод} = 380$ Вт, визначається кількість модулів, необхідних для забезпечення встановленої потужності ФЕС:

$$n_{фн} \geq \frac{20 \cdot 10^6}{380} \geq 52632 \text{ од.}$$

У єдиний сонячний масив сонячні панелі приєднані послідовно. Для перетворення енергії фотовольтаїчних модулів передбачено використання стрінгових інверторів SUN2000-100KTL-H1 з підключенням за схемою 47 інверторів по 31 стрінг з 28 PV модулів; 21 інвертор по 21 стрінг з 28 PV модулів. Зважаючи на зазначене, прийнято кількості модулів $n_{фн} = 53144$ од.

Для оцінювання потужності проєктованої ФЕС розраховується обсяг виробленої електроенергії однією сонячною батареєю. У попередніх розрахунках враховано, що виходячи з умов розміщення модулів, кут нахилу майданчика до горизонту $\beta = 45^\circ$, азимут щодо півдня для наведених у географічних умов $\alpha_{ПП} = -25^\circ$.

ВАХ модуля Risen RSM144-6-380M, приведену на рис. 4, розділено на кілька точок, включаючи точки неробочого ходу та короткого замикання. Зважаючи на мапу глобального опромінення та місце розташування (м. Горішні Плавні), розрахунки проведено для кривої $R = 1000$ Вт/м².

Для кожної точки значення струму визначено відповідне значення напруги. За цими даними визначено ряд потужностей $P_{ВАХ}$ сонячного модуля як добуток струму на напругу, результати занесено у табл. 7.

За технічними характеристиками Risen RSM144-6-380M, прийнявши $k_{зан} = 0,97$, що є типовим для квадратних сонячних елементів, визначено площу

сонячного модуля:

$$F_{\Phi M} = nk_{зан} F_{CE}, \quad (9)$$

де $n = 72$ – кількість сонячних елементів у фотovoltaїчному модулі.

$$F_{\Phi M} = 72 \cdot 0,97 \cdot 0,156^2 \approx 1,7 \text{ м}^2.$$

Risen RSM144-6-380M

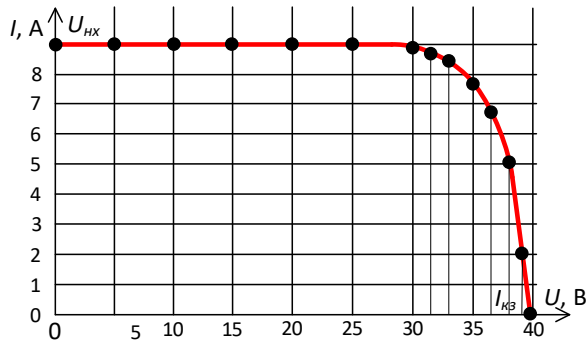


Рис. 4 – ВАХ модуля Risen RSM144-6-380M для 1000 Вт/м²

Розраховане значення заносено у таблицю 7.

Зважаючи на розраховану площу відвалів, оцінюється можливість встановлення фотovoltaїчних модулів на відвалах.

За прийнятої кількості фотопанелей $n_{\Phi n} = 53144$ та розрахованої площі одного модуля $F_{\Phi M} = 1,7 \text{ м}^2$ загальна площа фотovoltaїчного поля складатиме:

$$S_{CEC} = 53144 \cdot 1,7 \approx 90345 \text{ м}^2.$$

Враховуючи, що загальна робоча площа відвалів:

$$S_{роб} = S_{роб}^{cx} + S_{роб}^{зax} = 0,5 \cdot (5200 + 7166) \cdot 10^3 = 6183000 \text{ м}^2,$$

визначено відсоток площі, необхідний для розміщення зазначеної кількості фотопанелей:

$$\frac{S_{CEC}}{S_{роб}} \cdot 100\% = \frac{90345}{6183000} \cdot 100\% \approx 14\%.$$

Корисна потужність визначається, використовуючи співвідношення $P_{кор} = RF_{\Phi M}$ за умови прийнятого раніше значення $R = 1000 \text{ Вт/м}^2$:

$$P_{кор} = 1000 \cdot 1,7 = 1700 \text{ Вт}.$$

За формулою $\eta_{\Phi M} = \frac{P_{BAX}}{P_{кор}} \cdot 100$, у якій P_{BAX} –

потужність, яку визначають за ВАХ визначеного сонячного модуля; $P_{кор} = RF_{\Phi M}$ – корисна потужність, яку визначають залежно від рівня освітленості R і площі фотovoltaїчного модуля $F_{\Phi M}$, визначено ряд ККД модуля, який занесено у табл. 7.

За даними табл. 7 побудована залежність $\eta_{\Phi M} = f(P_{BAX})$ та визначено максимальне значення ККД $\eta_{\Phi M \max} = 16,5\%$ за відповідного значення потужності $P_{BAX} = 280,5 \text{ Вт}$ (рис. 5). Визначене значення максимального ККД у відносних одиницях використано у табл. 8 для подальших розрахунків.

Таблиця 7

Результати розрахунку основних енергетичних характеристик фотovoltaїчного модуля Risen RSM144-6-380M

Параметр	Значення											
$U, \text{ В}$	$U_{нх}$	5	15	20	30	31,5	33	35	36,5	38	39	39,5
$I, \text{ А}$	9	9	9	9	9	8,75	8,5	7,8	6,75	5	2	$I_{кз}$
$P_{BAX}, \text{ Вт}$	0	45	135	180	270	275,6	280,5	273	246,4	190	78	0
$\eta_{\Phi M}, \%$	0	2,6	7,9	10,6	15,9	16,2	16,5	16	14,5	11,1	4,5	0

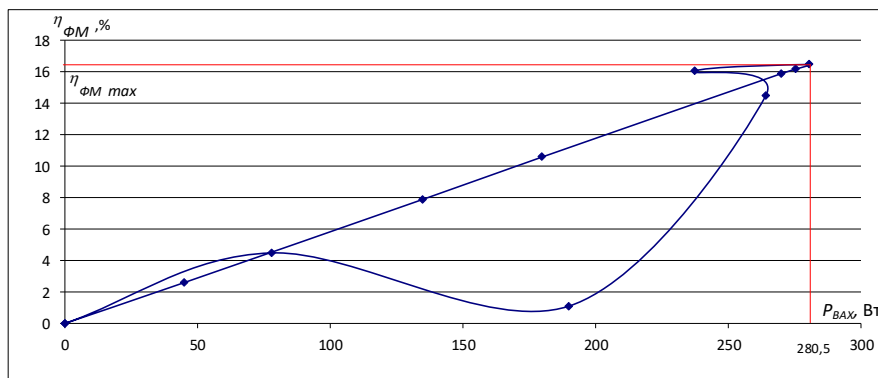


Рис. 5 – Залежність $\eta_{\Phi M} = f(P_{BAX})$

За довідниковими даними [24] визначається величина валового денного щомісячного надходження сонячної радіації для м. Горішні Плавні та зазначених кутів нахилу панелі до горизонту β та азимут $\alpha_{ПП}$.

Визначивши за паспортними даними Risen RSM144-6-380M температурний коефіцієнт зміни потужності $k_{Pmax} = -0,004$ в.о., визначається коефіцієнт, використовуючи довідникові дані [25] щодо середньомісячної температури повітря у м. Горішні Плавні:

$$k_t = 1 - k_{Pmax} (T - T_0), \quad (10)$$

де T – температура довкілля для заданого місяця, °C; $T_0 = 25^\circ\text{C}$ – стандартна температура сонячного елемента.

Далі визначається денна генерація електричної енергії фотомодулем у відповідний місяць:

$$E_i = E'_{вал} k_\beta F_{\Phi M} m \eta_{\Phi M} k_t \eta_{\Delta P}^m \eta_{\Delta E}^m, \quad (11)$$

де $E'_{вал}$ – валовий денний прихід сонячної радіації на аналізований майданчик, кВт·год/м²/день; k_β – коефіцієнт перерахунку сумарного потоку сонячної енергії з горизонтальної площини на похилу поверхню сонячних панелей залежно від орієнтації відносно

півдня; m – кількість модулів у сонячній батареї, шт; $\eta_{\Phi M}$ – максимальний з визначених ККД, %; k_t – коефіцієнт, який враховує вплив температури сонячного модуля на його ККД; $\eta_{\Delta P}^m$, $\eta_{\Delta E}^m$ – відповідні втрати потужності, які зумовлені послідовним з'єднанням елементів та передачею енергії до споживача.

Результати розрахунків занесено до табл. 8.

На наступному етапі визначається вироблення електроенергії в заданий період з урахуванням календарної кількості днів у кожному місяці та загальної кількості панелей, використовуючи формулу:

$$E_{\Phi B} = n_{\Phi n} \sum_{i=1}^m n_i E_i, \quad (12)$$

в якій i – кількість місяців, для яких виконують розрахунок; n_i – кількість календарних днів у поточному місяці; E_i – розраховане денне вироблення електричної енергії для поточного місяця; $n_{\Phi n} = 53144$ – загальна кількість фотопанелей, прийнята на початку розрахунку. Результати розрахунків наведено у табл. 9.

Таблиця 8

Розрахунок денного вироблення електричної енергії в фотовольтаїчній батареї E_i , кВт·год

Місяць	$E'_{вал}$, кВт год/м²/день	k_β , в.о	$F_{\Phi M}$, м²	m , шт	$\eta_{\Phi M}$, в.о.	k_t , в.о.	$\eta_{\Delta P}^m$, в.о.	$\eta_{\Delta E}^m$, в.о.	E_i , кВт·год
Січ.	1,19	1,11	1,7	1	0,165	1,12	0,97	0,9	0,362
Лют.	1,93	1,11	1,7	1	0,165	1,11	0,97	0,9	0,582
Бер.	2,84	1,11	1,7	1	0,165	1,09	0,97	0,9	0,841
Квіт.	3,68	1,11	1,7	1	0,165	1,07	0,97	0,9	1,07
Трав.	4,54	1,11	1,7	1	0,165	1,05	0,97	0,9	1,295
Черв.	4,75	1,11	1,7	1	0,165	1,03	0,97	0,9	1,33
Лип.	4,76	1,11	1,7	1	0,165	1,03	0,97	0,9	1,33
Серп.	4,40	1,11	1,7	1	0,165	1,03	0,97	0,9	1,23
Вер.	3,06	1,11	1,7	1	0,165	1,05	0,97	0,9	0,873
Жовт.	2,00	1,11	1,7	1	0,165	1,07	0,97	0,9	0,582
Лист.	1,20	1,11	1,7	1	0,165	1,09	0,97	0,9	0,355
Груд.	0,94	1,11	1,7	1	0,165	1,10	0,97	0,9	0,281

Таблиця 9

Розрахунок генерації енергії ФЕС

Місяць	n_i , днів	E_i , кВт·год	$n_i E_i$, кВт·год	Місяць	n_i , днів	E_i , кВт·год	$n_i E_i$, кВт·год
Січ.	31	0,362	11,222	Лип.	31	1,33	41,23
Лют.	28	0,582	16,296	Серп.	31	1,23	38,13
Бер.	31	0,841	26,071	Вер.	30	0,873	26,19
Квіт.	30	1,07	32,1	Жовт.	31	0,582	1,746
Трав.	31	1,295	40,145	Лист.	30	0,355	10,62
Черв.	30	1,33	39,9	Груд.	31	0,281	8,711

Враховуючи дані таблиці, визначено річну генерацію енергії СЕС:

$$E_{\text{фв}} = 7719467,5 \text{ кВт}\cdot\text{год.}$$

Побудувавши графік річного вироблення електроенергії (рис. 6), можна визначити, що мінімальне вироблення електроенергії спостерігається у грудні, а максимальне характерне для липня.

Розрахунок генерації електроенергії з використанням мікроГЕС

Для оцінювання потенціалу використання гідроенергетики виконано аналіз роботи водовідливу, заживленого від ПС-35 «Шахта».

Зважаючи на графік роботи устаткування, приведений у табл. 10, побудовано добовий графік споживання, показаний на рис. 7.

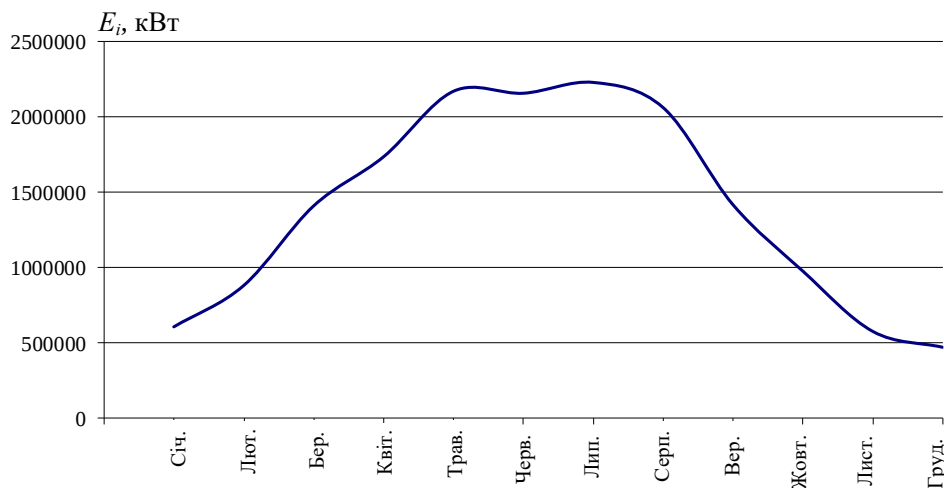


Рис. 6 – Графік річної генерації електроенергії сонячною електростанцією

Таблиця 10

Графік роботи устаткування підстанції «Шахта»

Час доби	S, кВт								
	насос 1	насос 2	насос 3	насос 4	насос 5	насос 6	насос 7	насос 8	насос 9
6:00-11:00	500	500	500	0	0	0	0	500	0
11:00-20:00	500	500	500	500	500	500	500	500	500
20:00-23:00	0	0	0	500	500	500	0	0	500
23:00-06:00	500	500	500	500	500	500	500	500	500

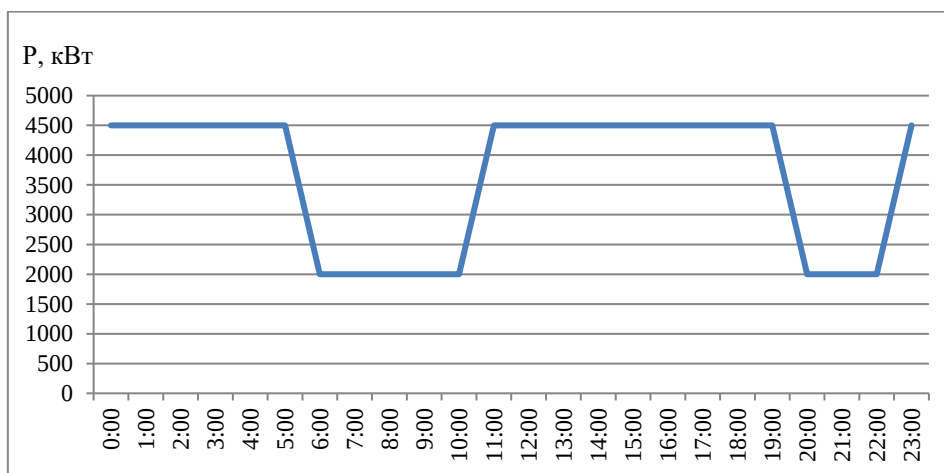


Рис. 7 – Добовий графік споживання електроенергії підстанції «Шахта»

Таблиця 11

Графік роботи при відкачуванні води з кар'єру

Час	Q, м³								
	насос 1	насос 2	насос 3	насос 4	насос 5	насос 6	насос 7	насос 8	насос 9
6:00-8:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300
8:00-10:00	300	0	300	300	0	300	0	0	0
10:00-17:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300
17:00-21:00	0	300	0	0	300	0	0	300	300
21:00-23:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300
23:00-6:00	300	300	300	300	300	300	300	300	300

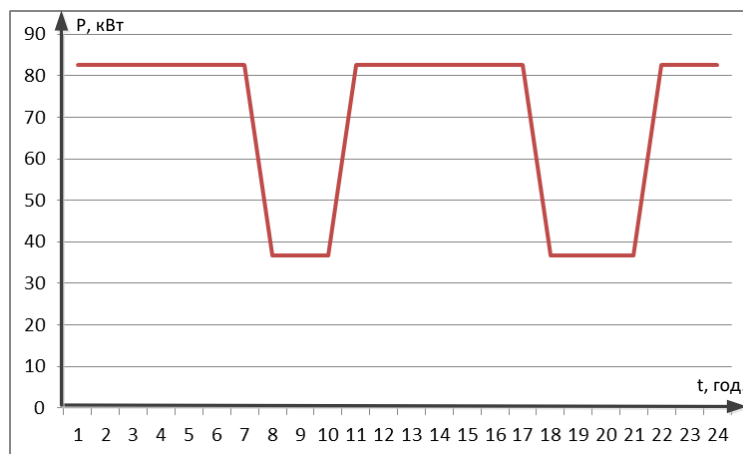


Рис. 8 – Генерація електроенергії при використанні мікро-ГЕС, на виході труби відкачування

У табл. 11 приведено графік обсягів води, що перекачує насосне обладнання при відкачуванні води з кар'єру.

За даним графіком можна визначити сумарні витрати води як добуток наведених витрат на час роботи двигуна.

Враховуючи результати аналізу системи водовідведення, проведені на підприємстві за визначеними витратами води $Q_m = 300$ м³/с та тиском $H=10$ м, об'ємо гідротурбіну Power Spout T-80 [26].

Потужність потоку води на валу гідротурбіни N_m визначають з виразу [27]:

$$N_m = k \rho g Q_m H \eta_m, \quad (13)$$

де k – коефіцієнт утрат тиску у відкритому гідроканалі; ρ – густина води, кг/м³ (для холодної прісної води $\rho \approx 1250$ кг/м³), $g = 9,81$ – прискорення вільного падіння, м/с²; Q_m – витрати води через гідротурбіну, м³/с; H – натиск нетто турбіни, м; η_m – коефіцієнт корисної дії турбіни (для сучасних гідротурбін великої потужності $\eta_m = 0,93 \dots 0,96$, для малих ГЕС $\eta_m = 0,5$).

Враховуючи паспортні дані турбіни, визначається потужність на валу гідротурбіни, яка виробляється потоком води за годину:

$$N_m = \frac{1 \cdot 1250 \cdot 9,8 \cdot 2700 \cdot 10 \cdot 0,9}{3600} \approx 85,23 \text{ кВт.}$$

Під час розрахунків потужності враховано переведення витрат з м³/с в м³/год за формулою:

$$Q_m^{m^3/год} = 3600 Q_m^{m^3/c}. \quad (14)$$

Коефіцієнт втрат тиску у відкритому гідроканалі прийнятий $k = 1$, зважаючи на незмінність величини натиску.

Електрична потужність гідрогенератора N_e визначається з урахуванням $\eta_e = 0,97$:

$$N_e = N_m \eta_e = 85,23 \cdot 0,97 \approx 82,68 \text{ кВт.} \quad (15)$$

Відповідно до графіка витрати води побудовано графік генерації електроенергії при використанні мікро-ГЕС, на виході труби відкачування (хвостосховище), рис. 8.

Обсяг генерації електроенергії ГЕС $E_{ГЕС}$ визначається за період часу 1 рік, зважаючи на незмінність величини натиску та заданий період використання $T_{вик} = 2200$ год:

$$E_{ГЕС} = \int_0^T N_{ГЕС_{i\Sigma}} dt = 1 \cdot T_{вик} \cdot N_{ГЕС_{i\Sigma}} = 82,68 \cdot 10^3 \cdot 2200 = 181,896 \text{ МВт} \cdot \text{год.} \quad (16)$$

Розрахунок параметрів мікро-ГАЕС

Розрахунок довжини греблі L , необхідної для забезпечення роботи гідроаккумуляційної електростанції, проводиться за формулою [27]:

$$L = \frac{H}{i} \cdot 10^3, \quad (17)$$

де H – натиск води, м; i – ухил водогонів, м/км.

$$L = \frac{10}{0,6} \cdot 10^3 \approx 16700 \text{ м.}$$

Площа водойми (дзеркала води) F_g визначається, використовуючи вираз, в якому $l_{бер} = 0,01L$:

$$F_g = 0,5Ll_{бер}. \quad (18)$$

$$F_g = 0,5 \cdot 16700 \cdot 0,01 \cdot 16700 = 1,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2.$$

Запас води G_g , необхідний для нормальної роботи гідротурбін, визначається згідно виразу:

$$G_g = 0,5F_gH = 0,5 \cdot 1,4 \cdot 10^6 \cdot 10 \approx 7 \cdot 10^6 \text{ м}^3.$$

Збільшення висоти греблі $h_{зан}$, необхідне для запобігання нестачі води (додаткового запасу):

$$h_{зан} = \frac{G_g}{F_g} = \frac{7 \cdot 10^6}{1,4 \cdot 10^6} = 5 \text{ м.}$$

Загальна висота греблі з урахуванням запасу:

$$H_{ер} = H + h_{зан} = 10 + 5 = 15 \text{ м.}$$

Потужність греблі ГАЕС, зумовлена потенційною енергією води:

$$P_{ер} = 9,81QH_{ер} = 9,81 \cdot 2,7 \cdot 15 \approx 398 \text{ кВт.}$$

З урахуванням втрат $\eta_m = 0,65$ потужність гідротурбіни ГАЕС складає:

$$P_m = 398 \cdot 0,97 \approx 386 \text{ кВт.}$$

Порівняння потенційних джерел розосередженої генерації та визначення напрямку проектування

Таким чином, у результаті виконаних розрахунків отримано потенційні осяги вироблення електроенергії в умовах ПГЗК, які систематизовано у табл. 12.

Таблиця 12

Прогнозовані обсяги вироблення електроенергії

Тип електростанції	Потужність, кВт
Вітрова електростанція	25720
Сонячна електростанція (СЕС)	20000
Мікро-ГЕС	82,68
Мікро-ГАЕС	396

Як видно з таблиці, найбільш перспективними з розглянутих альтернативних джерел є вітрова та сонячна електростанції.

Порівнюючи ці два основних джерела розосередженої генерації в умовах залізничних підприємств, можна відміти їх переваги і недоліки.

До загальних переваг побудови ВЕС можна віднести більш рівномірний графік добового

навантаження та значно вищий коефіцієнт використання встановленої потужності. В той же час, для СЕС характерні більш швидкі терміни будівництва та окупності. Це пояснюється значно вищими вітровими навантаженнями, яких зазнають мачти вітрових установок при експлуатації, та, відповідно, значно більшими витратам при спорудженні їх фундаментів.

Найбільш раціональним місцем встановлення ВЕС та СЕС є відвали розкривних гірських порід. Дослідження сучасного стану відвалів Інгулецького гірничозбагачувального комбінату (який, як і ПГЗК, розробляє поклади Криворізького залізрудного басейну) дають інформацію про їх мінералогічний склад: переважно пухкі кайнозойські породи, некондиційні та окислені кварцити [28]. Зважаючи на те, що обидва підприємства працюють в межах одного залізрудного басейну, склад відвалів Полтавського ГЗК очікується схожим. Зважаючи на сказане, а також враховуючи, що значну частку відвалів складають відходи сухої магнітної сепарації, можна зазначити, що згідно з [22] виникає необхідність побудови підсиленних фундаментів. Це значно підвищить і без того високі, порівняно з СЕС капіталовкладення. При цьому, за розрахунками, буде використано всю можливу потенційну робочу площу.

Висновки

Проведені дослідження показують, що для побудови СЕС з встановленою потужністю на 22% меншою за потужність вітрової станції, буде задіяно лише 14% відсотків робочих площ. Зважаючи на подальший потенціал розвитку та прогнозовано менші капіталовкладення за рахунок відсутності необхідності проведення pracеvміcтких робіт з укріплення фундаментів, при розбудові систем електропостачання з використанням ВДЕ вибір робити слід на користь СЕС. Спорудження гідроспоруд, не потребує значних капіталовкладень: турбіни мікро-ГЕС встановлюють в місцях витоку відкачуваних вод, дамба ГАЕС може бути сформована в процесі поточного складування відходів, проте рівні їх генерації порівняно незначні.

Перелік використаних джерел

- [1] На межі існування: як війна змінює український промисловий сектор. URL: <https://www.unian.ua/economics/other/viyna-proti-rosiji-yak-viyna-zminyuye-ukrajinskiy-promisloviy-sektor-ostanni-novini-11928213.html> (дата звернення: 15.11.2024).
- [2] Енергетика України у червні 2024 р. URL: <https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-PAKT-12.pdf> (дата звернення: 04.11.2024).
- [3] Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : Розпорядження Кабінету міністрів України від 13 серпня 2024 р.

- №761-p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 15.12.2024).
- [4] Creating the zero-carbon mine / Legge H., Müller-Falcke C., Nauc'ler T., Ostgren E. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/creating-the-zero-carbon-mine> (дата звернення: 17.01.2025).
- [5] Integrating renewable energy into mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches / T. Igogo et al. *Applied Energy*. 2021. Vol. 300. Article 117375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117375>.
- [6] Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential / McLellan B.C., Corder G.D., Giurco D.P., Ishihara K.N. *Journal of Cleaner Production*. 2012. Vol. 32. Pp. 32-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.016>.
- [7] Abbaspour H., Abbaspour F. Renewable energy systems in the mining industry: a literature review and research agenda. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2022. Vol. 12. Pp. 569-580. DOI: <http://dx.doi.org/10.20508/ijrer.v12i1.12828.g8438>.
- [8] Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges / X. Li et al. *Energy Strategy Reviews*. 2024. Vol. 56. Article 101597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101597>.
- [9] Strazzabosco A., Gruenhagen J.H., Cox S. A review of renewable energy practices in the Australian mining industry. *Renewable Energy*. 2022. Vol. 187. Pp. 135-143. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.021>.
- [10] Choi Y., Song J. Sustainable development of abandoned mine areas using renewable energy systems: a case study of the photovoltaic potential assessment at the tailings dam of abandoned sangdong mine, Korea. *Sustainability*. 2016. Vol. 8. Article 1320. DOI: <https://doi.org/10.3390/su8121320>.
- [11] Baig M.H., Surovtseva D., Halawa E. The potential of concentrated solar power for remote mine sites in the northern territory, Australia. *Journal of Solar Energy*. 2015. Article 617356. Pp. 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/617356>.
- [12] Сінчук І.О. Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук : ПП Щербатих О.В., 2018. 166 с.
- [13] Сінчук О.М., Сінчук І.О., Дозоренко О.В. Діагностика та прогнозування рівнів електроспоживання залізрудних копалин. *Мікросистеми, електроніка та акустика*. 2019. Том. 24, №2(109). С. 25-32. DOI: <https://doi.org/10.20535/2523-4455.2019.24.2.169731>.
- [14] Півняк Г.Г., Білий М.М., Бажін Г.М. Електропостачання гірничих підприємств: Довідковий посібник. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2008. 550 с.
- [15] Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines / O. Sinchuk et al. *Mining of Mineral Deposits*. 2021. Vol. 15 (4). Pp. 25-33. DOI: <https://doi.org/10.33271/mining15.04.025>.
- [16] Дозоренко О.В. Енергоефективна система електропостачання територіально віддалених споживачів електричної енергії гірничозбагачувальних комбінатів: дис. ... д-ра філософії : 141. Кривий Ріг, 2022. 244 с.
- [17] Основи вітроенергетики : підручник / Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П., Нойбергер Н., Ципленков Д.В. Дніпропетровськ : НГУ, 2015. 335 с.
- [18] Головки В.М. Вітроенергетика : навч. посіб. для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 88 с.
- [19] Погода Кременчук. URL: <https://meteopost.com/city/19860/ua/> (дата звернення: 10.01.2025).
- [20] Українські енергетичні системи. URL: <https://enersun.com.ua/ua/vetrogeneratory/> (дата звернення: 15.01.2025).
- [21] Eurowind Energy [Online]. Available: <https://eurowindenergy.com/our-projects> (дата звернення: 15.12.2024).
- [22] ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій. [Чинний від 2000-08-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство палива та енергетики України, 2000. 50 с.
- [23] Risen Solar technology. URL: https://storage.ua.prom.st/1328014_risen_375_mhpc.pdf (дата звернення: 01.11.2024).
- [24] Риндюк Д.В., Шелешей Т.В., Беднарська І.С. Нетрадиційні джерела енергії. Практичні заняття : навч. посіб. для студ. першого рівня вищої освіти (бакалавр) спеціальності 144 «Теплоенергетика». Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 81 с.
- [25] ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівельна кліматологія. [Чинний від 2011-11-01]. Вид. офіц. Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2011. 83 с.
- [26] Powerspout TRG – Turgo turbine. URL: <https://www.esolar.co.nz/products-1/powerspout-hydro-trg> (дата звернення: 01.11.2024).
- [27] Зима Т.І., Хлапук М.М. Гідротехнічні споруди: інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. Рівне : НУВГП, 2009. 210 с.
- [28] Губіна В.Г. Сучасний стан відвалів Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату. *Геохімія техногенезу*. 2023. Вип. 9. С. 43-49. DOI: <https://doi.org/10.32782/geotech2023.37.07>.

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL OF RENEWABLE ENERGY SOURCES
IN THE CONDITIONS OF IRON-MINING ENTERPRISES

Yakymets S.M.	PhD (Engineering), Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5043-3566 , e-mail: ysm.krnu.et@gmail.com ;
Khodakovskiy M.S.	student, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Kremenchuk;
Oliynichenko M.Yu.	postgraduate student, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Kremenchuk, ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6651-0175 , e-mail: oliynichenko@kdu.edu.ua ;
Chorna V.O.	PhD (Engineering), associate professor, SHEI «Priazovskiy state technical university», Dnipro, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3641-4152 , e-mail: chornajav@gmail.com

The modern world is facing a double energy crisis: on the one hand, fossil fuel reserves are being depleted, and on the other hand, the level of environmental pollution is growing. In countries where coal and oil remain the main sources of energy, this problem is particularly acute, as dependence on traditional energy resources limits economic development and threatens environmental safety. The dual energy crisis is a serious challenge for the modern world, but it can be overcome through the active development of renewable energy. Investing in clean technologies, reducing fossil fuel consumption, and international cooperation in environmental security will help create a sustainable and environmentally friendly energy system of the future. For example, the metallurgical plants of the Brazilian mining company Vale S.A. located in Indonesia are fully powered by hydropower; the mining multinational Rio Tinto Group plans to invest an additional \$600 million in the construction of two 100 MW solar power plants in Pilbara by 2026. The situation in Ukraine's mining and metals sector is currently extremely difficult. The sector, which until February 24, 2022 accounted for the majority of the country's exports, is on the brink of survival. With the loss of Azovstal and Ilyich Iron and Steel Works of Mariupol, the economy simultaneously lost more than 40% of its metal production. Other metallurgical enterprises reduced production due to the fighting, operating at only 20%. Inhulets, Pivdennyi and Pivdennyi mining and processing plants (MPPs) in Kryvyi Rih periodically suspend their operations, and production of MPPs of the Ferrexpo group, which includes Poltava, Bilanivske and Yeristovo MPPs, decreased by 47% [1]. Blocked seaports, logistical restrictions, and a 70% increase in Ukrzaliznytsia's freight tariffs have worsened the already difficult situation of the industry. Along with the extractive industry, the energy sector of Ukraine has been under terrorist attacks for three years. World Bank experts estimate the country's losses at over UAH 4.4 trillion. 80% of thermal generation, almost 100% of hydropower, most wind power plants, and half of photovoltaic power plants have been destroyed [2]. The minimum safety margin is provided by the nuclear power industry, which also suffered a significant loss - the seizure of the largest nuclear power plant in Ukraine and Europe, the Enerhodar NPP, by nuclear terrorists. In such critical conditions for the country, the issue of further development of nuclear generation, dispersal (decentralization) of electricity generation and protection against destruction of energy infrastructure facilities is more acute than ever. The main sources of raw materials for the Ukrainian iron ore industry are three basins: Bilozersky Iron Ore District (Zaporizhzhia region); Kerch Iron Ore Basin; and Kryvyi Rih Iron Ore Basin. The latter includes not only the iron ore mines of Kryvyi Rih. Kryvyi Rih, as well as a number of GOKs located in Horishni Plavni (producing ore within the Kryvyi Rih-Kremenchuk structural and metallogenic zone). Taking into account the fact that the contribution of the enterprises of the Bilozersky and Kerch basins to the total ore production is less than 10%, and that the enterprises of Kryvyi Rih and Horishni Plavni operate, in fact, within the same basin, the general analysis in this paper is based on the production data of the Ferrexpo Poltava Mining Group. This will allow us to formalize the conclusions for all iron ore enterprises with an open-pit mining method with sufficient reliability. This paper presents a comparative analysis of the potential of renewable energy sources in the context of PJSC Poltava Mining and Processing Plant based on the calculations performed. It is established that the most promising direction for the development of distributed generation is wind and solar power plants. Taking into account the peculiarities of operation, it is recommended to focus on the construction of photovoltaic stations in the considered conditions.

Keywords: renewable energy, solar panels, wind power plant, energy, potential, generation, iron ore enterprise.

References

- | | |
|---|--|
| <p>[1] Na mezhi isnuvannia: yak viina zminiue ukrainskyi promyslovyy sektor (On the brink of existence: how the war is changing the Ukrainian industrial sector). [Online]. Available: https://www.unian.ua/economics/other/viyna-proti-rosiji-yak-viyna-zminyuye-ukrajinskiy-promisloviy-</p> | <p>sektor-ostanni-novini-11928213.html. Accessed on: November 15, 2024.</p> <p>[2] Enerhetyka Ukrainy u chervni 2024 r. (Ukraine's energy sector in June 2024). [Online]. Available: https://razumkov.org.ua/images/2024/07/11/2024-PAKT-12.pdf. Accessed on: November 04, 2024.</p> |
|---|--|

- [3] Rozporiadzhennia №761-r Kabinetu ministriv Ukrainy (13 serpnia 2024). *Pro zatverdzhennia Natsionalnoho planu dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku ta planu zakhodiv z yoho vykonannia* [Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine №761-p (August 13 2024). On approval of the National Renewable Energy Action Plan for the period up to 2030 and the action plan for its implementation.] Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>. Accessed on: December 15, 2024.
- [4] H. Legge, C. Müller-Falcke, T. Nauck, and E. Ostgren, «Creating the zero-carbon mine», 2021. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/creating-the-zero-carbon-mine>. Accessed on January 17, 2025.
- [5] T. Igogo, K. Awuah-Offei, A. Newman, T. Lowder, and J. Engel-Cox, «Integrating renewable energy into mining operations: opportunities, challenges, and enabling approaches», *Applied Energy*, vol. 300, article 117375, 2021. doi: **10.1016/j.apenergy.2021.117375**.
- [6] B.C. McLellan, G.D. Corder, D.P. Giurco, and K.N. Ishihara, «Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential», *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, pp. 32-44, 2012. doi: **10.1016/j.jclepro.2012.03.016**.
- [7] H. Abbaspour, and F. Abbaspour, «Renewable energy systems in the mining industry: a literature review and research agenda», *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 12, pp. 569-580, 2022. doi: **10.20508/ijrer.v12i1.12828.g8438**.
- [8] X. Li, Q. Gu, Q. Wang, J. Luo, D. Liu, and Y. Chang, «Renewable energy in the mining industry: Status, opportunities and challenges», *Energy Strategy Reviews*, vol. 56, article 101597, 2024. doi: **10.1016/j.esr.2024.101597**.
- [9] A. Strazzabosco, J.H. Gruenhagen, and S. Cox, «A review of renewable energy practices in the Australian mining industry», *Energy Strategy Reviews*, vol. 56, article 101597, 2024. doi: **10.1016/j.esr.2024.101597**.
- [10] Y. Choi, and J. Song, «Sustainable development of abandoned mine areas using renewable energy systems: a case study of the photovoltaic potential assessment at the tailings dam of abandoned sangdong mine, Korea», *Sustainability*, vol. 8, article 1320, 2016. doi: **10.3390/su8121320**.
- [11] M.H. Baig, D. Surovtseva, and E. Halawa, «The potential of concentrated solar power for remote mine sites in the northern territory, Australia», *Journal of Solar Energy, Journal of Solar Energy*, article 617356, pp. 1-10, 2015. doi: **10.1155/2015/617356**.
- [12] I. O. Sinchuk, *Komentar do stanu elektroenerhetyky zalizorudnykh pidpriemstv yak sehmenta yikh konkurento-spromozhnosti* [Commentary on the state of the electric power industry of iron ore enterprises as a segment of their competitiveness]. Kremenчук, Ukraine: PE Shcherbatykh O.V. Publ., 2018. (Ukr.)
- [13] O.M. Sinchuk, I.O. Sinchuk, and O.V. Dozorenko, «Diahnostyka ta prohozuvannia rivniv elektrospozhyvannia zalizorudnykh kopalen» [«Diagnostics and forecasting of the levels of electricity consumption of iron ore mines»], *Mikrosystemy, elektronika ta akustyka – Microsystems, electronics and acoustics*, vol. 24, № 2(109), pp. 25-32, 2019. doi: **10.20535/2523-4455.2019.24.2.169731**. (Ukr.)
- [14] G.G. Pivnyak, M.M. Bilyi, and G.M. Bazhin, *Elektropostachannia hirnychyykh pidpriemstv: Do-vidkovyi posibnyk* [Electricity supply of mining enterprises: A reference manual]. Dnipropetrovsk, Ukraine: National Mining University Publ., 2008. (Ukr.)
- [15] O. Sinchuk et al., «Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines», *Mining of Mineral Deposits*, vol. 15 (4), pp. 25-33, 2021. doi: **10.33271/mining15.04.025**.
- [16] O.V. Dozorenko, «Enerhoefektyvna systema elektropostachannia terytorialno viddalenykh spozhyvachiv elektrychnoi enerhii hirnychozbahachuvalnykh kombinativ» [«Energy-efficient power supply system for geographically remote consumers of electricity at mining and processing plants»], PhD thesis, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine, 2022. (Ukr.)
- [17] G. Pivnyak, F. Shkrabets, N. Neuberger, and D. Tsyplenkov, *Osnovy vitroenerhetyky : pidruchnyk* [Fundamentals of wind power : textbook]. Dnipropetrovsk, Ukraine: NGU Publ., 2015. (Ukr.)
- [18] V.M. Holovko, *Vitroenerhetyka : navch. posib. dlia studentiv spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika, elektromekhanika»* [Wind power engineering : a textbook for students of specialty 141 «Electric power engineering, electrical engineering, electromechanics»]. Kyiv, Ukraine: KPI Igor Sikorsky Polytechnic Institute Publ., 2019. (Ukr.)
- [19] Pohoda Kremenчук (Weather in Kremenчук) [Online]. Available: <https://meteopost.com/city/19860/ua/>. Accessed on: January 10, 2025. (Ukr.)
- [20] Ukrainski enerhetychni systemy (Ukrainian energy system) [Online]. Available: <https://enersun.com.ua/ua/vetrogeneratory/>. Accessed on: January 15, 2025. (Ukr.)
- [21] Eurowind Energy [Online]. Available: <https://eurowindenergy.com/our-projects>. Accessed on: January 15, 2025.
- [22] *Pravyla proektuvannia vitrovyykh elektrychnykh stantsii* [Design rules for wind power plants], HKD 341.003.001.002-2000, Aug. 2000.
- [23] Risen Solar technology [Online]. Available: https://storage.ua.prom.st/1328014_risen_375_mhcp.pdf. Accessed on November 01, 2024.

- [24] D.V. Ryndiuk, T.V. Sheleshei, and I.S. Bednarska, *Netradytsiini dzherela enerhii. Praktychni zaniattia : navch. posib. dlia stud. pershoho rinvnia vyshchoi osvity (bakalavr) spetsialnosti 144 «Teploenerhetyka»* [Non-traditional energy sources. Practical classes : a textbook for students of the first level of higher education (bachelor) specialty 144 «Heat and Power Engineering»]. Kyiv, Ukraine: KPI Igor Sikorsky Polytechnic Institute Publ., 2022. (Ukr.)
- [25] *Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivelna klimatolohiia* [Protection from dangerous geological processes, harmful operational influences, and fire. Building climatology], DSTU-N B V.1.1-27:2010, Nov. 2011. (Ukr.)
- [26] Powerspout TRG - Turgo turbine [Online]. Available: <https://www.esolar.co.nz/products-1/powerspout-hydro-trg>. Accessed on: November 11, 2024.
- [27] T.I. Zyma, and M.M. Khlapuk, *Hidrotekhnichni sporudy: interaktyvnyi kompleks navchalno-metodychnoho zabezpechennia* [Hydraulic structures: an interactive complex of educational and methodological support]. Rivne, Ukraine: NUWHP Publ., 2009. (Ukr.)
- [28] V.G. Gubina, «Suchasnyi stan vidvaliv Inhuletskoho hirnycho-zbahachuvalnoho kombinatu» [«The current state of the dumps of the Ingulets mining and processing plant»], *Heokhimiia tekhnohenezu – Geochemistry of technogenesis*, iss. 9, pp. 43-49, 2023. doi: 10.32782/geotech2023.37.07.
- Стаття надійшла 15.03.2025
Стаття прийнята 02.04.2025
Стаття опублікована 30.06.2025

Цитуйте цю статтю як: Оцінка потенціалу джерел відновлюваної енергетики в умовах залізорудних підприємств / Якимець С.М., Ходаковський М.С., Олійніченко М.Ю., Чорна В.О. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2025. Вип. 50. С. 140-153. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.50.2025.336322>.