

УДК 621.311.1

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/40>

Сінчук О.М.

Криворізький національний університет

Бойко С.М.

Криворізький національний університет

Некрасов А.В.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

Ножнова М.О.

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

Онищенко А.О.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ НА ОСНОВНІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Метою цієї роботи є аналіз факторів, що впливають на основні енергетичні показники вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств. Зважаючи на те, що залізорудна сировина видобувається як відкритим (кар'єр), так і підземним (шахта, рудник) способами, при цьому займаючи великі площі, що непридатні для сільськогосподарських робіт, ці підприємства мають стати полігоном для впровадження вітроенергетичних станцій в структури розподільчих систем цих підприємств. Гірничорудні підприємства відносяться до класу енергоємних, а у світі постійно йде конкурентна боротьба за ринки збуту залізорудної сировини, оскільки залізорудна промисловість займає важливе місце в економіці багатьох країн світу. Тому можна вважати актуальною науково-практичною задачею розроблення теоретичних засад, математичних моделей і методів для впровадження вітроенергетичних станцій в структуру комплексу електропостачання цих підприємств. Таким чином, в умовах гірничорудних підприємств є можливість та актуальність побудови вітроенергетичних станцій, однак їх експлуатація має свою специфіку, яку необхідно враховувати під час їх проектування та експлуатації. У статті викладено специфіку проектування вітроенергетичних станцій та фактори, що впливають на їх основні енергетичні характеристики.

Ключові слова: вітроенергетичні станції, енергетичне обладнання, електропостачання гірничорудних підприємств, фактори впливу на основні енергетичні характеристики вітроенергетичних станцій.

Постановка проблеми. Аналіз досягнень сучасної енергетики показує, що децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів. Зазвичай витрати на передачу енергії сягають 30% від вартості її вироблення [1].

Між тим, освоєння потенціалу відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), особливо вітроенергетичних станцій (ВЕС), – це завдання, яке на цей час важко реалізувати технічно, оскільки воно пов'язане з низькою щільністю потоку енергії від

ВДЕ і залежністю їх від природних умов. Вартість отримання енергії, хоча вона і знижується щорічно, залишаються значно вище, ніж у традиційних енергоресурсів, а необхідних кардинальних технічних рішень поки не існує.

Технологічне об'єднання енергії ВЕС і енергії вуглеводневого палива в одній системі має суттєві техніко-економічні переваги. Ця перевага полягає у високій енергетичній ефективності, недосяжній у наявних системах енергопостачання, в простоті інтеграції з додатковими генеруючими потужностями на основі ВЕС з будь-яким ступенем заміщення.

Зважаючи на те, що залізорудна сировина видобувається як відкритим (кар'єр), так і підземним (шахта, рудник) способами, при цьому займаючи великі площі, що непридатні для сільськогосподарських робіт, залізорудні підприємства мають стати полігоном для впровадження ВЕС в структури розподільчих систем цих підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Наявні методики для проектування системи електропостачання віддалених споживачів в основному розглядають як альтернативу централізованому електропостачанню, електропостачання за рахунок генерації електроенергії на ВДЕ, у тому числі ВЕС, або за рахунок використання котелень, дизель-генераторів.

У ряді попередніх досліджень автори обґрунтовують необхідність оптимізації режимів роботи електричного обладнання гірничорудних підприємств (ГРП) під час застосування ВЕС, за критеріями економічності та ефективності передбачає формування ефективних режимів в умовах постійного зростання навантаження електроспоживачів та збільшення реального складника спожитої електричної енергії (ЕЕ), згенерованої під час використання ВДЕ [2-8].

Враховуючи той факт, що ГРП належать до класу енергоємних, у світі постійно йде конкурентна боротьба за ринки збуту залізорудної сировини (ЗРС), оскільки залізорудна промисловість займає важливе місце в економіці багатьох країн світу, можна вважати актуальною науково-практичною задачею розроблення теоретичних засад, математичних моделей і методів для впровадження ВЕС у структуру комплексу електропостачання-електроспоживання ГРП.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз факторів, що впливають на основні енергетичні показники вітроенергетичних станцій, що експлуатуються в умовах гірничорудних підприємств.

Виклад основного матеріалу. Із наведеної вище формули майже зрозуміло, крім степені k . Значення k в багатьох роботах приймається $k=0,143$. У нормативних документах рекомендують $k=0,2$. В США, для різних місць представлені значення від 0,2 до 0,26. Під час вимірів на різних висотах значення k сягає 0,34. В окремих працях для України використовується $k=0,167$. Тим не менш підбір значень потребує обережності [1].

Оскільки місцем для встановлення вітроенергетичної станції розглядається відвал, що являє собою повністю відкритий ландшафт, то степеневий показник шерохватості приймаємо 0,2.

Питома щільність повітря ρ не є сталою величиною і залежить від тиску, температури і кількості водяної пари в повітрі. Щільність водяної пари менше щільності сухого повітря, тому вологе повітря за того ж тиску буде мати меншу щільність, ніж сухе. Якщо розглядати повітря як ідеальний і сухий газ, то залежність щільності повітря від тиску і температури набуває такого вигляду:

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \quad (1)$$

де p – тиск повітря; R_s – питома газова стала; T – температура повітря.

За умови нормального атмосферного тиску (на рівні моря $p_0 = 101\,325$ Па) і температурі повітря 0°C отримуємо:

$$\rho_0 = \frac{p}{R_s \cdot T} = \frac{101325}{287,058 \cdot 273,15} = 1,292 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \quad (2)$$

Під час розробки деяких покладів корисних копалин в атмосферу кар'єру можуть виділятися газоподібні радіоактивні речовини, основним з яких є радон, утворений під час розпаду радія. Вміст у повітрі робочої зони шкідливих газів і парів відповідно до вимог не має перевищувати певних норм.

Під час розробки корисних копалин в атмосферу кар'єрів виділяється такий пил, який являє собою маленькі тверді крупини розміром менше 0,1–0,5 мм. Він може бути отруйним чи не отруйним.

Оскільки наявність пилу у повітрі дуже впливає на густину повітря, то основними характеристиками, які визначають мікроклімат кар'єрів, накопичення і виніс шкідливостей, являються швидкість повітря, його температурний режим і вологість атмосфери.

Швидкість повітря в кар'єрах визначається швидкістю повітря на поверхні і температурним режимом кар'єрів. За швидкості вітру на поверхні більше 2 м/с вона визначається енергією вітрового потоку, за меншій – термічним фактором. Існує добовий і річний період зміни швидкості вітру на поверхні, швидкість вітру в кар'єрі зазвичай менша, ніж на поверхні. Термічні сили, які викликані прогрівом або охолодженням повітря, можуть суттєво змінювати швидкість повітря в кар'єрі і формувати повітряні горизонтальні потоки до 3 м/с, а висхідні – до 5 м/с [2–4].

Температура повітря в кар'єрі визначається температурою повітря на поверхні, адіабатичним

зчепленням повітря, тепловіддаючими і теплопоглинаючими процесами в кар'єрах і станом його атмосфери. Вона також змінюється протягом доби та за рік. Зазвичай температура повітря в кар'єрі вище, ніж на поверхні, внаслідок природного стискування, нагріву порід сонцем і наявності додаткових джерел тепла (машин і механізмів), причому у північній сторони температура повітря вище, ніж у південній сторони.

Висока вологість повітря в кар'єрі сприяє утворенню в них туману та паморосі, що зменшують видимість, ускладнюють ведення гірничих робіт і ослаблюють прогрів бортів, що знижує конвективний повітряний обмін у кар'єрах. Збільшенню вологості сприяють деякі заходи та технологічні процеси: зрошення вибухової гірничої маси, отвалів, доріг, гасіння пожеж, застосування гідромеханізації, дренаж підземних вод. Зміна відносної вологості має добовий та річний період.

Кар'єр є частиною земної поверхні. Тому повітрообмін в ньому у значному ступені визначається тим же фактором, що і повітрообмін над земною поверхнею загалом: швидкістю вітру і розподілом температури в приземному шарі повітря.

Найбільш ефективно провітрюється кар'єр під час застосування вітрової енергії, причому, чим вище швидкість вітру, тим краще провітрювання. В цьому разі в кар'єрі утворюється або вільний,

або напівграничний струмінь, який виносить все з кар'єра. Вільний струмінь утворюється за великого кута відкоса борта кар'єру і тому зустрічається частіше, ніж напівграничний. Схема провітрювання вільним струменем називається рециркуляційною, оскільки наявність зворотного струменя другого роду приводить до багатократної циркуляції (рециркуляції) деякої частки повітря в об'ємі кар'єру. При цьому вільний струмінь буде приносити до борту шкідливі речовини. Частина цих шкідливих речовин знову вступає в зону ОВСО, що з часом може привести до накопичення тут шкідливих речовин, тому ця зона називається застійною або мертвою [5].

Під штучною вентиляцією кар'єру розуміють інтенсифікацію атмосферного обміну в ньому будь-якими цілеспрямованими діями людини.

Штучна вентиляція кар'єру необхідна в випадках, коли інтенсивність повітрообміну в кар'єрі виявляється недостатньою для підтримки нормального санітарно-гігієнічного стану атмосфери в місцях ведення робіт.

Умови, що сприяють накопиченню шкідливих речовин у кар'єрі, такі:

- зменшення енергії вітрового потоку на поверхні;
- вертикальний температурний градієнт – менш адиабатичний;

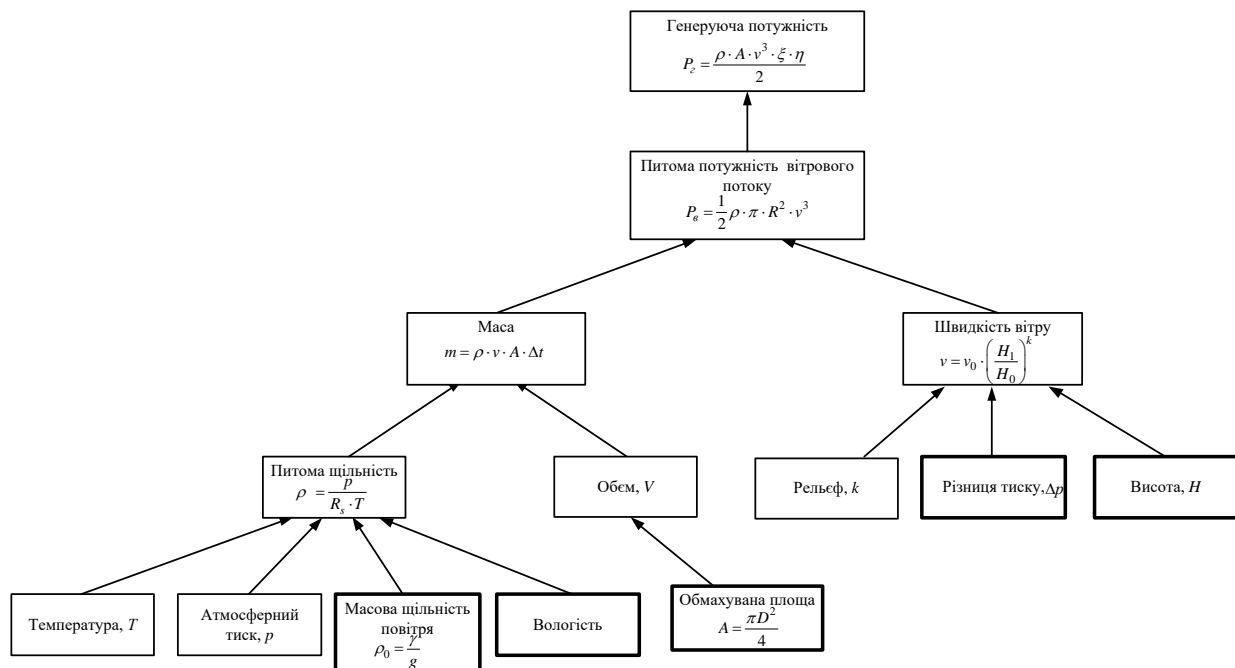


Рис. 1. Фактори впливу на основні енергетичні показники вітроенергетичної станції:
 D – діаметр вітроколеса; γ – питома вага повітря; g – прискорення сили тяжіння;
 R_s – питома газова стала; v_0 – швидкість вітру на заданій висоті; H_1 – задана висота; H_0 – висота виміру;
 ξ – коефіцієнт використання енергії вітру; η – коефіцієнт корисної дії генератора

– підвищення інтенсивності виділення шкідливих речовин у атмосферу кар'єри.

Зменшення енергії вітрового потоку на поверхні є основним фактором, який сприяє накопиченню шкідливих речовин у атмосфері кар'єра. Вище було зазначено, що за швидкості повітря на поверхні менше 2 м/с повітряний обмін між атмосферою кар'єра і поверхнею значно скорочується.

Підвищення інтенсивності виділення шкідливих речовин за наявних технологічних процесів у кар'єрах зазвичай пов'язане з виробництвом вибухових робіт, за яких в атмосферу кар'єра викидається велика кількість отруйного газу та пилу.

Способи штучної вентиляції кар'єрів поділяються на два класи: способи інтенсифікації природного повітряного обміну та способи власної штучної вентиляції [4].

До способів власної штучної вентиляції кар'єрів належать:

- вентиляція за допомогою труб та виробок;
- вентиляція вільними струменями, які створюються спеціальними вентиляторними установками.

Способи штучної вентиляції кар'єрів можуть бути також розділені на способи місцевої та загальнообмінної вентиляції.

Аналізуючи все вищезазначене, можна зробити висновок, що запыленість суттєвого впливу на генерацію електричної енергії за допомогою ВЕУ не буде мати.

Підсумовуючи, всі вищезазначені фактори впливу на основні енергетичні показники ВЕС можна показати у вигляді структури, яка зображена на рис. 1.

Значний вплив на характер затінення здійснює мінливість напрямку вітру протягом інтервалу вимірювання, яка реально спостерігається в

умовах вітрового поля ВЕС. Отже, відстань L між центрами поверхні обмаху та зони затінення (або кут ψ відхилення вітру від напрямку на ВЕУ) має сприйматися як випадкова величина з певними числовими характеристиками.

Як показують практичні дослідження на ряді зарубіжних ВЕС, у разі розташування в ряд декількох ВЕУ найбільший спад швидкості в разі напрямку вітру вздовж ряду спостерігається на другій в ряду (першій з затінених) установці, надалі він зменшується, а на рівні 5–6 ВЕУ вітровий потік практично стабілізується [3].

На вітчизняних ВЕС, побудованих на базі ВЕУ типу USW56-100, відстані між сусідніми ВЕУ в ряду становлять іноді 1,5–2,0 D (у світовій практиці відстані менше $4D$ не практикуються). За напрямку вітру вздовж ряду агрегати працюють зазвичай через один для уникнення впливу взаємозатінення, тому отримати практичні результати для розташованих поряд ВЕУ досить складно. Більш стабільний результат можна отримати, порівнюючи роботу ВЕУ в різних рядах за фронтального напрямку вітру, тобто за умови затінення одного ряду іншим. До речі, такий напрям вітру спостерігається найчастіше, таке орієнтування рядів ВЕУ під час проектування ВЕС [2].

Для максимального використання вітрового потоку рекомендується розміщувати ВЕС рядами, перпендикулярними переважному напрямку вітру, на відстані $4D$ один від одного. Однак у разі поздовжнього вітру ($\varphi 0 - \varphi \approx 0^\circ$) їх показники значно гірші. Так, втрата швидкості вітру на 20–30% спричинить зменшення потужності ВЕУ на 30–40% і більше, залежно від абсолютних значень швидкості вітру. Якщо ж напрям вітру може рівномірно змінюватися, то ВЕС доцільно розміщувати в шаховому порядку між сусідніми станціями $4D$.

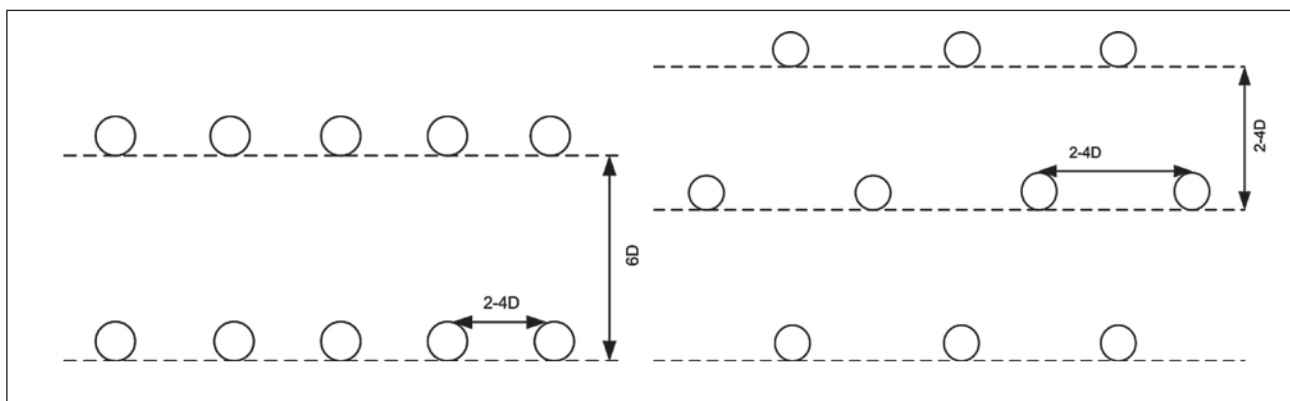


Рис. 2. Лінійна дворядка схема та лінійна шахова рівномірна схема

Тоді в першому випадку на площі S_T можна розмістити $S_T/(20D)^2$ установок, які дозволять отримати за рік ($T = 8760$ год/рік) енергію, яка рівна:

$$W_T = \frac{P_{cp}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2} \quad [кВт \cdot год/рік], \quad (3)$$

або

$$W_T = \frac{\pi}{8000} D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2} \quad [кВт \cdot год/рік]. \quad (4)$$

У другому випадку можна розмістити $S_T/(100D^2)$ установок, яка забезпечать технічний потенціал енергії вітру території:

$$W_T = \frac{P_{cp}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2} \quad (5)$$

або з урахуванням градації вітру V_i :

$$W_T = \frac{\pi}{8000} D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2} \quad (6)$$

Як бачимо, технічний потенціал вітрової енергії не залежить від діаметру i , відповідно, від одичної потужності вітроустановок.

Висновки. В умовах гірничорудних підприємств є можливість та актуальність побудови вітроенергетичних станцій, однак їх експлуатація має свою специфіку, яку необхідно враховувати під час їх проектування та експлуатації.

У статті викладено специфіку проектування вітроенергетичних станцій та фактори, що впливають на їх основні енергетичні характеристики.

Список літератури:

1. Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): монографія. Кривий Ріг : Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.
2. Shumilova G.P., Gotman N.E., Startceva T.B. Electrical load forecasting using an artificial intelligent methods // RNSPE, 10-14 September, 2001, Proceedings. Kazan: Kazan State Power Eng. University, 2001. Vol. I. P. 440-442.
3. Baumann T., Germond A. Application of the Kohonen Network to Short-Term Load Forecasting. IEEE 0-7803-1217-1. 1993. P.407-412.
4. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer 2014. 396 p.
5. Кудря С.О. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, сонця і теплоти землі для отримання водню при електролізі води / С.О. Кудря, Ю.П. Морозов, М.П. Кузнєцов. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях: тези доп. наукової звітної сесії НАН України*. Київ, 2013. С. 30.
6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України / Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П. та інші. НАН України, державний комітет України з енергозбереження. Київ : 2001. 41 с.
7. Лежнюк П.Д., Комар В.О., Собчук Д.С. Оцінювання впливу на якість функціонування локальної електричної системи відновлюваних джерел електроенергії. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2013. Вип. 141. С. 8–10.
8. НЕК «Укренерго»: Офіційний сайт. URL: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua>.

Sinchuk O.M., Boiko S.M., Nekrasov A.V., Noznova M.O., Onichenko A.O.

ANALYSIS OF FACTORS INFLUENCE ON BASIC ENERGY CHARACTERISTICS OF WIND POWER PLANTS OPERATED IN MINING ENTERPRISES

An analysis of the achievements of modern energy shows that decentralized grid systems using distributed generation sources can be an extremely profitable area for investment, if it is possible to place energy sources near consumers. Generally, energy transmission costs reach 30% of the cost of generating energy. Meanwhile, harnessing the potential of renewable energy sources, especially wind power stations, is a technically difficult task nowadays that is associated with low energy flux density from renewable energy sources and their dependence on natural conditions. Although energy costs are reduced annually, the cost of obtaining energy remains much higher than traditional energy resources, and the necessary fundamental technical solutions do not yet exist. The purpose of this work is to analyze the factors affecting the main energy performance of wind power stations operated in mining enterprises. Due to the fact that iron ore is extracted both open (quarry) and underground (mine, mine), while occupying large areas that are unsuitable for agricultural work, these enterprises should become a training ground for the introduction of wind power stations in distribution structures systems of these enterprises. Mining companies are energy-intensive, and the world is constantly competing for the markets for iron ore, since the iron ore industry is an important place in the economy of many

countries in the world. Therefore, it can be considered an urgent scientific and practical task of developing theoretical foundations, mathematical models and methods for the introduction of wind power stations in the structure of the power supply complex of these enterprises. Thus, in the conditions of mining enterprises there is an opportunity and urgency to build wind power plants, but their operation has its own specificity, which must be taken into account about their design and operation. The article describes the specifics of the design of wind power plants and the factors that affect their basic energy characteristics.

Key words: *wind power stations, power equipment, power supply to mining enterprises, factors influencing the main energy characteristics of wind power plants.*