

Conclusions and future work. It was decided to install stationary hydraulic hammer ALTA GR-158 between the crushers' hoppers in the mounting cavity, which is not used during repair work, at the mark of +13,640 in the building of the large crushing corps of the mining processing plant in the Poltava region of Ukraine.

Necessity has been substantiated: (I) strengthening reinforced concrete beams MB52-1 at the mark +13,640 in the axes 4-6 and E-F; (II) installation of steel beams under the foundation of the hammer; (III) installation of shields of the fixed formwork of the hammer foundation.

The installation project, which ensures the stability of steel structures at all stages of work, must be developed in advance. After installation the entrance of railway transport to neighboring hammer railways is prohibited during the operation of the hammer.

References

1. **Turkstra C.J.** Theory of Structural Design Decisions, SM Studies Series No. 2. Ontario, Canada: Solid Mechanics Division, University of Waterloo. 1970.
2. Eurocode - Basis of structural design : EN 1990:2002+A1. - Brussels : Management Centre, 2002. - 116 c. - (European Standard).
3. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: EN 1992-1-1:2004.- Brussels: Management Centre, 2008. - 225 c. - (European Standard).
4. EN 1991-1-3. Eurocode 1 – Actions on structures. Part 3: Actions induced by cranes and machinery – Brussels: CEN, 2003. – 43 P.
5. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4-1: Silos : EN 1993-4-1. – Brussels : Management Centre, 2007. – 114 c. – (European Standard).
6. **Barashikov A.Y., Malyshev O.M.** Estimation of technical condition of building structures, buildings and structures. - K.: NMC Derznaglyadodohoronpraci Ukrainy, 1998. - 23 p.
7. DBN V.3.1-1-2002. Repair and strengthening of bearing and enclosing building constructions and bases of industrial buildings and constructions.. State Committee on Construction and Architecture of Ukraine. Kiev. 2003 - 82 pp. - (State building codes of Ukraine).
8. **Gulvanessian H. and Holicky M.** Eurocodes: Using Reliability Analysis to Combine Action Effects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings. August 2005, vol. 158, no. SB4, pp. 243—252.
9. **Skuturna, T., & Valivonis, J.** (2016). Experimental study on the effect of anchorage systems on RC beams strengthened using FRP. Composites Part B: Engineering, 91, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.001>
10. **Demir, A., Ercan, E., & Demir, D. D.** (2018). Strengthening of reinforced concrete beams using external steel members. Steel and Composite Structures, 27(4), 453-464.) DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2018.27.4.453>
11. **Helal, Y., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., & Hajirasouliha, I.** (2016). Strengthening of short splices in RC beams using post-tensioned metal straps. Materials and Structures, 49(1-2), 133-147. DOI 10.1617/s11527-014-0481-6
12. **Jin, F., & Lees, J. M.** (2019). Experimental Behavior of CFRP Strap–Strengthened RC Beams Subjected to Sustained Loads. Journal of Composites for Construction, 23(3), 04019012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000936](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000936)
13. **Lee, H. Y., Jung, W. T., & Chung, W.** (2017). Flexural strengthening of reinforced concrete beams with pre-stressed near surface mounted CFRP systems. Composite Structures, 163, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.044>
14. **Garcia, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M., Kyriakides, N., & Ciupala, M. A.** (2017). Seismic retrofitting of RC buildings using CFRP and post-tensioned metal straps: shake table tests. Bulletin of Earthquake Engineering, 15(8), 3321-3347. <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-015-9800-8>
15. **Yang, S. H., Cao, S. Y., & Gu, R. N.** (2015). New technique for strengthening reinforced concrete beams with composite bonding steel plates. Steel and Composite Structures, 19(3), 735-757. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.3.735>

УДК 621.311.1

I. О. СІНЧУК, С. М. БОЙКО, І. В. КАСАТКІНА, кандидати техн. наук, доценти,
О. В. ДОЗОРЕНКО, асп., Криворізький національний університет

АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Мета. Метою даної роботи є розробка тактики визначення вітрового потенціалу в умовах залізорудних підприємств з подальшим втіленням цього підходу до впровадження вітроенергетичних установок, як джерел автономного живлення в структурах систем електропостачання цих видів підприємств.

Методи дослідження. У статті для реалізації мети досліджень використовувалися методи аналізу та синтезу статистичних метеоданих та елементи математичної статистики.

Наукова новизна полягає в розробці тактики визначення вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств, що дозволить враховувати специфіку кожного підприємства галузі з подальшим втіленням цього підходу до впровадження вітроенергетичних установок в структурах систем електропостачання цих підприємств з реорганізацією їх структур з варіанту централізованого живлення електромереж до варіанту з розосередженою генерацією.

Практична значимість. Встановлені фактори, що впливають на визначення вітрового потенціалу локальної ділянки земної території залізрудного підприємства з урахуванням особливостей, що характерні для аналізованої проблеми та мають вплив на енергетичні характеристики вітроенергетичної установки як автономного джерела живлення. Модернізовано відомі методи визначення вітрового потенціалу, які інтегруються в універсальний метод оцінювання рівня енергоефективності вітроенергетичних установок згідно специфіки тих чи інших умов їх використання. Результати досліджень рекомендуються для використання при визначенні вітрового потенціалу залізрудних підприємств з метою розробки автономних джерел генерації електричної енергії.

Результати. Залізрудні підприємства України володіють незадіяним потенціалом вітрової енергії, що може бути задіяний для генерування електричної енергії автономними джерелами живлення у складі систем електропостачання цих підприємств. Запропонована тактика оцінювання вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств України, що дозволяє визначити проєктні встановлені електричні потужності вітроустановок в умовах специфіки енергетичних комплексів і систем цих підприємств.

Ключові слова: електропостачання, вітроенергетичні установки, вітровий потенціал, залізрудні підприємства.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Біля 30 % від загальнопромислового обсягу споживання електричної енергії (ЕЕ) в Україні відноситься до підприємств гірничорудної промисловості [1]. Це значні обсяги, які дозволяють вищезгаданим підприємствам вносити значний вклад в економіку держави. Водночас, енергетичний тягар є відчутним для економіки даних видів підприємств і без прийняття відповідних заходів щодо зниження енергоемності видобутку корисних копалин, і перш за все залізної руди, підприємства галузі, як і держава в цілому втратить своє пріоритетне місце в еліті держав – лідерів на світовому ринку залізрудної сировини (ЗРС) для металургійного виробництва.

Тобто, енергетична проблема гірничовидобувних підприємств формується як загальнодержавна і потребує прийняття ефективних заходів для її рішення.

Одним із реальних спрямувань в зниженні енергоемності видобутку ЗРС є застосування автономних джерел живлення в структурах систем електропостачання цих видів підприємств. Для цього, як свідчать результати проведених досліджень [1-2], в технології їх функціонування в достатній кількості є власні енергетичні ресурси [2-4].

Як доповнення до цієї тези додамо, що в останні роки, як у світі, так і в Україні, спостерігається стійке зацікавлення проблемами використання відновлювальних джерел енергії, серед яких значна увага приділяється вітроенергетичним установкам (ВЕУ). Частка таких систем в енергобалансі всіх технічно розвинених країн світу зростає [5].

Така спрямованість обумовлена світовою ситуацією в економіці та екології [3]. Згідно останнього, то спорудження ВЕУ потребує значних обсягів земельних відчужень. І в цьому аспекті гірничорудні підприємства мають свій позитив, оскільки технологія ведення гірничих робіт передбачає складування «пустої» породи, яка знімається з поверхні землі на шляху видобутку корисних копалин. Ця порода складається в так званих відвалах.

У породних відвалах Кривбасу на період 2020 року закладовано більше 14 млрд т розкритих порід, а площі, які вони займають, сягають більше 8 тис. га. На сьогоднішній день ні один із відвалів не рекультивовано, оскільки підприємства вважають це економічно недоцільним, адже рекультивация 1 га відвальних порід коштує 60-70 тис. доларів США. Тобто, як резюме, потрібно розуміти, що ці площі назавжди виведені з земельного обороту і не несуть перспективи їх вторинного використання для землекористування в подальшому. Тобто, по факту, це площі, які вже в своїй логіці готові для розбудови на них вітрогенеруючих систем.

Окрім цього, додатковим кінцевим моментом у цьому аспекті є і те, що висота таких відвалів сягає більше 100 м над землею поверхнею, а як відомо, збільшення енергетичного потенціалу з висотою пояснюється зростанням швидкості вітру, яка в приземному шарі змінюється за степеневим законом [4].

Разом з тим, зазначимо, що включення як вітрових так і інших видів генеруючих потужностей в структури систем електропостачання промислових підприємств створює новий тип електроенергетичних систем – системи з джерелами розосередженої генерації (ДРГ) ЕЕ [6].

Як свідчать дослідження, децентралізовані енергосистеми з використанням ДРГ є актуальними для впровадження, у тому числі, в структури електропостачання промислових підприємств і особливо їх енергоємних видів. Впровадження ДРГ дозволить зменшити втрати ЕЕ у внутрішніх електричних мережах, що сьогодні сягають майже 30 %, зменшити рівень сплати за її споживання, оскільки електрична енергія вироблена з власних ресурсів буде дешевше мінімум в 4 рази від тієї, що постачається централізовано, та, що не менш важливо, забезпечити необхідний ступінь надійності та безперебійності електропостачання.

Аналіз досліджень і публікацій. У ряді відомих досліджень їх автори обґрунтовують необхідність оптимізації режимів роботи електричного обладнання різних типів та видів підприємств при застосуванні ДРГ, за критеріями економічності та ефективності, що, в свою чергу, передбачає формування ефективних режимів функціонування енергетичного комплексу підприємства в умовах постійного зростання навантаження електроспоживачів та збільшення реальної складової спожитої ЕЕ, згенерованої при використанні ДРГ [7-14].

У працях [7-10] запропоновано впровадження відновлюваних джерел енергії в умовах загальнопромислових підприємств. Запропоновано схему оптимізації режимів функціонування енергоємних споживачів ЕЕ. Обґрунтовано, що кожний параметр загальної оптимізації вибору режимів роботи енергетичного обладнання має різний ступінь впливу.

У працях [11-20] розглянуто та запропоновано методи визначення вітрового потенціалу з врахуванням кліматичних та метеорологічних факторів. Результати цих досліджень мають певний позитив для подальшого пошуку ефективних видів ВЕУ в структурах систем електропостачання підприємств.

Між тим, в роботах залишається не розглянутим питання методології визначення вітрового потенціалу з врахуванням специфіки технологічного процесу підприємств та їх локації.

Відзначаючи значимість для вирішення проблеми підвищення енергоефективності підприємств шляхом застосування автономних джерел живлення, зазначимо, що згідно сформованої дослідниками мети досліджень, в контексті їх робіт прослідковується певна одновекторність схеми досліджень, яка є достатньою для даного дослідницького варіанту, але не є такою для застосування в інших умовах, в тому числі для підприємств зі змінними параметрами технології ведення робіт, до яких відносяться гірничі підприємства взагалі та залізрудні зокрема. На заповнення цього пробілу в аналізованій науковій сфері і спрямоване дане дослідження.

Постановка задачі. Задачею даного дослідження є розробка тактики визначення вітрового потенціалу для умов залізрудних підприємств (ЗРП) з подальшим втіленням цього підходу в практику створення та функціонування ВЕУ в умовах цих видів підприємств, як автономних джерел живлення в структурах систем електропостачання з розподільчою генерацією ЕЕ.

Виклад матеріалу та результати. Валовий потенціал локально досліджуваної узагальнованої території для розбудови ВЕУ розраховується як сумарна енергія системи вітроустановок висотою h , розподілених рівномірно по території на відстанях, що виключають взаємний вплив енергоустановок. Зазвичай вважається, що збурений вітровий потік повністю відновлюється на відстані, рівному $20h$ від ВЕС [15-17]. Ця умова визначає місця розміщення вітроустановок на мапі території підприємств. Тоді, на території площею S (m^2) протягом часу T (зазвичай рік), повна вітрова енергія всіх установок визначиться як

$$W_B = P \cdot T \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot t_i, \quad (1)$$

або

$$W_B = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \int_0^{\infty} V^3 \cdot f(V) dV, \quad (2)$$

де V_i, t_i – градації швидкості вітру і їх відносна тривалість.

Технічний вітровий потенціал території може бути визначений з врахуванням двох обставин [15].

Перша – площа території, яка придатна по хазайських і технологічних умовах для розміщення ВЕС. Тоді площа території S_T , придатної для використання вітрової енергії, рівна $S_T = q \cdot S$, де q – коефіцієнт, коефіцієнт який залежить від конкретного регіону.

Фактично S_T – це частина території S , яка може бути задіяна.

При визначенні технічного вітрової потенціалу території рекомендується притримуватись певних правил:

для вітроенергетичних станцій (ВЕС) великої потужності (більше 100 кВт), що об'єднують у собі декілька ВЕУ, коефіцієнт використання встановленої потужності повинен бути не нижче 20 %;

ефективність використання вітрової енергії збільшується з ростом потужності ВЕУ (в теперішній час їх потужність сягає 4-6 МВт);

зазвичай для розміщення ВЕС може використовуватися не більше 30 % від відведеної для цього території.

Друга обставина полягає в технічному рівні сучасних ВЕУ, який характеризує генеруючу потужність в залежності від швидкості вітру. Для мережевих ВЕС зазвичай використовують вітротурбіни з горизонтальною віссю обертання на висоті мачти 50 м. Крім технічних характеристик власне електростанцій, необхідно враховувати порядок їх розміщення по умові максимального використання енергії вітру.

Потужність ВЕС $P(V)$ з діаметром вітротурбіни D визначається за виразом

$$P(V) = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \eta(V), \quad (3)$$

де $\eta(V)$ – коефіцієнт корисної дії установки для швидкості вітру V .

Середньостатистичне значення потужності визначається як

$$P_{сеп.} = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i. \quad (4)$$

На рис. 1а зображена карта вітроенергетичного потенціалу України. Як видно з рисунку Україна здатна ефективно використовувати енергію вітру в окремих зонах при середньорічній швидкості вітру понад 5 м/с. Криворізький регіон знаходиться в зоні з середньорічною швидкістю вітру близько 4-4,5 м/с. Цієї швидкості достатньо для роботи ВЕУ, але одночасно замало для ефективного використання, що свідчить про можливість впровадження в даних регіонах ВЕУ, але для більш ефективної роботи вітроустановок необхідна більша швидкість вітру [15].

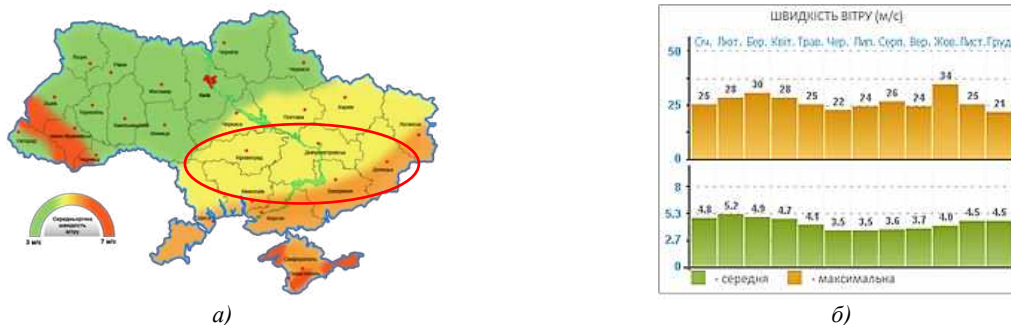


Рис. 1. Карта розподілу середньорічних вітроенергетичних ресурсів України (а) та середньомісячна швидкість вітру по метеостанції м. Кривий Ріг (б)

Тобто, зростає необхідність у виявленні найперспективніших місць використання вітрової енергії, базуючись на її кліматичному потенціалі та показниках його можливої утилізації.

Використовуючи статистичні дані було проведено аналіз середніх значення швидкості вітру по метеостанції м. Кривий Ріг (рис. 1б) [18]. Виходячи з аналізу метеоданих, можна зробити висновок, що середньорічна швидкість вітру у м. Кривий Ріг складає близько 4,25 м/с.

Дослідження аеродинамічних характеристик відвалів кар'єрів дозволило скласти наступну картину. Інтенсивність природного провітрювання кар'єрів ЗРП вітром знаходяться в залежності від швидкості вітрової потоку, що діє над кар'єром, і в зворотній від об'єму зони рециркуляції. Скорочення об'єму зони рециркуляції може бути досягнуте зменшенням кутів укосу бортирів кар'єру за рахунок раціональної черговості відробітку уступів.

Раніше, в попередніх дослідженнях авторів, була розглянута можливість розташування електроенергетичної вітроустановки на відвалах кар'єрів гірничих підприємств та схема раціонального розташування горизонтальноосьових ВЕУ на відвалах, що дозволяє досягти збільшення коефіцієнту використання вітрового потоку при будь-якому напрямі вітру на поверхні [17].

Так як встановлення ВЕС планується на відвалах ЗРП, то середньоперіодні швидкості вітру повинні бути перераховані на задану висоту відвалу (H) за формулою

$$V_H = V_n \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^m, \quad (5)$$

де m – показник степені, який залежить від швидкості вітру, і для Криворізького регіону розраховується як $m=0,6(V_n)^{-0,77}$ і складає 0,2; V_n – середньоперіодна швидкість вітру на висоті Флюгера (h).

Власне вироблення ЕЕ ВЕС протягом кожного місяця і року розраховується за формулами

$$W_{BEC}^{mic.} = \sum_{i=1}^k W_{BEC}(V_i) \cdot t_i(V_i) \cdot T_{mic.}, \quad (6)$$

де $T_{mic.}$ – число годин в розрахунковому місяці.

$$W_{BEC}^{pik.} = \sum_{i=1}^k W_{BEC}(V_i) \cdot t_i(V_i) \cdot T_{pik.}, \quad (7)$$

де $T_{pik.} = 8760$ год.

Проектна висота відвалів ПАТ «Північний ГЗК» складає близько 100 м (висота відвалів інших ГЗК Криворізького регіону корегує з показниками даного комбінату). Згідно (5) швидкість вітру на відвалі складатиме, м/с

$$V_{від.} = 4,25 \cdot \left(\frac{100}{10}\right)^{0,2} = 6,75.$$

Для визначення рентабельності і окупності ВЕС існує критерій, згідно якого середньорічна швидкість вітру повинна знаходитися в межах 5,1...5,9 м/с [2]. Важливою характеристикою є вертикальний профіль вітру, тобто зміни його швидкості по висоті в приземному шарі. Вплив земної поверхні на швидкість і напрям вітру зменшується у міру збільшення висоти. Тому швидкість звичайно зростає, а поривчаста і прискорення потоку знижуються.

Розрахункова швидкість вітру для великих ВЕС звичайно приймається на рівні 11...15 м/с. В умовах гірничих відвалів, як наведено раніше, швидкість атмосферного повітря може сягати зазначеного діапазону та перевищувати ці показники, з залежності від швидкості атмосферних потоків повітря. Взагалі, як правило, чим більша потужність агрегату, тим на більшу швидкість вітру він розраховується. Однак у зв'язку з мінливістю швидкості вітру велику частину години ВЕС виробляє меншу потужність.

Для максимального використання вітрового потоку авторами рекомендується розміщувати ВЕС рядами перпендикулярними переважному напрямку вітру на відстанні $4D$ одна від одної (рис. 2а). Зате у випадку поздовжнього вітру ($\varphi 0 - \varphi \approx 0^\circ$) їх показники значно гірші. Так, втрата швидкості вітру на 20-30 % спричинить зменшення потужності ВЕС 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. 2б) [19].

Тому це є дуже важливим питанням, так як остаточна величина втрат виробітку ЕЕ залежить від того, наскільки переважаючий напрям вітру відповідає розташуванню рядів ВЕС.

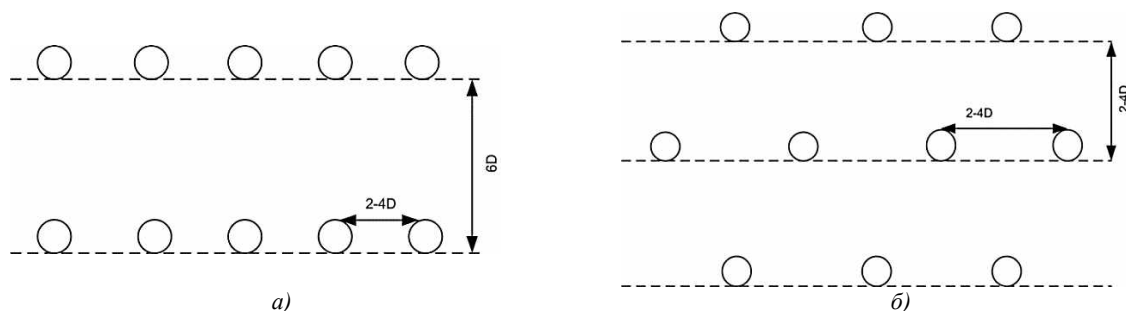


Рис. 2. Схеми розміщення ВЕУ в складі ВЕС на вітрополі: а – лінійна двохрядна; б – лінійна шахова рівномірна

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

$$W_T = \frac{P_{сер.}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2}, \quad (8)$$

або

$$W_T = \frac{\pi}{8000} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2}. \quad (9)$$

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

$$W_T = \frac{P_{сер.}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2}, \quad (10)$$

або з урахуванням градації вітру V_i

$$W_T = \frac{\pi}{8000} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2}. \quad (11)$$

Як бачимо технічний потенціал вітрової енергії не залежить від діаметру і як наслідок від одиначної потужності вітроустановок [19].

По метеостанції м. Кривий Ріг [18], напрям вітру може рівномірно змінюватися, тому рекомендовано встановлювати ВЕУ в шаховому порядку.

Так як гірничозбагачувальні комбінати дуже енергоємні підприємства, які споживають тисячі ГВт ЕЕ щорічно, зі встановленою одиначною потужністю електроприймачів близько декількох МВт, то розглядати класичний вибір потужності ВЕС в залежності від споживача не раціонально в даному випадку.

Для наглядності та більшої конкретики, розрахуємо потужність повітряного потоку на прикладі одного з відвалів ПАТ «Північний ГЗК» за формулою [2]

$$P_{П} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot S, \quad (12)$$

де ρ – густина повітря; v – середньорічна швидкість вітру; S – площа.

Враховуючи те, що площа одного з відвалів Північного ГЗК складає 2500 тис. м², то робоча площа відвалу буде $S_{роб.} = 3/4 \cdot S = 1875$ тис. м², а з технічних міркувань так як відвал робочий, то ВЕС зможуть зайняти не більше половини цієї площі, тис. м²

$$S_{роб.} = 0,5 \cdot 1875 = 937,5.$$

Тоді потужність повітряного потоку на відвалі становитиме, ГВт

$$P_{П} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 6,75^3 \cdot 937,5 = 0,176.$$

Як інший конкретний приклад, ПАТ «Полтавський ГЗК» має два відвали: Східний та Західний. Беручи до рахунку те, що середня швидкість вітру за рік по найближче розташованій метеостанції в м. Світловодськ складає 4,1 м/с, а висота східного відвалу 130 м, західного – 152 м, то за (5) можна вирахувати середню швидкість за рік на відвалах, отримаємо, м/с

$$V_{сх.} = 4,1 \cdot \left(\frac{130}{10}\right)^{0,2} = 6,848,$$

$$V_{зах.} = 4,1 \cdot \left(\frac{152}{10}\right)^{0,2} = 7,065.$$

Враховуючи те, що площа східного і західного відвалів 5200 тис. м² та 7166 тис. м², то робоча площа відвалів становитиме, тис. м²

$$S_{роб.сх.} = \frac{3}{4} \cdot 0,5 \cdot 5200 = 1950,$$

$$S_{роб.зах.} = \frac{3}{4} \cdot 0,5 \cdot 7166 = 2687.$$

Згідно (12) потужність повітряного потоку на відвалах становитиме, ГВт

$$P_{П.сх.} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 6,848^3 \cdot 1950 = 0,383,$$

$$P_{П.зах.} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,065^3 \cdot 2687 = 0,58.$$

Виходячи з аналізу, лише вищезазначених відвалів, більша частина площі яких незадіяна, в залежності від типу та характеристик вітроустановок, можна констатувати, що тут реально встановити ВЕС потужністю близько 2,5-3 МВт.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Залізорудні підприємства України володіють незадіяним потенціалом вітрової енергії, котрий може бути задіяний для генерування електроенергії вітроенергетичними установками, як автономними джерелами живлення у складі систем електропостачання цих підприємств.

Визначення потенціалу вітрової енергії в умовах залізорудних підприємств має ряд особливостей, які визначаються з специфіки технологічного процесу та локації кожного конкретного підприємства галузі.

Запропонована тактика оцінювання вітрового потенціалу в умовах відвалів залізорудних підприємств України дозволяє визначити проектні встановлені електричні потужності вітроустановок в умовах специфіки цих підприємств.

Список літератури

1. Державна служба статистики України [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/energ/pve/arh_pve_u.htm
2. **Бойко С.М.** Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств. Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора О.М. Сінчука. – Кременчук, 2020. – 263 с.
3. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): Монографія / **Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О.**; Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.
4. **І. О. Сінчук**, Коментар до стану електроенергетики залізорудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2018. – 166 с.
5. **Шидловський А.К.** Геоелектроенергетика та геополітика України / **Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Рогоза М.В., Випанасенко С.І.** Навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет. 2002. – 282 с.
6. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации: Монография / **А.Ф. Жаркин, С.П. Денисюк, В.А. Попов**; за ред. С.Е. Ноткиной; Институт электродинамики НАН Украины. – Киев: Вид. Нова думка, 2017. – 231 с.
7. World Energy Outlook –2019, OECD/IEA, Paris.
8. 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. – К. : 2001. – 41 с.
9. **О. Н. Сінчук, И. О. Сінчук, Э. С. Гузов, А. Н. Ялова, и М. А. Баулина**, «Оценка потенциала и тактика повышения электроэнергоэффективности подземных железорудных производств», Технологический аудит и резервы производства, № 3/4(17), с. 34-39, 2014.
10. Площадки для вітрових електростанцій. Метеорологічні дослідження характеристик вітру: ГКД 341.003.003.006:2000 – Офіц. вид. К.: Мін-во палива та енергетики України, 2001. – 30 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
11. **Попов В.А.** К вопросу рациональной интеграции источников распределенной генерации [Текст] / **В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, В.В. Ткаченко, С. Банузиде Сахрагард** // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України / Збірник наукових праць. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. – Спеціальний випуск. Ч.1 – С. 111 – 121.
12. **Renne D.S.** Meteorological field measurements at potential and actual wind turbine sites / **D.S.Renne, W.F.Sandusky, D.L.Hadley**; Pacific Northwest Laboratory. – Richland, Washington, 1982.: [Electronic sources]: <http://redc.nrel.gov/wind/pubs/candidate/>
13. **Akpınar S.** Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models / **S.Akpınar, E.Akpınar** // Energy Conversion and Management. – 2009. – N. 50. – P. 877–884.
14. «Wind Turbine Acoustic Noise», Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts at Amherst. June 2002, Amended January 2006.
15. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound//Journal of Sound and Vibration, Received 22 January 2003; accepted 22 September 2003.
16. **Кінаш Р.І.** Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні / **Р.І.Кінаш, О.М.Бурнаєв**. – Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 1998. – 1152 с.
17. **Шевченко В.В.** Оценка технической и экологической перспективы развития энергетики Украины // Якість технологій та освіти. Збірник наукових праць, – Харьков, УИПА – 2011. – ISSN 2409-9295. Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 38 (1081) 145 №. 2. – С. 19–25.
18. Патент на корисну модель UA 86427 Спосіб розташування електроенергетичної вітроустановки на відвалах кар'єрів та шахт. **Сінчук О.М., Бойко С.М., Дяченко В.С., Кривоус А.О.**, 25.12.2013.
19. [Електронний ресурс] Режим доступу: [https://rp5.ua/Архів_погоди_в_Кривому_Розі_\(аеропорт\)](https://rp5.ua/Архів_погоди_в_Кривому_Розі_(аеропорт)).
20. **Кузнєцов М. П.** Вплив розташування групи ВЕС на рівномірність їх сумісної роботи / **М. П. Кузнєцов** // Відновлювана енергетика XXI століття: XIV міжнар. конф., 16–20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, 2013. – С. 334–339.

УДК 621.383.52

І.А. КОЗАКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., К.В. БУДНІКОВ, асп.
Криворізький національний університет

ПРЕДИКТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ

Мета роботи полягає у розвитку предиктивних засобів керування для трифазних інверторів напруги у складі систем автоматизованого електроприводу шляхом прогнозування стану на наступному інтервалі дискретності системи.

Методи дослідження. У роботі використано теоретичний аналіз схеми заміщення системи «інвертор напруги – навантаження» з використанням законів електротехніки, дослідження можливих станів ключів інвертора з використанням методу комутуючих функцій, розробка дискретної прогнозувальної моделі з використанням методу Ейлера, дослідження системи предиктивного керування трифазним інвертором напруги з використанням методів математичного моделювання та аналіз показників синусоїдальності вихідного струму за допомогою методів швидкого перетворення Фур'є.

Наукова новизна. Доведено, що використання методів предиктивного керування трифазними інверторами напруги є раціональною альтернативою існуючим підходам на базі широтно-імпульсної модуляції, оскільки інвертор представляє собою елемент з кінцевою кількістю станів, що дозволяє здійснити прогнозування поведінки системи при застосуванні кожного з цих станів.

Практична значимість. Предиктивні системи керування можуть знаходити своє втілення у вигляді алгоритмічного та програмного забезпечення мікропроцесорних систем автоматизованих електроприводів.

Результати. Представлено аналіз схеми заміщення системи «інвертор напруги – навантаження», розроблено дискретну прогнозувальну модель, що може використовуватися в предиктивних системах керування та проаналізовано варіант функції витрат, що застосовується для оцінки відповідності кожного з варіантів подальшої поведінки системи до бажаної. Складено математичну модель системи у середовищі Matlab/Simulink, що містить предиктивний алгоритм у вигляді S-файлу.

Ключові слова: предиктивне керування, інвертор напруги, функція витрат, комутаційний стан, керування струмом

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-77-82

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Трифазний дворівневий інвертор напруги є найбільш популярною схемою у складі автоматизованих частотно-керованих електроприводів [1-5]. Найчастіше в існуючих дослідженнях предиктивне керування перетворювачами електричної енергії розглядається на рівні підсистеми керування струмом.

Предиктивне керування перетворювачами базується на кінцевому наборі можливих комутаційних станів силових ключів, що дає можливість з використанням моделі динамічної системи прорахувати зміну основних змінних стану для кожного варіанту включення ключів. При цьому важливим є визначення показників, за якими здійснюватиметься оцінка відповідності поведінки системи бажаній. До цих показників, перш за все, відноситься функція витрат, яка розраховується для всіх можливих варіантів включення ключів перетворювача з використанням прогнозних значень змінних стану. Прогнозування стану динамічної системи здійснюється для кожного з варіантів стану інвертора, що аналізується, а вибір комбінації включення ключів, що буде використано на наступному дискретному інтервалі, здійснюється таким чином, щоб мінімізувати функцію витрат. Отже, для синтезу системи предиктивного керування необхідно оцінити усі можливі комутаційні стани інвертора; розробити математичну модель перетворювача, на основі якої розробити алгоритми прогнозування стану системи та визначити вигляд функції витрат.

Аналіз досліджень і публікацій. Системи керування трифазними інверторами [6-12] широко розглядаються в літературі як в контексті частотно-керованих електроприводів, так і в контексті керування мережевими інверторами джерел розосередженої генерації. У [6] розглядається перетворювач, що живиться від однієї фази та дозволяє жити трифазне навантаження. Його особливістю є відсутність конденсаторів в ланцюзі постійного струму, що, за твердженням авторів, призводить до вищої стійкості, вищого коефіцієнту потужності та меншої вартості. Однак управління ускладнюється через коливання напруги в ланцюзі постійного струму. У роботі пропонується метод управління вхідним струмом інвертора із замкнутим контуром для зменшення гармонік вхідного струму. Пропонований спосіб порівнюється із традиційним методом і експериментальні результати підтверджують його ефективність. Проте, представлені