

УДК 621.311.1

DOI <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-1/25>**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

Федь М.М.

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

ДО ПИТАННЯ ПРОЄКТУВАННЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СТАНЦІЙ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Метою роботи є дослідження теоретичних засад проєктування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств. Децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації на базі відновлювальних джерел енергії можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів. Наявні методики для проєктування системи електропостачання віддалених споживачів в основному розглядають як альтернативу централізованому електропостачанню електропостачання шляхом генерації електроенергії на базі джерел розосередженої генерації (далі – ДРГ), у тому числі вітроенергетичних станцій. На гірничорудних підприємствах актуальним і можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення вітроенергетичних станцій. Водночас з метою достатньо енергоефективного використання систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання, пов'язані з режимами роботи енергетичного обладнання на етапі їх проєктування. У статті розглянуто теоретичні засади підходу до проєктування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств.

Ключові слова: вітроенергетична станція, енергетичне обладнання, електропостачання гірничорудних підприємств, проєктування системи електропостачання.

Постановка проблеми. Децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації, на базі відновлювальних джерел енергії можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів [1].

Наявні методики для проєктування системи електропостачання віддалених споживачів в основному розглядають як альтернативу централізованому електропостачанню, електропостачання шляхом генерації електроенергії на базі джерел розосередженої генерації, у тому числі вітроенергетичних станцій (далі – ВЕС).

Між тим освоєння потенціалу ВЕС – це технічно важко реалізоване в наш час завдання, яке

пов'язане з низькою щільністю потоку енергії від ВЕС і залежністю їх від природних умов. Вартість отримання енергії, хоча вона й знижується щорічно, залишається значно вищою, ніж у традиційних енергоресурсів, а потрібних кардинальних технічних рішень поки нема.

На часі є певні територіальні обмеження щодо впровадження ВЕС поблизу об'єктів електроспоживання. Однак, зважаючи на те що залізорудна сировина видобувається як відкритим (кар'єр), так і підземним (шахта, рудник) способами на великих площах, непридатних для сільськогосподарських робіт, гірничорудні підприємства (далі – ГРП) мають стати полігоном для впровадження ВЕС у структури розподільчих систем цих підприємств [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Враховуючи той факт, що залізородні підприємства належать до класу енергоємних, а у світі постійно точиться конкурентна боротьба за ринки збуту залізородної сировини (далі – ЗРС), оскільки залізородна промисловість посідає важливе місце в економіці багатьох країн світу, можна вважати актуальним науково-практичним завданням розроблення теоретичних засад, математичних моделей і методів упровадження джерел розосередженої генерації в структуру комплексу електропостачання-електроспоживання ГРП [3].

Завданнями розвитку розподіленої генерації та підвищення ефективності режимів роботи систем електропостачання з ДРГ в різні часи займалися Y.M. Atwa, R.C. Dugan, P. Mahat, K. Maki, H.I. Voropay, O.V. Kyrylenko, V.V. Kozirskyi, S.O. Kudrya, V.V. Kulik, P.D. Lezhnyuk, V.A. Popov, A.V. Prakhovnik, Yu.I. Tugay, O.S. Yandulskyi та інші вчені [1–8].

Постановка завдання. Розроблення теоретичних засад проектування вітроенергетичних станцій в умовах гірничородних підприємств.

Виклад основного матеріалу дослідження. Особливістю роботи вітрогенератора є його робота в умовах безперервної пульсації швидкості вітру.

Простою схемою ВЕС, яка представлена на рис.1, є паралельна робота декількох генераторів на загальні шини з видачею потужності через підвищувальний трансформатор у лінію високої напруги. В указаній схемі до джерела живлення з напругою U_s через трансформатор з активним опором R_t й індуктивністю L_t під'єднані: шунт $R_{ш}$, $L_{ш}$, два асинхронних генератори G_1, G_2 й сумарна ємність їхньої системи збудження C .

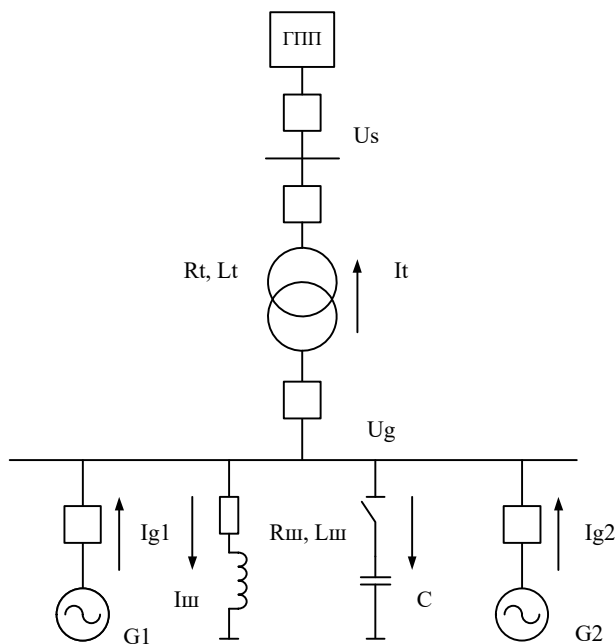


Рис. 1. Схема заміщення вітроенергетичної станції

Диференційні рівняння трансформатора й шунта в осях x, y, ω_k мають вигляд:

$$\begin{aligned} pI_t &= \frac{1}{L_t} \cdot (U_g - U_s) - \frac{R_t}{L_t} \cdot I_t - j \cdot \omega_k \cdot I_t; \\ pI_{ш} &= \frac{1}{L_{ш}} \cdot U_g - \frac{R_{ш}}{L_{ш}} \cdot I_{ш} - j \cdot \omega_k \cdot I_{ш}. \end{aligned} \quad (1)$$

Асинхронний генератор (далі – АГ) з конденсаторним самозбудженням являє собою простий асинхронний електродвигун з коротко замкнутим ротором, у якому відбувається електромагнітне перетворення механічної енергії обертання ротора на електричну енергію генеруючого струму.

Відповідно до рівнянь загальної електричної машини диференційні рівняння АГ можна представити у вигляді [2]:

$$\begin{aligned} 0 &= U_g + R_s \cdot I_g + p\psi_s + j \cdot \omega_k \cdot \psi_s; \\ 0 &= R_r^{(1)} \cdot I_r^{(1)} + p\psi_r^{(1)} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \psi_r^{(1)}; \\ 0 &= R_r^{(2)} \cdot I_r^{(2)} + p\psi_r^{(2)} + j \cdot (\omega_k - \omega) \cdot \psi_r^{(2)}; \\ p\omega &= \left(\frac{1}{j} \right) \cdot (M_T - M_E), \end{aligned} \quad (2)$$

де $R_s, R_r^{(i)}, L_{\sigma s}, L_{\sigma r}^{(i)}, i=1,2$ – активні опори та індуктивності розсіювання статора й ротора; L_m – індуктивність взаємодукції; $\psi_s, \psi_r^{(i)}, \psi_m$ – потокозчеплення статора, роторних контурів і гілки намагнічування; $I_g, I_r^{(i)}$ – токи статора та роторних контурів; M_E – електромагнітний момент генератора; M_T – момент обертання вітрогенератора.

До включення конденсаторів збудження АГ напруга U_g може бути визначена з балансів струмів у вузлі в диференціальній формі:

$$pI_t + pI_{ш} - pI_g + j \cdot \omega_k \cdot (I_t + I_{ш} - I_g) = 0 \quad (3)$$

Після підставлення складових отримуємо:

$$U_g = \frac{1}{Y} \cdot \left[\frac{U_s}{L_t} + \frac{R_t}{L_t} I_t + \frac{R_{ш}}{L_{ш}} I_{ш} - \frac{R_s}{L_{\sigma s}} \cdot (1 - a_s) \cdot \gamma_g - \frac{E_r}{L_{\sigma s}} \right] \quad (4)$$

де $E_r = \sum_{i=1}^2 a_r^i \cdot (p\psi_r^i + j \cdot \omega_k \cdot \psi_r^i)$ – еквівалентна

ЕРС двоконтурного ротора АГ;

$Y = \frac{1}{L_t} + \frac{1}{L_{ш}} + \frac{1 - a_s}{L_{\sigma s}}$ – власна інверсна індуктивність вузла.

Взаємозв'язок між параметрами вітру (середня швидкість, поривність), вітроколеса (число моду-

лів, кут розвороту лопатей) і моментом вітротурбіни є достатньо складною, але у дослідженні електромагнітних перехідних процесів з частотою затухання менше ніж 0,5 с величина M_T може бути прийнята постійною.

Якщо розглядати процеси в синхронному генераторі (далі – СГ) під час роботи з мережею, головне значення мають питання включення на паралельну роботу й регулювання його активної та реактивної потужності. Як правило, потужність мережі набагато більша потужності генератора, а напруга й частота мережі постійні.

Під час роботи СГ на мережу великої потужності його напруга залишається незмінною й рівною напрузі мережі, що обумовлює постійність результуючого магнітного потоку генератора. В разі збільшення струму збудження (перезбудження генератора) між мережею і статором СГ з'явиться вирівнювальний струм [3].

Стійка паралельна робота генератора з мережею підприємства можлива лише за наявності статизму по реактивній потужності. Статизм по реактивній потужності (S_Q) визначається у відсотках від напруги холостого ходу U_0 :

$$S_Q = \frac{U_0 - U_n}{U_0} \cdot 100\% \quad (5)$$

Система самозбудження забезпечує збільшення струму збудження генератора зі зростанням його навантаження. Оскільки за паралельної роботи СГ з мережею $U_c = U_n$, то в умовах відсутності статизму за збільшення потужності Q збільшуватиметься струм збудження. Це спричинить подальше зростання реактивної потужності, і процес продовжуватиметься до виходу генератора з ладу. Величина статизму по реактивній потужності повинна становити 3–4%.

Публічне акціонерне товариство «Полтавський ГЗК» (далі – ПАТ «Полтавський ГЗК») є дуже енергоємним підприємством, яке споживає тисячі ГВт електричної енергії щорічно, зі встановленою одиничною потужністю електроприймачів близько декількох МВт. Отже, розглядати класичний вибір потужності ВЕС в залежності від споживача нераціонально в цьому випадку.

Розрахуємо потужність повітряного потоку на відвалах Полтавського ГЗК за формулою:

$$P_n = 0,5 \cdot v^3 \cdot F \quad (6)$$

Беручи до уваги те, що середня швидкість вітру за рік по Полтавській області становить

4,1 м/с то можна вирахувати середню швидкість за рік на відвалах ПАТ «Полтавський ГЗК». Висота східного відвалу – 130 м, а західного – 152 м, з урахуванням висоти щогли 75 м отримаємо:

$$V_{cx} = 4,1 \cdot (178 / 10)^{0,2} = 7,29 \text{ м/с,}$$

$$V_{zx} = 4,1 \cdot (200 / 10)^{0,2} = 7,46 \text{ м/с.}$$

Враховуючи те, що площа східного й західного відвалів – 5200 тис. м² та 7166 тис. м², потужність повітряного потоку на відвалах становитиме:

$$P_{n,cx} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,29^3 \cdot 5200000 = 1234941550 \text{ Вт} = 1,23 \text{ ГВт,}$$

$$P_{n,zx} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,46^3 \cdot 7166000 = 1823701522 \text{ Вт} = 1,82 \text{ ГВт.}$$

Враховуючи те, що робоча площа відвалу буде $S_{роб} = \frac{3}{4} \cdot S = 5374500$ тис. м², а з технічних міркувань, позаяк відвал робочий, то ВЕС зможуть зайняти не більше ніж половину цієї площі:

$$S_{роб,ВЕС} = \frac{1}{2} \cdot 5374500 = 2687250 \text{ тис. м}^2.$$

Знаючи площу, яка може бути використана для ВЕС, можемо розрахувати кількість установок, які можна розмістити. Знаючи, що в регіоні, де розташована метеостанція, переважний напрямок вітру, тому доцільно розміщати вітроенергетичні установки (далі – ВЕУ) рядами, перпендикулярними переважному напрямку вітру:

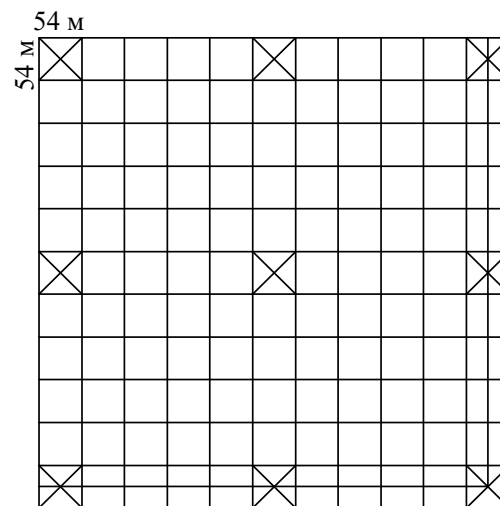


Рис. 2. Розрахункова схема розташування ВЕУ

Знаючи, що діаметр ротора вітротурбіни дорівнює 54 м, а відстань між сусідніми ВЕУ повинна бути не менше 4D, можемо розрахувати площу для 4 ВЕУ:

$$S_{4ВЕУ} = 54 \cdot 54 \cdot 100 = 291600 \text{ м}^2.$$

Звідки площа для однієї ВЕУ буде:

$$S_{1BEU} = \frac{291600}{4} = 72900 \text{ м}^2.$$

Знаючи загальну робочу площу відвалу й площу, яка необхідна для роботи однієї ВЕУ, розрахуємо скільки ВЕУ можна встановити на заданій площі:

$$n_{BEU} = \frac{S_{роб.ВЕС}}{S_{1BEU}} \quad (7)$$

$$n_{BEU} = \frac{2687250}{72900} = 37 \text{ шт.}$$

З техніко-економічних міркувань і для мінімізації втрат енергії підключення ВЕС планується до ГПП, яке розташовано найближче до місця розташування ВЕС. В моєму випадку це ГПП 4/1.

Оскільки планується під'єднання до силового трансформатора, для вибору потужності ВЕС необхідно враховувати коефіцієнти завантаження трансформаторів. Далі в таблиці представлено показники роботи трансформаторів.

Як бачимо з таблиці, коефіцієнти завантаження трансформаторів на ГПП 4/1 дуже малі, що обумовлено специфікою роботи підприємства. Тому для того щоб знати, наскільки ми можемо розвантажити трансформатори, необхідно розрахувати втрати до та після під'єднання ВЕС.

Застосувавши рівняння втрат активної та реактивної енергії в трансформаторі, знайдемо його повні втрати за рік з коефіцієнтом завантаження $K_3=0,131$:

$$\Delta P_T = \Delta P_{xx} \cdot T_2 + \Delta P_{кз} \cdot k_3^2 \cdot \tau \text{ кВт} \cdot \text{год}, \quad (8)$$

$$\Delta Q_T = \Delta Q_{xx} \cdot T_2 + \Delta Q_{кз} \cdot k_3^2 \cdot \tau \text{ кВАр} \cdot \text{год}, \quad (9)$$

$$\Delta S_T = \sqrt{\Delta P_T^2 + \Delta Q_T^2} \text{ кВА}, \quad (10)$$

де T_2 – число годин роботи трансформатора за рік з коефіцієнтом завантаження $K_3=0,131$, $T_2 = 5000$ год; τ – час максимальних втрат: умовне число годин, упродовж яких максимальний струм, що протікає безперервно, створює втрати енергії, які дорівнюють дійсним втратам енергії за рік, год.

Розрахуємо втрати реактивної потужності на холостому ходу:

$$\Delta Q_{xx} = S_n \cdot \frac{I_{xx}}{100} \quad (11)$$

$$\Delta Q_{xx} = 16000 \cdot \frac{0,7}{100} = 112$$

$$\Delta Q_{кз} = S_n \cdot \frac{U_{кз}}{100} \quad (12)$$

$$\Delta Q_{кз} = 16000 \cdot \frac{10,5}{100} = 1680$$

$$\Delta P_T = 18 \cdot 5000 + 85 \cdot 0,131^2 \cdot 3000 = 95 \text{ МВт} \cdot \text{год}$$

$$\Delta Q_T = 112 \cdot 5000 + 1680 \cdot 0,131^2 \cdot 3000 = 647 \text{ кВАр} \cdot \text{год}$$

$$\Delta S_T = \sqrt{95^2 + 647^2} = 654 \text{ кВА.}$$

Що у відсотковому співвідношенні становитиме:

$$\Delta S_T = \frac{654}{18365} \cdot 100 = 3,6 \%$$

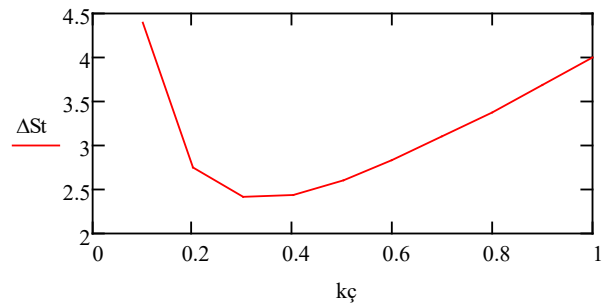


Рис. 3. Залежність втрат потужності від коефіцієнта завантаження трансформатора ТДН 16000/110

Оскільки потужність трансформатора з коефіцієнтом завантаження 0,131 становить близько 2 МВт·год, а трансформатори встановлювалися на перспективу розвитку підприємства, то під час вибору потужності ВЕС орієнтуватися на втрати в трансформаторі недоцільно.

Висновки. На гірничорудних підприємствах актуальним і можливим є впровадження в загальну структуру систем електроживлення вітроенергетичних станцій. Водночас з метою достатнього енергоефективного використання систем електроживлення необхідно ґрунтовно аналізувати питання, пов'язані з режимами роботи енергетичного обладнання на етапі їх проектування.

У статті розглянуто теоретичні засади підходу до проектування вітроенергетичних станцій в умовах гірничорудних підприємств.

Список літератури:

1. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізорудних підприємств (аналіз, перспективи, проекти): монографія / О.М. Сінчук та ін. Кривий Ріг : Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.

2. Кузнецов М.П. Методи оцінки випадкових параметрів роботи енергосистем з інтегрованими вітровими електростанціями / М.П.Кузнецов. *Відновлювана енергетика*. 2014. № 1. С. 59–64.
3. Buchholz B., Styczynski Z. *Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. Springer, 2014. 396 p.
4. Charytoniuk W., Chen M.S. Short-term Forecasting in Power Systems Using a General Regression Neural Network. *IEEE Trans. on Power Systems*. 1995. Vol. 7. № 1.
5. Пекур П.П. Стохастичне моделювання динаміки повітряного потоку в приземному шарі атмосфери за довільної функції розподілу швидкості вітру / П.П. Пекур. *Відновлювана енергетика*. 2005. № 3–4. С. 29–33.
6. Площадки для вітрових електростанцій. Метеорологічні дослідження характеристик вітру : ГКД 341.003.003.006:2000. Офіц. вид. Київ : Мін-во палива та енергетики України, 2001. 30 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
7. Полищук С.В. Исследование корреляционной взаимосвязи нагрузок энергосистем и стохастически периодических метеофакторов / С.В. Полищук, Н.В. Приймак. *Техническая электродинамика*. 1991. № 1. С. 98–103.
8. Morales D.S. Maximum Power Point tracking algorithms for photovoltaic applications. Thesis for obtaining the degree of Master of science in technology / D.S. Morales. Espoo, Finland : Aalto University, Faculty of electronics, communications and automation, 2010. 82 p.

Sinchuk O.M., Boiko S.M., Nekrasov A.V., Noznova M.O., Fed M.M. ON THE DESIGN OF WIND POWER PLANTS IN THE CONDITIONS OF MINING ENTERPRISES

The purpose of this work is the theoretical basis for the design of wind power plants in the conditions of mining enterprises. Decentralized grid systems using renewable energy sources, based on renewable energy sources, can be an extremely profitable area for investment, if it is possible to locate energy sources near consumers. Existing methods for designing the power supply system for remote consumers are generally considered as an alternative to centralized power supply, electricity supply through generation of electricity based on sources of distributed generation, including wind power stations. At mining enterprises, it is relevant and possible to introduce wind power systems into the overall structure of power systems. At the same time, in order to use energy structures in a sufficiently energy-efficient way, it is necessary to thoroughly analyze the issues related to the modes of operation of power equipment at the design stage. So, as power transformers with a load factor of 0.131, and they were installed on the prospect of enterprise development, when choosing the capacity of wind power stations, at the stage of their connection to the network, it is not advisable to focus on losses in the transformer. Given the fact that iron ore enterprises are in the class of energy-intensive, and the world is constantly competing for markets for iron ore raw materials, because iron ore industry is an important place in the economy of many countries in the world, can be considered as a relevant scientific and practical problem for the development of models and theorems methods for the introduction of wind power stations in the structure of the complex of electricity supply and consumption of mining enterprises. The theoretical principles of the approach to the design of wind power stations in the conditions of mining enterprises are considered in the article.

Key words: *wind power station, power equipment, power supply to mining enterprises, design of power supply system.*