

## ВИБІР ПОТУЖНИХ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ ДЛЯ РЕАЛЬНИХ УМОВ

© Покровський К. Б., Маврін О. І., Шелех Ю. Л., 2017

Наведено результати розрахунку технічних та економічних показників вітроелектростанцій із різнотипними вітрогенераторами за вітрових умов Карпатського регіону України для вибору оптимального обладнання.

*Ключові слова: вітроелектростанція, вітрогенератор, ефективність.*

The paper presents the results of the calculation of technical and economic performance of various wind farms WTG with wind turbines for the real wind conditions in Ukrainian Carpathian region to choose the optimal equipment.

*Keywords: wind power station, wind turbine generator, efficiency.*

### Постановка проблеми

Розвиток світової енергетики у показниках встановленої потужності альтернативних відновлюваних джерел електроенергії та обсягів їх виробництва демонструють стабільну позитивну динаміку. Разом із тим вітрова енергетика показує значні темпи зростання впливу на рівень виробництва електроенергії. Неодноразово у 2016–2017 рр. з'явилися повідомлення про використання виключно альтернативних відновлюваних джерел енергії в окремих країнах в періоди зниження графіків навантаження у вихідні та святкові дні [1]. При цьому частка електроенергії, отриманої від гідро-, вітро-, біо- та сонячних електростанцій, становила понад 87 %. Застосування вітроелектростанцій (ВЕС) знижує споживання традиційних первинних енергоресурсів, сприяє технологічному розвитку територій та створенню робочих місць, скорочує кількість викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу [2].

### Аналіз останніх досліджень

В Україні вітрова енергетика показує менш динамічні показники розвитку. У 2015 р. всі ВЕС України виробили 974 тис. МВт-год електроенергії, при цьому частка вітроенергетики у загальному балансі склала 0,62 % та 0,9 % у встановленій потужності генераторів, що зменшує викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу на 500 тисяч тон. У 2016 році встановлена потужність вітроелектростанцій сягнула величини у 525 МВт за виробництва енергії у 925 тис. МВт-год та частку у 49 % потужності альтернативних та відновлюваних джерел в Україні [3]. Необхідність розвитку вітроенергетики в Україні визначається необхідністю зменшення залежності від традиційних видів палива та його імпорту, зменшенням викидів в атмосферу. Ефективність ВЕС визначається показниками, що потребують врахування значної кількості факторів для прийняття проектних рішень. Це впливає з наявного законодавства, результатів проектних інженерних вишукувань (геологічних, геодезичних), витрат на влаштування під'їзних та внутрішніх доріг, особливо в гірських умовах, даних із вивчення вітрового потенціалу регіону тощо [4]. Треба згадати особливі вимоги державного законодавства щодо отримання «зеленого тарифу» залежно від частки застосування обладнання вітчизняного виробника.

### Формулювання цілей статті

Інтенсифікації розвитку ВЕС в Україні сприятиме поширення нової інформації про ефективність створення та експлуатації потужних ВЕС в енергосистемі з використанням сучасних продуктивних вітрогенераторів (ВГ). Адже експертні оцінки цін на вітрогенератори демонструють стабільну тенденцію до зниження вартості встановленої потужності ВЕС, чому зокрема сприяє і жорстка конкуренція на ринку виробників такого обладнання. В таких умовах доцільно застосувати

спрощений алгоритм визначення технічних та економічних показників уявної ВЕС на стадії допроектного прийняття технічних рішень, адже техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) варіантів вітроелектростанції потребує значних фінансових інвестицій [5].

Перспективність регіону Українських Карпат щодо отримання промислового вітрового навантаження підтверджено [6] за даними експертного оцінювання [4, 5]. Важливим питанням вибору ділянки під будівництво ВЕС є проблема вітрових вимірів. Методики оцінювання продуктивності за [4] та [5] мають певні недоліки та переваги, однак у [4] наведено результати, що враховують реальну характеристику вітрових навантажень для конкретного будівельного майданчика у західній частині Українських Карпат (координати досліджуваної ділянки – (lat.,lon.) 49,2470; 22,8763) з властивими характеристиками імовірності вітру за відомим аналітичним розподілом Вейбула:

$$\Phi_v = \frac{k}{C} \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{V}{C} \right)^k}, \quad (1)$$

де  $\Phi_v$  – функція розподілу появи імовірності вітру, %;  $k$  – коефіцієнт розсіяння;  $C$  – коефіцієнт масштабу, що визначається за середньою швидкістю вітру  $A$ , наближено  $C=2A/\pi^{1/2}$ ;  $V$  – швидкість вітру, що оцінюється, м/с.

Характеристики вітрових навантажень зазначеної ділянки наведено в [3], що і застосуємо для подальших розрахунків. Ці результати отримано для висоти вежі ВГ у 100 м. Для врахування реальної висоти вітрогенераторів можна скористатися експоненціальним законом Хелмана [7]:

$$V_{h2} = V_{h1} \cdot \left( \frac{H_2}{H_1} \right)^b, \quad (2)$$

де  $H_2$  – висота, до якої здійснюється приведення;  $H_1$  – висота, для якої здійснювалися виміри вітру;  $V_{h1}$ ,  $V_{h2}$  – відповідні швидкості вітру;  $b$  – показник профілю місцевості встановлення ВГ ( $b=0,14 \div 0,30$ ).

### Виклад основного матеріалу

Інтенсифікація розвитку вітроенергетики стимулює появу на ринку нових пропозицій від виробників обладнання, особливо за встановленою потужністю ВГ. Вітроустановки великої потужності від Vestas, Enercon, Fuhrlander, Aerodyn, Alstom, Gamesa, Siemens та Guangdong MingYang тощо, відрізняються за своїми характеристиками, але остаточний вибір того чи іншого виробника, потужності ВГ пов'язаний з оцінкою продуктивності та прибутковості в конкретних вітрових умовах експлуатації. Сьогодні найпопулярнішими потужностями ВГ є 2,5–3,3 МВт. Виробники пропонують новітні розробки потужністю до 8 МВт. Розглянемо технічні та економічні показники уявної ВЕС для ряду пропонованих вітрогенераторів. Для розрахунку технічних показників ВЕС виберемо три типи ВГ *Enercon E-126*, *E-126EP4*, *E-101* [9] різної потужності. Обираємо ВГ від одного виробника для коректнішого порівняння отриманих результатів. Параметри прийнятих генераторів наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри ВГ

Параметр	E-101E2 № 1	E-126 № 2	E-126 EP4 № 3
Номінальна потужність, МВт	3,5	7,58	4,2
Діаметр ротора, м	101	127	127
Висота башти, м	74/99	135	99/135/159
Площа ротора, м <sup>2</sup>	8012	12668	12668

Потужність ВГ для конкретного випадку будівельного майданчика визначається такими параметрами: середньою швидкістю вітру на висоті осі ротора гондоли, густиною повітря, добовим максимумом та мінімумом швидкості вітру [7]:

$$P = k \cdot \rho \cdot V^3 \cdot S/2, \quad (3)$$

де  $k$  – коефіцієнт ефективності турбіни;  $\rho$  – густина повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V$  – швидкість вітру,  $\text{м/с}$ ;  $S$  – площа вітрового потоку,  $\text{м}^2$ .

Продуктивність прийнятих для аналізу моделей ВГ має вигляд, як на рис. 1. Виробництво електроенергії ВГ можна визначити так:

$$E = \int_{v=0}^n \left[ \frac{1}{2} r S V^3 C_t \Phi_v T \right] dV, \quad (4)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $S$  – площа вітроколеса;  $C_t$  – параметр, що характеризує ефективність використання вітрогенератором енергії вітрового потоку [7,8].

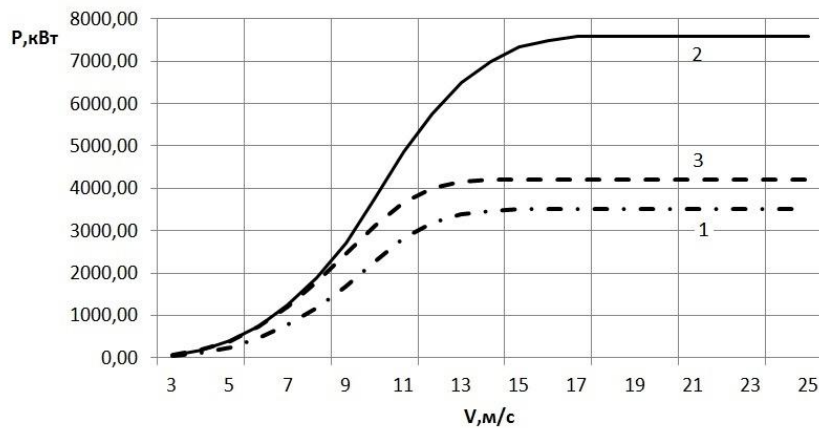


Рис. 1. Характеристики продуктивності ВГ: 1- E-101, 2- E-126, 3- E-126EP4

З метою підвищення вірогідності розрахункових характеристик застосовуємо коефіцієнт ефективності ВГ, що наданий виробником [9] (рис. 2).

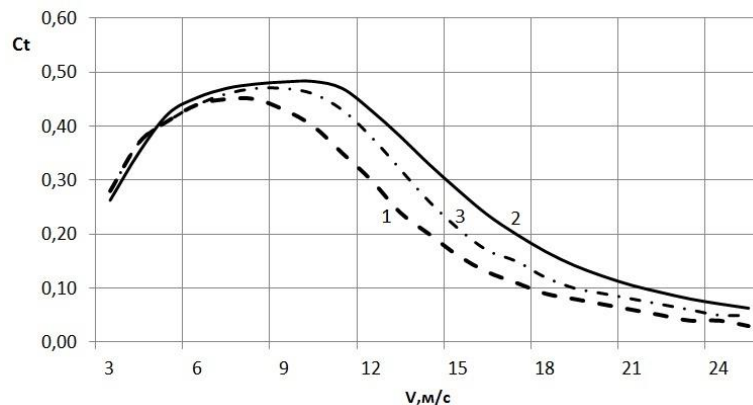


Рис. 2. Залежність коефіцієнта ефективності ВГ від вітрового навантаження

Для уявної ВЕС із вибраними ВГ річні показники продуктивності для зазначеної ділянки в умовах гірського хребта з урахуванням (1) та отриманих [4] за (2)–(4) вітрових характеристик мають такі значення (табл. 2):

Таблиця 2

**Характеристики продуктивності ВГ**

Тип ВГ	Кількість ВГ	Річна продуктивність, МВт·год
Е-101	1	8224,843
Е-126		13744,483
Е-101EP4		11446,695

На основі табл. 2 оцінимо ефективність побудови для 10-агрегатної ВЕС в умовах обраної ділянки та трьох типів ВГ. Виробництво електроенергії протягом року визначено з урахуванням 2 % витрати енергії на потреби електростанції. За «Зелений» тариф на вироблену електроенергію на вітростанціях в Україні визначається постановою НКРЕКП № 2380 від 29.12.2016 і складає величину 0,11 €/кВт·год. Врахуємо вартість однієї вітроустановки у 0,61 млн.€ за МВт встановленої потужності, що відповідає експертним оцінкам. Прийmemo, що для 10-ти ВГ вартість землевідведення, дозвільної і проектної документації, ліцензії на генерацію витрати не більше за 1,9 млн.€, транспортні витрати, вартість будівельних і пусконаладжувальних робіт, зокрема вартість матеріалів і апаратів розподільних пристроїв – 25 % сумарної вартості, на основі чого можна отримати наближену вартість ВЕС. Експлуатаційні витрати можна орієнтовно оцінити у 8,5 % – зокрема заробітна плата, диспетчерське обслуговування, амортизаційні відрахування, оренда, інвестиційні відрахування на розвиток території.

У результаті розрахунків отримуємо величину річного виробітку електроенергії  $W$ , валового прибутку  $\Pi$  протягом року експлуатації уявної електростанції та термін окупності  $T_o$  капіталовкладень  $K$  (рис.3). Отримані дані слід розглядати як оцінку, що не може бути абсолютною через наближеність вихідних даних та використання експертних оцінок та характеристик. Однак ці дані дають можливість пов'язати технічні характеристики різнотипних за встановленою потужністю вітрогенераторів з продуктивністю віртуальної електростанції за реальних вітрових навантажень обраної ділянки будівництва, отже, із економічними показниками її ефективності.

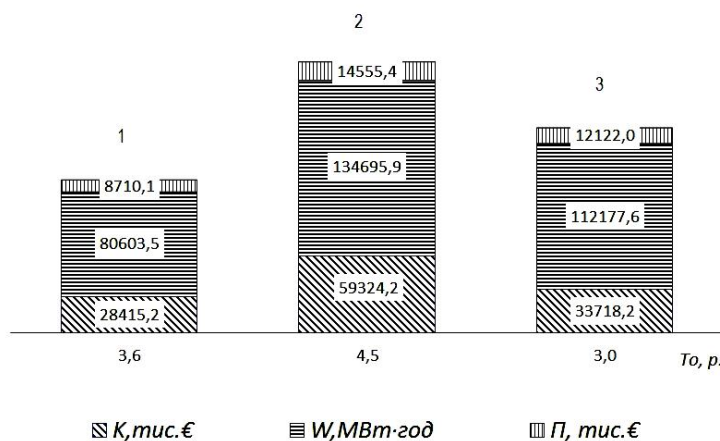


Рис. 3. Результати розрахунку технічних та економічних показників 10-агрегатної ВЕС із генераторами різної потужності  
1- E-101, 2-E-126, 3- E-101EP4

для неї. Прибутковість ВГ різної потужності можна оцінити як валовим прибутком  $\Pi$ , так і терміном окупності  $T_o$ . При цьому ефективнішим виглядає ВГ № 3 з найменшим терміном окупності та порівняно значним виробітком електроенергії, що підтверджується близькими характеристиками продуктивності для «робочих» діапазонів [4] вітрів та меншою вартістю одиниці порівняно з ВГ № 2 (рис. 1).

Незначна відмінність отриманих розрахункових від опублікованих практичних результатів [5] дає змогу зробити висновок про адекватність отриманих характеристик та можливість отримання порівняльних даних про продуктивність ВЕС за пропонованою методикою у Карпатському регіоні України з оптимальним вибором обладнання для підвищено його ефективності.

1. Германия установила рекорд по производству «зеленой» энергии. [Електронний ресурс] / ©IGate.2017 // – Режим доступу: <http://igate.com.ua/lenta/15052-germaniya-ustanovila-rekord-po-proizvodstvu-zelenoj-ehnergii.htm>. 2. BP Statistical Review of World Energy, June 2016 [Електронний ресурс] / © 2017 BP P.L.C. // – Режим доступу: <http://bp.com/statisticalreview.htm>. 3. Інформація щодо потужності та обсягів виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної

електроенергетики, які працюють за «зеленим» тарифом (станом на 01.01.2017) [Електронний ресурс] / Держенергоефективності України ©2009 // – Режим доступу: <http://saee.gov.ua/uk/content/informatsiyni-materialy.htm>. 4. Покровський К. Б. Оцінка ефективності вітроелектростанції на основі даних з відкритих джерел / К. Б. Покровський, М. Ю. Кужелев // Вісник НУ “Львівська політехніка”. – 2016. – № 862: Електроенергетичні та електромеханічні системи. – С.123-127. 5. Покровський К.Б. Ефективність потужних ВЕС в карпатському регіоні / К. Б. Покровський, О. І. Маврін, В. П. Олійник, М. С. Яворський // Нетрадиційні і поновлювані джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матеріали Восьмої міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 2–3 квітня 2015): Зб. наук. статей, – С. 148–151. 6. WPP “Sary Sambir-1” nature does nothing in vain. [Електронний ресурс] / Програма фінансування альтернативної енергетики в Україні (USELF) // – Режим доступу: [http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/USELF-Launch\\_Event\\_Kozytskyi\\_eng\\_140627.pdf](http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/USELF-Launch_Event_Kozytskyi_eng_140627.pdf). 7. "Выявление проблем интеграции ветроэлектростанций в электроэнергетическую систему Украины" [Електронний ресурс] / Гольберт А. Е. Доклад для круглого стола. «Новые вызовы, которые связаны с активным развитием альтернативной энергетики. Её место и роль в ОЭС Украины» Ежегодный форум «Топливо-энергетический комплекс Украины: настоящее и будущее». // Режим доступу: <http://www.proza.ru/2011/09/19/975.htm>. 8. Ahmed F. Zobaa. Handbook of Renewable Energy Technology / Ahmed F. Zobaa, Ramesh C. Bansal. World Scientific, 2011. 9. ENERCON product overview. [Електронний ресурс] / ©ENERCON GmbH. August 2016. // Режим доступу: <http://www.enercon.de>.