

Szymczak, Shane O'Meara, Johnny S. Gealon, Christopher Nelson De La Rama // *Analog Dialogue* 48-03, March (2014). – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/48-03/resolver.html>. 9. Kester W. *Resolver-to-Digital Converters* [Electronic resource]. MT-030 Tutorial. Rev.A, 10/08, WK / Walt Kester // *Analog Devices*, February (2009). – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-030.pdf>. 10. Staebler M. *TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed* [Electronic resource]. DSP Field Application / Martin Staebler // *Texas Instruments Incorporated. Application Report SPRA605 – February 2000*. – [Режим доступу до ресурсу]: <http://www.ti.com/lit/an/spra605/spra605.pdf>. 11. Mienkina M. *56F80x Resolver Driver and Hardware Interface* [Electronic resource]. / Martin Mienkina, Pavel Pekarek, Frantisek Dobes // *Freescale Semiconductor. Application Note AN1942. Rev. 1, 08/2005*. – [Режим доступу до ресурсу]: <http://cache.freescale.com/files/product/doc/AN1942.pdf>. 12. Мороз В. Аналіз реалізації визначення кута при обробці сигналів з індукційних давачів кута / В. Мороз, І. Снітков, Д. Довгань, П. Болкот // *Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки: зб. наук. пр.* – Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільськ. нац. ун-т, 2014. – Вип. 10. – С. 112–118. – *Бібліогр.: 3 назв.* – укр.

УДК 621.311.24 + 621.314

К. Б. Покровський, М. Ю. Кужелєв

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електричних станцій

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ НА ОСНОВІ ДАНИХ З ВІДКРИТИХ ДЖЕРЕЛ

© Покровський К. Б., Кужелєв М. Ю., 2016

**Наведено оцінку ефективності вітроелектростанції в умовах Карпатського регіону на основі даних з відкритих джерел та розрахунки техніко-економічних показників електростанції.**

**Ключові слова:** вітроелектростанція, ефективність.

**There are represented assessment of efficiency of wind farms in the Carpathian region based on data from public sources and showing technic and economic indicators of power station.**

**Key words:** wind power station, efficiency.

### Постановка проблеми

Незворотний процес розвитку енергетики на фоні зростання екологічних вимог до технологічних процесів сприяє щораз ширшому застосуванню альтернативних технологій виробництва електроенергії, які набувають все більшої популярності у світі. Використання енергії вітру для електроенергетики стає однією з найефективніших «зелених» технологій у світі. Вітроенергетика на основі використання потужних вітроелектростанцій (ВЕС) в Україні зменшує споживання первинних енергоресурсів та залежність від їх імпорту, сприяє технологічному розвитку, скорочує кількість викидів CO<sub>2</sub> в атмосферу.

У багатьох країнах світу інтенсивно збільшується власний потенціал вітроенергетики – встановлена потужність ВЕС разом із збільшенням частки у загальному виробітку електроенергії [1]. Станом на 2015 рік США планують збільшення інвестицій у вітроенергетику до 7,4 млрд. \$,

Великобританія нарощує частку електроенергії вітростанцій (ВЕС) до 14 % загального виробітку. Подібні процеси відбуваються в Німеччині, у Китаї, Індії тощо.

В Україні розвиток вітроенергетики відбувається інакшими темпами. Так у 2014 р. ВЕС України виробили 1,123 млрд. кВт·год електроенергії, при цьому частка вітроенергії у загальному балансі становить 0,62 та 0,9 % у встановленій потужності генераторів, що зменшує викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу на 500 тисяч тонн [2]. Додатково, у лютому 2015 р. ТзОВ «Еко-Оптіма» проведено пуск першої черги ВЕС «Старий Самбір-1», а згодом розпочалися роботи з будівництва другої черги ВЕС. Подальшому розвитку вітроенергетики в Україні сприятиме поширення додаткової інформації про ефективність потужних ВЕС в енергосистемі.

### Задача дослідження

Слід зауважити, що на стартовій стадії в процесі виконання монтажних та налагоджувальних робіт питомі витрати на вітрову та паливну електроенергію значно не різняться. Вітроенергетика переважає в сенсі економічності на етапі експлуатації. Під час роботи ВЕС в умовах України і не тільки вітроенергетика реалізує свої відомі переваги в такий спосіб:

- експлуатаційні витрати на виробництво вітроенергії помітно менші, особливо з урахуванням практично 90-відсоткового зношення обладнання теплових електростанцій;
- з розвитком вітрових технологій варто передбачити значне здешевлення обладнання вітростанцій у найближчі роки;
- вплив на екологію теплової енергетики порівняно не більший, ніж вітроенергетики.

Для зростання обсягів впровадження ВЕС в умовах України слід приділити більше уваги питанням ефективності вітроустановок, їхнім перевагам порівняно з традиційними джерелами у тих, чи інших регіонах, з урахуванням сучасних технологічних рішень та нормативів.

З огляду на географію розташування ВЕС України стає очевидним, що основними чинниками, які визначають можливість використання вітрової енергії в конкретному місці, є метеорологічні умови – місце розташування ВЕС з урахуванням характеристик вітротурбіни, як наслідок техніко-економічного аналізу варіантів компонування вітростанції, що залежить від надходження енергії від вітротурбіни, її функціонального призначення і дають змогу вирішити питання, що характеризують ефективність її роботи.

Сьогодні на ринку є багато різноманітних пропозицій від виробників обладнання. Вітроустановки великої потужності від Vestas, Fuhrlander, Aerodyn, Alstom, Gamesa, Siemens та Guangdong MingYang, тощо різняться своїми характеристиками, але пропонуються для отримання максимального економічного ефекту в широких діапазонах вітрових навантажень. Для оцінки ефективності ВЕС слід враховувати велику кількість чинників для прийняття проектних рішень, що впливають з наявного в Україні законодавства, результатів проектних інженерних вишукувань (геологічних, геодезичних), витрат на влаштування під'їзних та внутрішніх доріг, особливо в гірських умовах, даних з вивчення вітрового потенціалу регіону, наявних характеристик енергомережі для підключення ВЕС – енергетичної інфраструктури, вимог до землевпорядкування – наявності земель запасу за межами населених пунктів, достатньої відстані від споруд ВЕС до існуючої забудови, впливу ВЕС на еколого-рекреаційні умови місця розташування ВЕС[3]. Сюди, так само, слід зарахувати особливі вимоги державного законодавства щодо отримання «зеленого тарифу» залежно від частки застосування обладнання вітчизняного виробника. Зокрема ці питання регулюються нині постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП) № 2932, від 10.12.2015 року.

У таких умовах доцільно скористатися спрощеною схемою оцінки економічних показників уявної ВЕС, що отримано з відкритих джерел, на стадії допроектного прийняття технічних рішень, адже техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) варіантів вітроелектростанції потребує значних фінансових інвестицій. Отримання оцінки ефективності вітроелектростанції на основі даних з відкритих джерел і є метою цієї роботи.

## Результати

Перспективним регіоном щодо отримання промислового вітрового навантаження, як відомо, є Українські Карпати. Вітровий потенціал цього регіону за даними експертної компанії 3TIER<sup>®</sup> ([www.3tier.com](http://www.3tier.com)) визначається середньою швидкістю вітру на висоті 80 м у 7,5–9 м/с.

На рис. 1 наведено можливі вітрові навантаження у західній частині Карпат. Можна зауважити, що максимальні тривалі вітри спостерігаються на верхівках гірських хребтів уздовж течії р. Дністер. Саме тут ведуться інтенсивні роботи з проектування вітропарків. Насамперед – ТзОВ «Еко-Оптіма», що у кооперації з Європейським банком реконструкції та розвитку і Фондом чистих технологій Світового банку здійснило запуск першої черги з двох турбін ВЕС «Старий Самбір-1» з розширенням встановленої потужності до 13,2 МВт [4]. Також у цьому районі проектуванням ВЕС займається ТОВ «Дрогобич Енерджі», ТОВ «Карпатська ВЕС» та інші.

Одним із важливих питань спорудження ВЕС в тому чи іншому місці – проблема вітрових вимірів. Інформація таких компаній, як 3TIER, може бути використана для наближених розрахунків, оскільки відповідно до чинних нормативів розрахунків продуктивності ВЕУ має ґрунтуватися на результатах тривалих вітрових вимірювань, що призводить до певних фінансових витрат. Однак опубліковано результати [4] тривалих вимірів у західній частині Карпат, які надають подібну величину середньорічного вітрового потенціалу: 6,2–7,64 м/с на висоті 80 м.

Для оцінки ефективності ВЕС скористаємося технічними характеристиками вітрогенератора (ВГ), наприклад, Vestas V126 потужністю 3,3 МВт з робочим діапазоном вітру 3–25 м/с та з висотою башти 117 м. Потужність ВГ визначається такими параметрами: середньою швидкістю вітру на висоті осі ротора гондoli, напрям дії вітру, густиною повітря, добовим максимумом та мінімумом швидкості вітру [6].

$$P = k \cdot R \cdot V^3 \cdot S/2, \quad (1)$$

де  $k$  – коефіцієнт ефективності турбіни;  $R$  – густина повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – швидкість вітру, м/с;  $S$  – площа вітрового потоку, м<sup>2</sup>. Характеристика продуктивності ВГ за нормальних атмосферних умов має вигляд (рис. 2).

Методика [6] дає змогу отримати продуктивність ВЕС на основі заміряних, чи прогнозованих значень сили вітру та параметрів ВГ. Зміну параметрів вітру по висоті ВГ можна визначити за допомогою експоненціального закону Хелмана:

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

де  $H_2$  – висота, до якої здійснюється приведення,  $H_1$  – висота, для якої вимірювали силу вітру,  $V_{h1}$ ,  $V_{h2}$  – відповідні швидкості вітру,  $b$  – показник профілю місцевості встановлення ВГ ( $b=0,14 \div 0,30$ ). Для обробки даних вітрового навантаження для перспективного майданчика на верхів'ях хребтів у Турківському районі Львівської області України (координати досліджуваної ділянки – (lat., lon.) 49,2470; 22,8763) можна скористатися фактичним розподілом імовірності вітру за відомим аналітичним розподілом Вейбула:

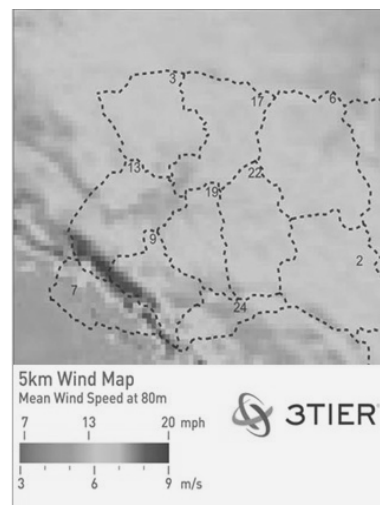


Рис. 1. Вітрові навантаження в Українських Карпатах за даними компанії 3TIER<sup>®</sup>

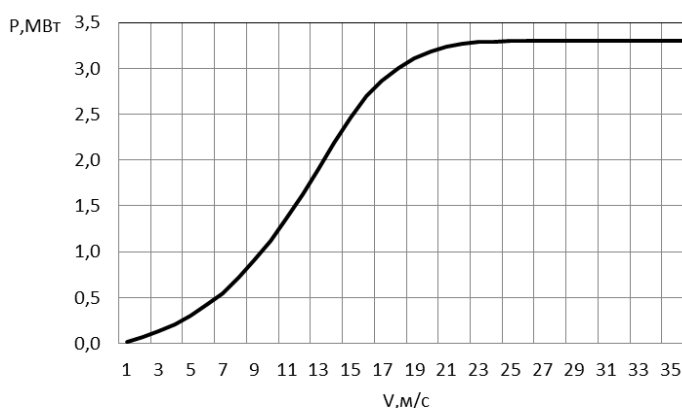


Рис. 2. Характеристика продуктивності ВГ

$$\Phi_v = \frac{k}{C} \left( \frac{V}{C} \right)^{k-1} \exp \left[ \left( - \frac{V}{C} \right)^k \right], \quad (3)$$

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

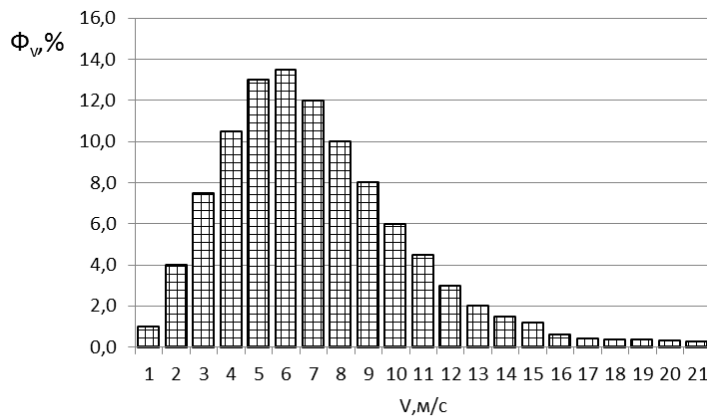


Рис. 3. Аналітичний розподіл Вейбула

зазначеної ділянки можна отримати з відкритих джерел компанії Vortex Factoria de Calculs SL комп'ютерної програми Vortex MAPS<sup>(TM)</sup>. У результаті використання даних компанії Vortex і на основі (2) та (3) отримано річний аналітичний розподіл Вейбула для зазначеної ділянки у вигляді рис. 3.

Виробництво електроенергії ВГ може бути визначено [6] так:

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

де  $\rho$  – густина повітря;  $A$  – площа вітроколеса;  $C_p$  – параметр, що характеризує ефективність використання вітроколесом енергії вітрового потоку (для ідеального ВГ  $C_p=0,59$ ).

Наведена в (1)–(4) методика реалізована в програмі Vortex MAPS<sup>(TM)</sup>, що дозволяє отримати такі результати.

Річні показники продуктивності ВГ для зазначеної ділянки в умовах гірського хребта з урахуванням (1) та отриманих за (2), (3) та (4) вітрових характеристик такі:

- річний час використання встановленої потужності  $T_{вст}=3298$  год;
- середньорічний ККД вітроустановки  $\eta = 37,65$  %;
- річний виробіток електроенергії –  $W= 10885,5$  МВт·год;
- середня швидкість вітру –  $V_c= 7,34$  м/с.

На основі отриманих показників наближено оцінимо ефективність побудови, наприклад, 10-агрегатної ВЕС в умовах обраної ділянки та типу ВГ. Виробництво електроенергії протягом року 106673 МВт·год з урахуванням 2 %-ї витрати на власні потреби та без урахування втрат у мережі електростанції.

Вартість виробленої електроенергії в Україні визначається «зеленим» тарифом, що становить 2,6238 грн./(кВт·год) для вітрових електростанцій (постанова НКРЕКП № 1637 від 28.05.2015 р). Врахуємо вартість однієї вітроустановки сумою у 3,3 млн. €, що відповідає експертним оцінкам. Для 10 ВГ вартість землевідведення, дозвільну і проектну документації, ліцензію на генерацію закладемо не більше ніж 1,9 млн. €, транспортні витрати, вартість будівельних і пусконаладжувальних робіт, зокрема вартість матеріалів і апаратів розподільних пристроїв, – 30 % можна отримати наближену вартість ВЕС у 44,8 млн. €. З урахуванням курсу НБУ від 6.04.2016 р – 29,642 грн./€ отримуємо величину валового прибутку протягом року експлуатації уявної електростанції  $\Pi_6=8,450$  млн. €.

Для оцінки експлуатаційних витрат приймемо витрати на обслуговування станції (зокрема заробітна плата, диспетчерське обслуговування), амортизаційні відрахування, оренда, інвестиційні відрахування на розвиток територій, податки – до 9,5 %. Тоді разом видатки становитимуть величину  $B \approx 991,4$  тис. €. В таких умовах орієнтовний прибуток протягом одного року становитиме величину  $\Pi_6 - B \approx 8,4$  млн. €. Термін окупності інвестиції  $T_{ок} \approx 5,3$  роки. У таблиці наведено результати оцінки ефективності 10-агрегатної ВЕС.