

УДК 330.5:338.3

Кузнцова Г.О.

кандидат економічних наук, докторант,
ПВНЗ «Міжнародний університет бізнесу і права»
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8048-6631>

ОСНОВНИ ПАРАМЕТРИ ВІТРОВОГО ПОТОКУ, СПЕЦИФІКА РОЗРАХУНКУ РЕСУРСУ ТА ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В РЕГІОНАХ

У статті досліджено теоретичні та практичні аспекти особливостей розрахунку ресурсу та економічної ефективності вітрової енергетики в регіонах та основні характеристики вітру. Розкриваються основні характеристики вітрового потоку, а також розглядаються особливості розрахунку ресурсу вітрової енергетики та економічної ефективності застосування вітроелектричних станцій. Наголошено, що для опису вітру як джерела енергії використовується сукупність аерологічних і енергетичних характеристик вітру, яка об'єднується поняттям вітроенергетичного кадастру. Досліджено основні кадастрові характеристики вітру. Доведено, що економічна ефективність використання вітроенергетичних установок для енергопостачання невеликих споживачів визначається наявним вітроенергетичним потенціалом, тарифом на електроенергію у споживача, вартістю використовуваної вітроенергетичної установки, технічними умовами на приєднання і рядом інших факторів. У статті зазначено, що маючи дані про середньорічні швидкості вітру, вертикальний профіль вітру, а також про повторюваність швидкості вітру, можна дати енергетичну характеристику вітрового потоку будь-якої місцевості і на будь-якій висоті (наведено відповідну методику розрахунку). Обґрунтовано, що найбільш економічними на сьогоднішній час є вітроенергетичні установки потужністю 100–300 кВт, а в майбутньому 250–350 кВт. Доведено, що рентабельність вітроенергетичної установки середньої потужності може бути забезпечена при розробці комбінованих систем безперебійного електропостачання, до складу яких входять сонячні електростанції або мінігідроелектростанції, або, де в якості резервного джерела електроенергії використовуються дизельелектричні станції.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, енергетична політика, регіональна економіка, сталий розвиток, паливно-енергетичний комплекс, вітроенергетична установка, енергія вітру, валовий ресурс, технічний ресурс.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВЕТРОВОГО ПОТОКА, СПЕЦИФИКА РАСЧЕТА РЕСУРСА И ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ В РЕГИОНАХ

Кузнцова Г.А.

В статье исследованы теоретические и практические аспекты особенностей расчета ресурса и экономической эффективности ветровой энергетики в регионах и основные характеристики ветра. Раскрываются основные характеристики ветрового потока, а также рассматриваются особенности расчета ресурса ветровой энергетики и экономической эффективности применения ветроэлектрических станций. Отмечено, что для описания ветра как источника энергии используется совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра, которая объединяется понятием ветроэнергетического кадастра. Исследованы основные кадастровые характеристики ветра. Доказано, что экономическая эффективность использования ветроэнергетических установок для энергоснабжения небольших потребителей определяется имеющимся ветроэнергетическим потенциалом, тарифом на электроэнергию у потребителя, стоимостью используемой ветроэнергетической установки, техническими условиями на присоединение и рядом других факторов. В статье указано, что, имея данные о среднегодовой скорости ветра, вертикальном профиле ветра, а также о повторяемости скорости ветра, можно дать энергетическую характеристику ветрового потока в любой местности и на любой высоте (приведена соответствующая методика расчета). Обосновано, что наиболее экономичными на сегодняшний день являются ветроэнергетические установки мощностью 100–300 кВт, а в будущем 250–350 кВт.

Доказано, що рентабельність ветроенергетической установки средней мощности может быть обеспечена при разработке комбинированных систем бесперебойного электроснабжения, в состав которых входят солнечные электростанции или мини гидроэлектростанции, или, где в качестве резервного источника электроэнергии используются дизель-электрические станции.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, энергетическая политика, региональная экономика, устойчивое развитие, топливно-энергетический комплекс, ветроенергетическая установка, энергия ветра, валовой ресурс, технический ресурс.

THE MAIN PARAMETERS OF THE WIND FLOW, THE SPECIFICS OF CALCULATING THE RESOURCE AND ECONOMIC EFFICIENCY OF WIND POWER IN THE REGIONS

Kuznyetsova G.O.

In the article, theoretical and practical aspects of features of calculation of a resource and economic efficiency of wind power in regions and the main characteristics of wind are investigated. The main characteristics of the wind flow are revealed, as well as the features of calculating the resource of wind energy and the economic efficiency of wind power stations are considered. It is noted that to describe wind as an energy source, a set of aerological and energy characteristics of wind is used, which is United by the concept of wind energy cadaster. The main cadastral characteristics of wind are investigated. It is proved that economic efficiency of using wind turbines for energy supply of small consumers is determined by available wind energy potential, the electricity tariff for the consumer, the cost of used wind turbines, technical conditions for connection and other factors. The article States that having data on the average annual wind speed, vertical wind profile, as well as on the repeatability of wind speed, it is possible to give an energy characteristic of the wind flow in any area and at any height (the corresponding calculation method is given). It is proved that the most economical today are wind power plants with a capacity of 100–300 kW, and in the future 250–350 kW. It is proved that the profitability of a wind power plant of medium capacity can be ensured by the development of combined uninterruptible power supply systems, which include solar power plants or mini-hydroelectric power plants, or where diesel-electric stations are used as a backup source of electricity. One of the types of alternative energy is actively developing in Ukraine, is wind energy. It is based on the principle of using wind energy. As you know, the wind has been used since ancient times. For example, in the ancient mills, the mention of which is dated to the first century ad. Today, the world is witnessing an intensive increase in the capacity of renewable energy. An important factor in its advanced development in various countries, regardless of size, geographical location, economic status and resource base of energy, are the environmental benefits of these sources and technologies to improve the environmental safety of renewable energy installations are constantly evolving, as well as the absence of greenhouse gas emissions. If we talk about the production of electricity, one of the factors contributing to the development of wind power in Ukraine is the "green" tariff at which the state buys electricity from energy producers from renewable energy sources. One of the promising RES for implementation in the regions of Ukraine (especially the southern region) are wind power plants (WPP). To increase the efficiency of their implementation, it is necessary to know the main characteristics of the wind (wind flow).

Keywords: renewable energy sources, energy policy, regional economy, sustainable development, fuel and energy complex, wind power plant, wind energy, gross resource, technical resource.

Постановка проблеми. Упродовж останніх семи років в Україні надзвичайно актуальним став розвиток альтернативної енергетики. Це зумовило збільшення встановленої потужності виробників енергії з відновлювальних джерел (ВДЕ) до 1375 МВт (станом на кінець 2017 року). Одним з видів альтернативної енергетики, що активно розвивається в Україні, є вітроенергетика. В її основу покладено принцип застосування енергії вітру. Як відомо, вітер використовували ще з античних часів. Наприклад, у стародавніх млинах, згодка про які датована першим століттям нашої ери. Сьогодні у всьому світі спостерігається інтенсивний приріст потужності відновлюваної енергетики. Важливим фактором її випереджального розвитку у різних країнах, незалежно від розмірів, географічного положення, економічного стану та ресурсної бази енергетики, є екологічні переваги цих джерел і технології підвищення екологічної безпеки установок на основі ВДЕ, що постійно розвиваються, а також відсутність емісії парникових газів. Якщо ж говорити про виробництво електроенергії, то одним із чинників, що сприяв розвитку вітроенергетики в Україні, є «зелений» тариф, за яким держава купує електроенергію у виробників енергії з ВДЕ. Одним з перспективних ВДЕ, для впровадження на території регіонів України (особливо Південного регіону) є вітроелектричні станції

(ВЕС). Для підвищення ефективності їх впровадження необхідно знати основні характеристики вітру (вітрового потоку). Усе вищезазначене і зумовило актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливі аспекти розвитку відновлюваної енергетики стали предметом дослідження низки зарубіжних науковців. Зокрема, слід відзначити Н. Вагнера, Д. Гілена, М. Делуччі, М. Джейкобсона, Д. Ергіна, І. Коссе, Є. Круковську, А. Макрона, У. Мосленера, Дж. Радеке, Д. Сайгіна, Р. Титко, Е. Ушера, Г. Фелль та ін.

Вагомий внесок у розробку теоретико-методичних і науково-прикладних засад розвитку відновлюваної енергетики в Україні зробили вітчизняні дослідники І. Андрійчук, С. Боблях, В. Білодід, П. Васько, Г. Гелетуха, М. Гнідий, Г. Денисенко, О. Дроздова, С. Дубовський, Т. Железна, В. Калініченко, В. Ключ, А. Конеченков, С. Кудря, М. Кулик, П. Кучерук, Ю. Морозов, Н. Мхітарян, О. Новосельцев, Е. Олійник, Г. Півняк, В. Резцов, Ф. Шкрабець та ін.

Постановка завдання. Метою дослідження є аналіз основних характеристик вітрового потоку, а також дослідження особливостей розрахунку ресурсу вітрової енергетики та економічної ефективності застосування вітроелектричних станцій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Обмеженість природних запасів палива для традиційної енергетики і у зв'язку з цим практично щорічне підвищення тарифів на електроенергію, а також негативні екологічні наслідки традиційних джерел електроенергії розкривають широкі перспективи щодо застосування відновлюваних джерел електричної енергії (ВДЕ).

Прогноз розвитку ВДЕ показує, що їх частка в світовому балансі енергоспоживання до 2030 року може скласти до 20% (без урахування великої гідроенергетики). Однак прогнози будуть збуватися за умови якомога швидшого і широкого впровадження цих джерел енергії: кожне нове джерело вимагає від 30 до 50 років для того, щоб його частка в загальному енергобалансі зросла з 1 до 10% [5].

Сучасна вітроенергетика в багатьох розвинених країнах світу є частиною енергетичних систем, а в ряді країн – однією з головних складових альтернативної енергетики на основі ВДЕ. На жаль, в даний час частка нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії (включаючи і вітроенергетику) становить в енергобалансі нашої країни лише 1,5–2 % [4]. Проте в регіонах України є об'єктивні ресурсні, соціально-економічні та екологічні передумови для широкомасштабного використання, як вітроенергетики, так і інших відновлюваних джерел енергії [1].

Сьогодні у всьому світі спостерігається інтенсивний приріст потужності відновлюваної енергетики. Важливим фактором її випереджального розвитку у різних країнах, незалежно від розмірів, географічного положення, економічного стану та ресурсної бази енергетики, є екологічні переваги цих джерел і технології підвищення екологічної безпеки установок на основі ВДЕ, що постійно розвиваються, а також відсутність емісії парникових газів.

У багатьох країнах відбувається вирівнювання вартостей традиційних джерел енергії та ВДЕ, насамперед у зв'язку з посиленням екологічних вимог і підвищенням вартості енергії традиційних електростанцій, особливо вугільних, а вартість обладнання відновлюваної енергетики настільки ж безперервно знижується за рахунок технологічного вдосконалення.

Станом на 1 січня 2018 року загальна встановлена потужність ВДЕ в світі (без великої гідроенергетики) склала по електроенергії понад 600 ГВт, а до 2020 року має зрости приблизно в два рази. Розвиток використання ВДЕ прийняв прискорений характер, особливо швидкими темпами розвиваються вітроенергетика та сонячна енергетика [7].

Вже до кінця 2017 року загальна встановлена потужність вітроелектричних станцій (ВЕС) в світі склала понад 60 тис. МВт, в Європі більше 30 тис. МВт. Дані показники енергетичної й економічної ефективності зробили вітроенергетичні установки (ВЕУ) ринково конкурентоспроможними у порівнянні із традиційними джерелами енергії. Оцінка світового вітроенергетичного ринку становить зараз більше 10 млрд доларів на рік [6].

Одним з перспективних ВДЕ, для впровадження на території Південного регіону України є вітроелектричні станції (ВЕС). Для підвищення ефективності їх впровадження необхідно знати основні характеристики вітру (вітрового потоку).

Відомо, що основною причиною виникнення вітру є нерівномірне нагрівання сонцем земної поверхні. Крім того, земна поверхня неоднорідна: суша, океани, гори, ліси обумовлюють різне нагрівання поверхні під однією і тією ж широтою. Обертання Землі також викликає відхилення повітряних течій.

Для опису вітру як джерела енергії використовуються сукупність аерологічних і енергетичних характеристик вітру, що об'єднується поняттям вітроенергетичного кадастру. До числа основних кадастрових характеристик вітру відносяться:

- середньорічна швидкість вітру;
- річний і добовий хід вітру;
- повторюваність швидкостей вітру;
- повторюваність напрямків вітру;
- максимальна швидкість вітру;
- питома потужність і питома енергія вітру;
- вітроенергетичні ресурси району.

Дані про середньорічні швидкості вітру служать вихідною характеристикою загального рівня інтенсивності вітру. За величиною середньорічної швидкості вітру в першому наближенні можна судити про перспективність застосування вітроелектричних установок в тому чи іншому районі. Однак необхідно мати на увазі, що швидкість вітру залежить від рельєфу місцевості, шорсткості поверхні, наявності темних елементів, висоти над поверхнею землі. У різних станцій ці умови можуть істотно відрізнятися. Тому для зіставлення середніх швидкостей вітру їх необхідно приводити до порівнянних умов. Як правило, за порівнянних умови приймають умови відкритої рівнини місцевості і висоту 10 м від поверхні землі [3].

Річний хід вітру – це сезонна зміна середніх швидкостей вітру. Добовий хід вітру – це зміна середніх швидкостей вітру протягом доби. Найбільш чітко він простежується в літній час і мало проявляється взимку. В умовах зниження загального рівня інтенсивності вітру в літній час денний максимум швидкостей вітру є сприятливим для ефективного використання енергії вітру, оскільки саме в денні години, як правило, спостерігається підвищена потреба в енергії зі сторони споживача [1].

Повторюваність напрямків вітру показує, яку частину часу протягом розглянутого періоду (місяця, року) дули вітри того чи іншого напрямку. Правильний облік напрямків вітру відіграє важливу роль у визначенні оптимального розташування ВЕУ на місцевості.

Відомості про максимальні швидкості вітру є важливою складовою частиною вітроенергетичного кадастру. Вони необхідні для виконання розрахунків на міцність окремих вузлів і елементів ВЕУ (вежі, лопатей, пристроїв орієнтації на вітер і ін.). Помилка у визначенні максимальних швидкостей може призвести до зайвого запасу міцності і обвісу конструкції ВЕУ, або навпаки, до створення недостатньо міцних установок, наслідком чого може бути їх руйнування.

Визначення максимальної швидкості базується на результатах спостережень за минулий час і являє собою по суті прогноз на майбутнє. У прикладній кліматології про максимальну швидкість вітру прийнято говорити як про швидкість, можливу один раз в задане число років. На більшій висоті швидкості вітру можливі вище.

Потужність вітрового потоку пропорційна щільності повітря, площі поперечного перерізу потоку і

швидкості вітру третього ступеня. В силу кубічної залежності від швидкості потужність вітру є вкрай мінливою величиною, що змінюється в широких межах.

Середньорічна питома енергія вітру (енергія, що протікає за рік через поперечний переріз вітроколеса) є інтегральною (усередненою) характеристикою. Вона залежить ще й від повторюваності швидкостей вітру, тобто від того, протягом якого проміжку річного часу дув вітер з тією чи іншою швидкістю [4].

Маючи дані про середньорічні швидкості вітру, вертикальний профіль вітру, а також про повторюваність швидкості вітру, можна дати енергетичну характеристику вітрового потоку будь-якої місцевості і на будь-якій висоті.

При оцінці енергетичних ресурсів зазвичай розглядають потенційні, технічні та економічні ресурси.

Під потенційними вітроенергоресурсами розуміється сумарна енергія руху повітряних мас, що перемищуються за рік над даною територією.

Під технічними вітроенергоресурсами розуміється та частина потенційних ресурсів, яка може бути використана з допомогою наявних в даний час технічних засобів. Вони визначаються з урахуванням неминучих втрат при використанні вітрової енергії.

Відповідно до теорії ідеального вітроколеса в корисну роботу може бути перетворена тільки частина енергії, що проходить через перетин вітроколеса.

Максимум корисної енергії оцінюється коефіцієнтом використання енергії вітру, максимальне значення якого дорівнює 0,593. В даний час у кращих зразків вітчизняних і зарубіжних вітроколес цей параметр досягає значень 0,45–0,48 [2].

Крім того, як показує практика, існуючими конструкціями БЕУ повністю використовується не весь діапазон швидкостей вітру. При швидкостях вітру нижче мінімальної робочої потужності вітроколеса, енергії не вистачає навіть на подолання сил тертя в вузлах БЕУ. У діапазоні швидкостей від мінімальної робочої до розрахункової, при якій БЕУ розвиває встановлену потужність, використання енергії вітру здійснюється найбільш повно. При подальшому посиленні вітру до максимальної робочої швидкості потужність БЕУ підтримується на постійному рівні завдяки роботі регулювальних пристроїв. При швидкостях вітру вище максимальної робочої, щоб уникнути поломки, БЕУ виводиться з роботи.

Швидкість вітру є найважливішою характеристикою технічних властивостей вітру – це відстань в метрах, що проходить масою повітря протягом однієї секунди.

Максимальний коефіцієнт використання енергії вітру не може бути більше $\xi=0,192$.

На відміну від інших видів ВДЕ у визначення валового потенціалу вітрової енергетики входить умова можливості її використання, оскільки вітер займає величезні обсяги в атмосфері Землі над регіоном, а значить навіть теоретично можливо використовувати лише малу частину загального ресурсу вітрової енергетики [3]. Тому визначення валового (теоретичного) ресурсу (потенціалу) для вітрової енергетики наступне.

Валовий ресурс (потенціал) вітрової енергетики регіону – це частина середньорічної сумарної вітрової енергії, яка доступна для використання на площі регіону протягом одного року.

Валовий потенціал вітрової енергетики регіону визначається за формулою:

$$W_B = 0,025 p T S \sum_{i=1}^n v_i^3 t_i, \quad (1)$$

де p – густина повітря, кг/м^3 ;

$T = 8760$ – число годин в році;

S – площа території, м^2 ;

v – середньорічна швидкість вітру в діапазоні i ;

t – вірогідність знаходження швидкості в діапазоні i .

Технічний ресурс вітрової енергетики регіону це частина валового потенціалу вітрової енергетики, яка може бути використана при сучасному рівні розвитку технічних засобів та дотримання екологічних норм.

Технічний ресурс вітрової енергетики регіону:

$$W_T = 0,01 \frac{N_C}{D^2} T S, \quad (2)$$

де N_C – середня потужність БЕУ, яка визначається за формулою:

$$N_C = \frac{\pi D^2}{8} p \sum_{i=1}^n v_i^3 \eta_{BEU} t_i, \quad (3)$$

де η_{BEU} – загальний ККД БЕУ, який визначається за формулою:

$$\eta_{BEU} = C_p \eta_{mex} \eta_{el}, \quad (4)$$

де C_p – коефіцієнт використання вітру;

η_{mex} – механічний ККД БЕУ;

η_{el} – електричний ККД БЕУ.

Як видно з (2) і (3) технічний потенціал залежить тільки від середньої швидкості вітру і її розподілу. Однак, враховуючи, що швидкість вітру, прийнята в зазначених формулах, залежить від висоти, а висота вежі вибирається в залежності від потужності (діаметра вітроколеса), то таким чином технічний потенціал залежить також і від потужності БЕУ [1].

Вітрова енергетика є одним з дешевих ВДЕ. Проблема широкого використання БЕУ в даний час пов'язана з їх економічною ефективністю в порівнянні із традиційними джерелами енергії.

Вартість ВЕС, в тому числі і БЕУ залежить від їх потужності, вартості виробництва відповідного обладнання, витрат на транспортування і вартості будівництва.

Основний підхід до розрахунку економічних показників БЕУ включає визначення ефективності БЕУ в конкуренції з традиційними джерелами електроенергії в конкретному регіоні [2].

Найбільш гостре питання вітроенергетики – економічна ефективність і екологічність БЕУ. Обґрунтування параметрів БЕУ, її розмірів, типу, можливої кількості електроенергії виробляється на основі техніко-економічних розрахунків та інженерного проектування з урахуванням вимог споживача, його структури електрогосподарства, зв'язку з енергосистемою, кількості споживаної електроенергії, витрат на оплату цієї енергії, а також місця розташування об'єкта енергопостачання та природно-кліматичних характеристик в цьому районі [4].

Кількість вітрової енергії, яку можна отримати в кожному конкретному місці, характеризується технічним вітроенергетичним потенціалом, що залежить від швидкості вітру. За основу приймаються середні багаторічні значення швидкостей вітру на висоті флюгера, перераховані на висоту вітроагрегату.

Вироблення електроенергії ВЕУ визначається за формулою:

$$E = 0,01T \sum_{i=v_{\text{в}}}^{v_{\text{от}}} P_{\text{ВЕУ}}(k_h v) f_i(v), \quad (5)$$

де T – розглянутий період часу (найчастіше рік, тобто $T = 8760$ год);

$P_{\text{ВЕУ}}(k_h v)$ – залежність корисної потужності ВЕУ від швидкості вітру на висоті осі вітроколеса, при i , що змінюється в діапазоні від швидкості включення $v_{\text{в}}$ до швидкості відключення $v_{\text{от}}$ із кроком $0,5 - 1$ м/с;

$k_h v$ – швидкість вітру на висоті осі вітроколеса, м/с, де k_h – поправочний коефіцієнт, що враховує різницю висот

$$k_h = \left(\frac{h_{\text{осі}}}{h_{\text{ф}}} \right)^n, \quad (6)$$

де $h_{\text{осі}}$ – висота осі вітроколеса щодо основи вежі, м;

$h_{\text{ф}}$ – висота флюгера, м;

n – ступеневий коефіцієнт, що враховує характер зміни швидкості вітру із висотою;

$f_i(v)$ – інтегральна повторюваність швидкості вітру, %.

Для розрахунків у зазначеному діапазоні швидкостей вітру корисної потужності ВЕУ $P_{\text{ВЕУ}}$ (кВт) для заданої швидкості вітру на висоті осі вітроколеса $k_h v$ (м/с) і діаметрі ротора ВЕУ D_1 (м) визначається за формулою:

$$P_{\text{ВЕУ}} = P_{\text{пит}} S_{\text{ВЕУ}} \eta_p \eta_g \sigma 10^{-3}, \quad (7)$$

де $P_{\text{пит}}$ – питома потужність вітрового потоку зі швидкістю $k_h v$ через одиничну площу, що визначається за формулою (з урахуванням, що ρ – густина повітря, кг/м³)

$$P_{\text{пит}} = 0,5 \rho (k_h v)^3, \text{ Вт} / \text{м}^2 \quad (8)$$

$S_{\text{ВЕУ}}$ – площа ВЕУ з горизонтальною віссю обертання, обчислюється за формулою:

$$S_{\text{ВЕУ}} = \frac{\pi D^2}{4}, \text{ м}^2, \quad (9)$$

D – діаметр вітроколеса;

σ – коефіцієнт потужності (в практичних розрахунках приймають рівним 0,45), відн. од.;

η_p – ККД ротора ВЕУ (близько 0,9), відн. од.;

η_g – ККД генератора (близько 0,95), відн. од.

У вітроенергетиці зазвичай використовують робочий діапазон швидкостей вітру, що не перевищують 25 м/с. Ця швидкість відповідає 9-му вітру (шторм) за 12-бальною шкалою Бофорта.

У таблиці 1 наведено значення питомої потужності $P_{\text{пит}}$ для зазначеного робочого діапазону швидкостей вітру.

Виконавши розрахунки по (5)-(9) для декількох ВЕУ, отримані значення вироблення енергії ВЕУ слід порівняти з графіком споживання енергії об'єктом і призначити встановлену потужність ВЕУ таким чином, щоб виробництво енергії забезпечувало покриття зна-

чної частини графіка споживання. Тоді більшу частину року ВЕУ буде працювати в режимі економії енергії і мінімальний час передавати енергію в зовнішню мережу.

Економічна ефективність використання ВЕУ для енергопостачання невеликих споживачів визначається наявним вітроенергетичним потенціалом, тарифом на електроенергію у споживача, вартістю використовуваної ВЕУ, технічними умовами на приєднання і рядом інших факторів.

Термін окупності при впровадженні вітроагрегату може бути визначений за формулою:

$$t_{\text{ок}} = \frac{P \cdot v}{E \cdot C_T - B_{\text{екс}}}, \quad (10)$$

де $P \cdot v$ – загальна вартість установки (капітальні витрати) з урахуванням вартості агрегату, транспортування, митних витрат, проектних і будівельно-монтажних робіт, грн;

E – електроенергія, що виробляється установкою на рік, кВт · год/рік;

C_T – тариф на електроенергію, грн/кВт · год;

$B_{\text{екс}}$ – витрати експлуатації, грн/год.

Вартість енергії, що виробляється ВЕУ грн/(кВт · год) пов'язана з терміном служби установки t_{cy} співвідношенням:

$$C = \frac{P \cdot c + B_{\text{екс}} \cdot t_{\text{cy}}}{E \cdot t_{\text{cy}}}. \quad (11)$$

Загальний прибуток від використання ВЕУ може бути визначений як щорічний прибуток від заощадженої електроенергії, виробленої установкою, помножений на період її роботи після терміну окупності з урахуванням щорічного корегування тарифу і витрат експлуатації:

$$\Pi = (t_{\text{cy}} - t_{\text{ок}}) \sum_{i=t_{\text{ок}}} (E_i C - B_{\text{екс}}). \quad (12)$$

Також техніко-економічну досконалість ВЕУ можна характеризувати таким параметром як коефіцієнт використання встановленої потужності вітроустановки $K_{\text{уст}}$. Він являє собою відношення поточного вироблення електроенергії за певний період часу, наприклад за рік ($W_{\text{год}}$), до максимально можливого вироблення ($W_{\text{max}} = 8760 P_{\text{ном}}$) енергії в разі, якби ВЕУ працювала весь цей період часу на номінальній (тобто 100%) потужності $N_{\text{ном}}$.

$$K_{\text{уст}} = \frac{W_{\text{год}}}{8760 P_{\text{ном}}}. \quad (13)$$

Приблизні розрахунки різних об'єктів показали, що термін окупності об'єктів може становити 3,5–5 років і знижується в умовах зростання тарифу на електроенергію.

Дослідження, проведені в ряді країн, показали, що найбільш економічними зараз є ВЕУ потужністю 100...300 кВт, а в майбутньому очікується 250...350 кВт [7]. Рентабельність ВЕУ середньої потужності може

Таблиця 1

Значення питомої потужності для робочого діапазону швидкостей вітру

$k_h v$, м/с	2	3	4	5	10	14	18	20	23	25
$P_{\text{пит}}$, Вт/м ²	4,9	16,55	39,2	76,6	613	1682	3575	4904	7458	9578

Джерело: розроблено автором на основі [3]

бути забезпечена при розробці комбінованих систем безперебійного електропостачання, до складу яких входять сонячні електростанції або мінігідроелектростанції, або, де в якості резервного джерела електроенергії використовуються дизельелектричні станції (ДЕС).

Висновки з проведеного дослідження. Резюмуючи сказане вище, можна дійти висновку, що одним з перспективних ВДЕ, для впровадження на території Південного регіону України є вітроелектричні станції. Для підвищення ефективності їх впровадження необхідно знати основні характеристики вітру (вітрового

поток). Найбільш гостре питання вітроенергетики – економічна ефективність і екологічність ВЕУ. Обґрунтування параметрів ВЕУ, її розмірів, типу, можливої кількості електроенергії, що виробляється на основі техніко-економічних розрахунків та інженерного проектування з урахуванням вимог споживача, його структури електрогосподарства, зв'язку з енергосистемою, кількості споживаної електроенергії, витрат на оплату цієї енергії, а також місця розташування об'єкта енергопостачання та природно-кліматичних характеристик в цьому районі регіону.

1. Гончаренко І. А. *Методологія і практика стратегічного планування економічного розвитку регіону. Ефективність державного управління: збірник наукових праць*. 2017. Вип. 25. С. 422-427.
2. Купчак В. Р. *Оценка региональных энергоэкономических связей причерноморского региона Украины. Азимут научных исследований: экономика и управление*. 2017. № 3(12). С. 37-41.
3. Прокопенко В. В. *Енергетичний аудит з прикладами та ілюстраціями*. Київ: Освіта України, 2016. 438 с.
4. Яковенко Л. І. *Світовий досвід розробки програм енергозбереження. Економіка: проблеми теорії та практики: Збірник наукових праць*. Випуск 255: В 9 т. Т. II. Дніпропетровськ : ДНУ, 2017. С. 388-398.
5. *Energy Statistics of Non-OECD Countries*. 2017 Edition. Paris: IEA Publication, 2018. 770 p.
6. *Energy to 2050. Scenarios for a Sustainable Future*. OECD/IEA, 2018.
7. *Europe's Vulnerability to Energy Crises*. London: World Energy Council, 2018. 102 с.