

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІТРОСТАНЦІЙ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ З ДОДАТКОВИМИ ВИТРАТАМИ ТА УЧАСТЮ В БАЛАНСУЮЧОМУ РИНКУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

К. Б. Покровський, кандидат технічних наук, доцент

Національний університет «Львівська політехніка»

E-mail: kpokrov@gmail.com

Анотація. Світова енергетика в своєму розвитку безупинно демонструє зростання споживання електроенергії. Традиційні електростанції в цьому процесі забезпечують збільшення парникових викидів та загострення кліматичних проблем, що з кожним роком збільшують свою актуальність. На цьому фоні сучасні альтернативні джерела енергії, а саме вітрові електростанції, сприяють зниженню впливу традиційних електростанцій та спонукають до розв'язання екологічних проблем. Розвиток світової вітроенергетики супроводжується зростанням одиничних потужностей генераторів вітрових електростанцій. У роботі проведено аналіз ефективності вітрової електростанції на основі сучасних вітрогенераторів для наперед визначених умов розташування з урахуванням експлуатаційних витрат на основі досвіду експлуатації та на основі оцінки участі електростанції в балансуєчому ринку електроенергії з відмовою від «зеленого тарифу». Здійснено розрахунки техніко-економічних показників уявної проекрованої 4-агрегатної вітроелектростанції з різними вітрогенераторами за вітрових умов наперед заданого промислового майданчика, що розташований в регіоні Карпат України. У розрахунках враховано сучасні типові характеристики вітрогенераторів, додаткові експлуатаційні витрати та оціночну вартість закупівлі електроенергії станції за «зеленим тарифом» та в умовах балансуєчого ринку електроенергії для порівняння економічної ефективності. Для прийняття оптимального проектного технічного рішення з порівняльною оцінкою визначено для встановлення на уявній вітростанції три типи вітрогенераторів – Enercon E-175 EP5, Vestas V172-7.2 MW та Vestas V136-4.5 MW. В умовах наперед визначеної ділянки будівництва проекрованої вітростанції на хребтах Карпат України застосовано заміряний та розрахований річний розподіл імовірності швидкості вітру за аналітичним розподілом Вейбула та наведено характеристики річної продуктивності 4-агрегатної вітростанції для прийнятих трьох типів вітрогенераторів. У роботі отримано техніко-економічні характеристики: капіталовкладення, експлуатаційні витрати, характеристики виробництва електроенергії, розраховано валовий прибуток протягом річної експлуатації вітроелектростанції з трьома варіантами встановлення вітрогенераторів, які дають можливість оцінити час окупності інвестиції в будівництво вітростанції. Так, для 4-агрегатної станції з генераторами Enercon E-175 EP5 час окупності становить 3,3 роки, а з вітрогенераторами типу Vestas V136-4.5 MW – 3,4 роки,

так само і для Vestas V172-7.2 MW в умовах дії «зеленого тарифу», відповідно, 2,9 роки, 2,9 роки та 3,0 роки в умовах продажу електроенергії за цінами балансуючого ринку. Додаткові експлуатаційні витрати на утилізацію зношених лопатей вітротурбіни не мають значного впливу на загальні показники витрат і складають величину у 5-7 % на загальні витрати.

Ключові слова: *вітрова електростанція, вітрогенератори, реальні вітрові умови, характеристики продуктивності, термін окупності*

Актуальність. Динаміка світової енергетики за показниками встановленої потужності альтернативних відновлюваних джерел електроенергії та їх виробництвом демонструє стабільний зріст. При цьому вітрова енергетика показує значні темпи розвитку впливу на рівень виробництва електроенергії. Останніми роками з'являлися повідомлення, що до застосування переважно альтернативних та відновлюваних джерел електроенергії в окремих країнах у періоди зниження графіків навантаження [1]. У такі періоди частка електроенергії, що отримана від альтернативних електростанцій, складала до 87 %. Застосування разом з ними вітрових електростанцій (ВЕС) знижує споживання традиційних первинних енергоресурсів, при цьому сприяє технологічному розвитку територій, створенню робочих місць, знижує кількість викидів CO₂. Розвиток світової енергетики супроводжується збільшенням одиничних потужностей генераторів. Разом з тим формується новий досвід експлуатації електростанцій, що пов'язаний з проявом додаткових факторів, які впливають на загальну ефективність, зокрема і вітроенергетики. Факторами впливу на результат роботи вітростанцій є невинне зростання одиничної потужності вітрогенератора, разом з тим і додаткові витрати вітроелектростанцій [2] на ремонт та запасні частини та пов'язана з цим логістика. Цю інформацію, що визначає ефективність роботи вітроелектростанції слід враховувати в процесах проектування та планування роботи електростанції з урахуванням умов конкретного регіону.

Сучасний рівень розвитку української вітроенергетики має значно менші динамічні характеристики розвитку, ніж середньосвітові. У 2018 році вітростанціями України було вироблено 974 тис. МВт·год електроенергії, разом з тим частина вітроенергетики у загальному балансі складала 0,62 % та 0,9 % у

загальній потужності генераторів. Це знижує викиди CO₂ на 490 тис. тон. У 2021 році номінальна потужність вітрогенераторів досягла значення у 1673 МВт. Розвиток генерації в Україні і надалі буде потребувати зменшення залежності від викопних типів палива, його імпортування та зниження викидів в атмосферу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Ефективність вітростанції визначається кількома показниками, що дозволяють врахувати певні фактори для прийняття конкретних технічних рішень. До таких факторів відноситься наявне законодавство, результати інженерно-пошукових робіт, витрати на логістику, особливо в умовах гірських хребтів, результату визначення вітрового потенціалу, тощо [3,4]. На показники ефективності ВЕС разом з цим впливає особливість вимог законодавства по «зеленому тарифу» чи закупівельна ціна в умовах енергоринку, що пов'язано з частиною застосування продукції вітчизняних виробників. Слід також враховувати світові тенденції щодо цін на вітрові генератори, які за станом на 2022 рік складали 800-950 тис. € за МВт [4].

У ході оцінки експлуатаційних витрат має бути врахованим досвід доволі тривалої роботи вітроелектростанцій в умовах енергосистем, яка супроводжується додатковими фінансовими витратами на ремонт та обслуговування обладнання. Такі витрати можуть скласти наближено до 50 % від прямих витрат, які пов'язані з позаплановими замінами елементів обладнання. Лише капітальні елементи – редуктора, електрогенератори, лопаті турбін – можуть утворити вартість до 10000 € на одну турбіну на рік [2].

Мета дослідження – реалізація оцінки ефективності роботи вітростанції з сучасними вітрогенераторами за умов конкретної ділянки розташування будмайданчика в Українських Карпатах з урахуванням додаткових експлуатаційних витрат на основі досвіду експлуатації та актуальних форм реалізації генерованої електроенергії.

Матеріали і методи дослідження. Стартовим етапом для початку оцінки продуктивності ВЕС в реальних умовах і є характеристика визначеної ділянки для промислового майданчика. З метою отримання вітрових характеристик для конкретного майданчика у верхів'ях хребтів Карпат України (координати

майданчика – (lat., lon.) 49,2470; 22,8763) можна прийняти фактичний розподіл імовірності швидкості вітру відповідно до аналітичного розподілу Вейбула, який отримано раніше в результаті тривалої вимірної кампанії у вигляді:

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

де Φ_V – функційний розподіл імовірності вітру, %; k – коефіцієнт розсіювання; C – коефіцієнт масштабування, що визначається за середньою швидкістю вітру і наближено складає $C=2V_{сер}/\pi^{1/2}$; V – швидкість вітру, що оцінюється за результатами вимірів, м/с. Наведену характеристику розподілу вітрових характеристик майданчика отримано з відкритих джерел [3]. У результаті застосування цих характеристик отриманий річний аналітичний розподіл Вейбула зазначеної ділянки у вигляді, представленою на рис. 1.

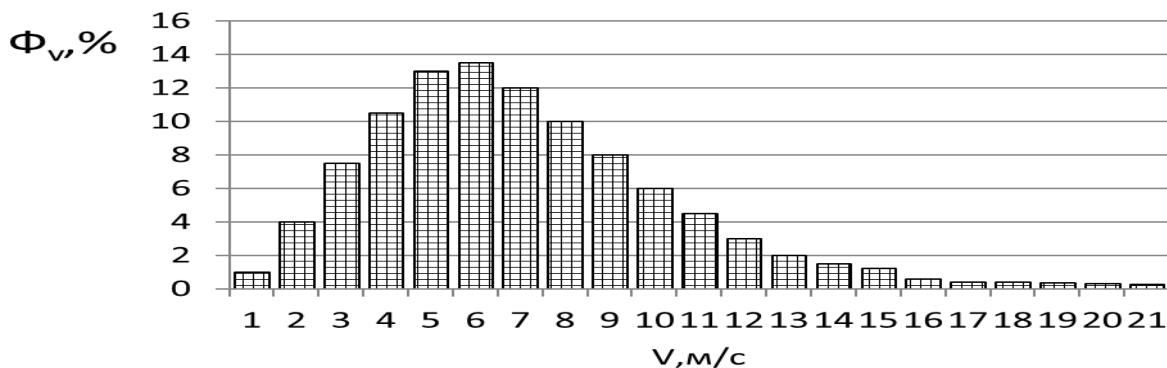


Рис. 1. Аналітичний розподіл Вейбула обраної ділянки

Наведені характеристики отримано для вимірної вежі висотою у 100 м. Для перерахунку до реальної висоти вітрогенератора слід застосувати експоненційний закон Хелмана [4]:

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

де H_2 – висота досліджуваного вітрогенератора; H_1 – висота башти, на якій здійснювалися заміри; V_{h2} , V_{h1} – відповідні швидкості вітру; b – показник характеру профіля місцевості для монтажу вітрогенератора ($b = 0,13 \div 0,31$).

Інтенсивність та напруженість розвитку ринків світової вітроенергетики стимулює ринок вітротурбін і появу нових пропозицій виробників цього обладнання

з вищими показниками продуктивності та потужності.

Вітрогенератори значної потужності від знамих у світі виробників - Enercon, Fuhrlander, Vestas, Gamesa, Alstom та Guangdong MingYang, тощо у певній мірі різняться між собою, що надає можливості вибору на основі порівняльних характеристик. Остаточний вибір типу вітротурбіни пов'язаний з оцінкою продуктивності та прибутковості, і, отже – ефективності в реальних умовах роботи. Станом на 2023 рік сучасними номінальними потужностями вітрогенераторів є 4,5–7,5 МВт. Розглянемо техніко-економічні показники уявної вітростанції, що розташована на зазначеній вище ділянці. Для розрахунку показників вітростанції оберемо два типи вітрогенераторів – *Enercon E-175 EP5* [4], *Vestas V136-4.5 MW* та *V162-7.2 MW* [5]. Параметри обраних вітрогенераторів наведено в таблиці 1.

1. Параметри вітротурбін

Характеристика	Enercon E-175 EP5 №1	Vestas V136 №2	Vestas V162 №3
Номінальна потужність, МВт	6,0	4.5	6.8
Діаметр ротора, м	175	136	162
Висота башти, м	160	112	169
Площа охоплення ротора, м ²	24056	14527	20612

Розрахункова потужність вітрогенератора для конкретного випадку місця установки визначається такими параметрами: швидкість вітру на висоті осі вітротурбіни, густиною повітря, добовими показниками максимальної та мінімальної швидкості вітру [3,4]

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

де k – коефіцієнт ефективності турбіни; ρ – густина повітря на номінальній висоті, кг/м³; V – значення швидкості вітру, м/с; S – площа захоплення вітрового потоку, м².

Характеристики продуктивності зазначених для аналізу типів вітротурбін можна отримати з паспортних даних виробника. Вироблення електроенергії вітрогенератором може бути визначено так:

$$E = \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \left[\frac{1}{2} \rho S V^3 C_t \Phi_V T \right] dV, \quad (4)$$

де ρ – густина повітря; S – площа вітрогенератора; C_t – параметр, який характеризує ефективність використання вітрогенератором енергії вітрового потоку [5, 6].

Для уявної вітроелектростанції з обраними вітрогенераторами річні показники виробництва для зазначеного майданчика в умовах гірських хребтів з врахуванням розподілу Вейбула (1), (2) та наведених за (3), (4) вітрових характеристик отримують такі значення (таблиця 2):

2. Характеристики виробництва

Тип вітрогенератора	Кількість турбін	Річний виробіток, МВт·год
<i>Enercon E-175 EP5</i>	4	79891.2
<i>Vestas V136-4.5 MW</i>		59918.4
<i>Vestas V172-7.2 MW</i>		90543.4

Розраховані показники річного виробництва вітроелектростанції дають можливість отримати наближену оцінку ефективності 4-агрегатної станції в умовах визначеної ділянки для трьох типів вітрогенераторів.

Величину капіталовкладень у будівництво вітроелектростанції можна отримати на основі експертних оцінок з урахуванням витрат на вітрогенератори вартістю 0,85 млн. €/МВт [5], вартості проектування – 0,9 млн. €, ліцензування генерації – 0,4 млн. €, вартості відведення землі – 0,26 млн. €, транспортного, будівельного та монтажного забезпечення – 15% від вартості вітрогенераторів.

Витрати на експлуатацію можна наближено оцінити у 8,5% – у т.ч. витрати на зарплатню, на диспетчерське обслуговування, на амортизаційні відрахування, на оренду та інвестиційні відрахування на розвиток території, на податки. Разом з тим, на експлуатаційні витрати слід віднести суму у 10.000 € на одну вітрогенератору протягом року, що визначається необхідністю післяаварійного відновлення устаткування електростанції [2].

Результати дослідження та їх обговорення. З одного боку, вартість генерованої електроенергії на вітроелектростанціях в Україні визначається «зеленим»

тарифом, що затверджується Урядом і складає станом на 05.09.2023 р. 4.264 грн/кВт·год. На основі річного виробітку вітроелектростанції це надає можливість розрахунку прибуткових характеристик (табл. 3).

3. Результати розрахунку техніко-економічних показників вітроелектростанції на основі «зеленого тарифу»

Тип вітрогенератора	Кількість ВГ, шт.	"Зелений" тариф на 05.09.2023 грн./кВт·год	Капітало-вкладення, тис. €	Експлуатаційні витрати, тис. €	Річний прибуток, тис. €	Термін окупності, роки
Enercon E-175 EP5	4	4,264	25020	786238	8308,685	3,3
Vestas V136-4.5 MW			19155	609679	6231,514	3,4
Vestas V172-7.2 MW			28148	880403	9416,509	3,3

З іншого боку, вартість генерованої електроенергії на вітроелектростанціях в Україні може бути оцінена закупівельною ціною на електроенергію на балансуєчому ринку (БР) електроенергії [7,8].

Результати розрахунку техніко-економічних показників протягом року експлуатації уявної електроелектростанції з трьома типами вітрогенераторів та термін її окупності наведено в таблиці 3.

Для порівняння, аналогічні результати за умов продажу продукції на балансуєчому ринку електроенергії наведено в таблиці 4, де враховано випадково вибрану ринкову ціну за 20.09.2023р.

4. Результати розрахунку техніко-економічних показників вітростанції на основі ціни балансуючого ринку

Тип вітрогенератора	Кількість ВГ, шт.	Ціна на електроенергію балансуючого ринку на 20.09.2023 грн./кВт·г од	Експлуатаційні витрати, тис. €	Річний прибуток, тис. €	Термін окупності, роки
Enercon E-175 EP5	4	4,586	799570	8936, 001	3,1
Vestas V136			609678	6751, 751	3,2
Vestas V172			900847	10127,605	3,1

Розраховані на основі експертних оцінок техніко-економічні показники вітростанції слід сприймати як оціночні характеристик величини, що не можуть бути абсолютно точними у зв'язку з наближеністю вихідних даних та застосуванням експертних оцінок складових, довільно вибраної величини ціни на балансуючому ринку електроенергії в Україні.

Техніко-економічні показники 4-агрегатної вітростанції демонструють малі відмінності від раніше опублікованих практичних результатів експлуатації вітрової електростанції [4]. Це надає можливість зробити висновок про подібність отриманих результатів з можливістю використання оціночних даних у витратній частині та заміряних даних по вітровому навантаженні зазначеної ділянки для вітроелектростанції.

Слід зауважити, що врахування додаткових експлуатаційних витрат на післяаварійне відновлення вітрогенераторів у обсязі 10000 € на турбіну не значно впливає (в межах 5-7 %) на річні витрати на експлуатацію, так само і на термін окупності капіталовкладень.

Прийняття техніко-економічного інженерного рішення зі спорудження вітроелектростанції має бути реалізовано на основі техніко-економічного

обґрунтування спорудження реальної вітростанції. Розраховані в роботі результати дають можливість врахувати сучасні особливості в нормативній основі та існуючий валютний курс і вони корелюються з результатами реальної електростанції у близьких умовах. Це додатково підкреслює значну ефективність спорудження вітростанції в Карпатах України.

Отриманий в роботі розподіл імовірності швидкості вітру для зазначеної ділянки проектованої електростанції на хребтах Карпат України дає можливість оцінки річних показників виробництва прийнятої чотириагрегатної ВЕС для зазначених типів вітрогенераторів: Enercon E-175 EP5, Vestas V172 та V136.

Висновки і перспективи. Отримано техніко-економічні показники вітроелектростанції, а також розраховано річні валові прибутки від її експлуатації дали змогу оцінити термін окупності обладнання за умовами використання «зеленого тарифу», а також за умовами участі у балансуєчому ринку електроенергії. Результати розрахунків показують високу ефективність будівництва вітростанції у Карпатському регіоні України.

Список використаних джерел

1. 2021 at a glance. © 2022 BP P.L.C. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-at-a-glance.pdf>. (дата звернення: 27.10.2023).
2. Unplanned wind turbine repairs to cost industry \$8 billion+ in 2019. Wood Mackenzie LTD, 2019. [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-\\$8-billion-in-2019/](https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-$8-billion-in-2019/). (дата звернення: 29.10.2023).
3. Покровський К. Б., Кужелев М.Ю. Оцінка ефективності вітроелектростанції на основі даних з відкритих джерел. *Вісник НУ "Львівська політехніка"*, № 862: Електроенергетичні та електромеханічні системи, С. 123-127. 2016.
4. K. Pokrovskiy, O. Mavrin, A. Muzychak, V. Oliinyk. Modern wind turbines capacity utilization in real conditions. *Energy Engineering and Control Systems*, vol. 3, no. 2, pp. 47-50. 2017. <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.02.047>.
5. ENERCON product overview. ©ENERCON GmbH. August 2016. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.enercon.de/home/>. (дата звернення: 2.11.2023).
6. 4 MW platform. ©Vestas Wind Systems A/S, 2022. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.vestas.com/en>. (дата звернення: 2.11.2023).
7. Добровільна відмова від «зеленого» тарифу: чому Тилігульська ВЕС пішла

на це. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://mind.ua/publications/20262136-dobrovilna-vidmova-vid-zelenogo-tarifu-chomu-tyligulska-ves-pishla-na-ce>. (дата звернення: 29.09.2023).

8. Индексы РДН та среднѳзвѳженѳ цѳны за 09.2023. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.oree.com.ua/index.php/indexes>. (дата звернення: 29.09.2023).

References

1. 2021 at a glance. (2022) BP P.L.C. Available at: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-at-a-glance.pdf>.
2. Unplanned wind turbine repairs to cost industry \$8 billion+ in 2019. Wood Mackenzie LTD, 2019. Available at: [https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-\\$8-billion-in-2019/](https://www.woodmac.com/press-releases/unplanned-wind-turbine-repairs-to-cost-industry-$8-billion-in-2019/).
3. Pokrovskiy K. B., Kuzhelev M.Y. (2016). Otsinka efektyvnosti vitroelektrostantsii na osnovi danyh z vidkrytyh dzherel [Assessment of wind farm efficiency based on open source data]. *Visnyk NU "Lvivska polytehnika"*, 862: Elektroenergetychni ta elektromekhanichni systemy, 123-127.
4. Pokrovskiy R., Mavrin O., Muzychak A., Oliinyk V. (2017). Modern wind turbines capacity utilization in real conditions", *Energy Engineering and Control Systems*, 3 (2), 47-50. <https://doi.org/10.23939/jeecs2017.02.047>.
5. ENERCON product overview. ©ENERCON GmbH. August 2016. Available at: <https://www.enercon.de/home/>.
6. 4 MW platform. ©Vestas Wind Systems A/S, 2022. Available at: <https://www.vestas.com/en>.
7. Dobrovilna vidmova vid «zelenogo» taryfu: chomu Tyligulska VES pishla na tse [Voluntary refusal of the "green" tariff: why Tyligulska VES went for it]. Available at: <https://mind.ua/publications/20262136-dobrovilna-vidmova-vid-zelenogo-tarifu-chomu-tyligulska-ves-pishla-na-ce>.
8. Индексы РДН та среднѳзвѳженѳ цѳны за 09.2023 [RDN indices and weighted average prices for 09.2023]. Available at: <https://www.oree.com.ua/index.php/indexes>.

EFFICIENCY OF A WIND PLANT IN REAL CONDITIONS WITH ADDITIONAL COSTS AND THE MARKET PRICE OF ELECTRICITY

K. Pokrovskiy

Abstract. *In its development, the global energy sector is constantly demonstrating the growth of electricity consumption. Traditional power plants in this process ensure an increase in greenhouse emissions and aggravation of climate problems, which are becoming more relevant every year. Against this background, modern alternative energy sources, namely wind power plants, contribute to reducing the impact of traditional power plants and encourage solving environmental problems. The development of global wind energy is accompanied by the growth of unit capacities of generators of wind power plants. The paper analyzes the efficiency of a wind power plant based on modern wind generators for predetermined location conditions, taking into account operating costs based on operational experience and based on the assessment of the power plant's*

participation in the balancing market of electricity with a waiver of the "green tariff". Calculations of the technical and economic indicators of an imaginary designed 4-unit wind power plant with various wind generators under the wind conditions of a predetermined industrial site located in the Carpathian region of Ukraine were carried out. The calculations take into account the modern typical characteristics of wind generators, additional operating costs and the estimated cost of electricity purchase of the station under the "green tariff" and in the conditions of a balancing electricity market to compare economic efficiency. In order to make an optimal design technical decision with a comparative assessment, three types of wind generators were determined for installation at an imaginary wind farm - Enercon E-175 EP5, Vestas V136-4.5 MW and Vestas V172-7.2 MW. In the conditions of the predetermined construction site of the projected wind farm on the Carpathian ridges of Ukraine, the measured and calculated annual probability distribution of wind speed according to the analytical Weibull distribution is applied, and the characteristics of the annual productivity of the 4-unit wind farm for the adopted three types of wind generators are given. The technical and economic characteristics were obtained in the work: capital investment, operating costs, characteristics of electricity production, the gross profit during the annual operation of the wind power plant with three options for installing wind generators was calculated, making it possible to estimate the payback time of the investment in the construction of the wind plant. So, for a 4-unit station with generators of the Enercon E-175 EP5, the payback period is 3.3 years, and with wind generators of the Vestas V136-4.5 MW - 3.4 years, as well as for the Vestas V172-7.2 MW in operating conditions of the "green tariff" and, respectively, 2.9 years, 2.9 years and 3.0 years under conditions of sale of electricity at balancing market prices. Additional operating costs for the disposal of worn wind turbine blades do not have a significant impact on the overall cost indicators and amount to 5-7% of the total costs.

Key words: *wind power plant, wind generators, real wind conditions, performance characteristics, payback period*