

Techniczno-ekonomiczna analiza farm wiatrowych

A Technical-economic Analysis of Wind Farms

Monika MÁDROVÁ ¹⁾, Andrzej JAROSIŃSKI ²⁾

¹⁾ Ing.; Department for Science and International Affairs, Faculty of Mining and Geology, VŠB – Technical University of Ostrava; 17. listopadu 15, 708 33 Ostrava – Poruba, Czech Republic; e-mail: monika.madrova@vsb.cz, tel.: (+420) 597 325 327

²⁾ dr hab. inż.; Zakład Polityki i Badań Strategicznych, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią, PAN; ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków, Polska; e-mail: ajar@min+pan.krakow.pl, tel.: (+48) 12 632 33 00 wew. 141

Streszczenie

W pracy omówiono parametry techniczne i ekonomiczne farm wiatrowych. Są one szczególnie ważne, ponieważ wiele farm zostało wzniesionych w miejscach o niekorzystnych warunkach, bez wiedzy teoretycznej i eksperckiej a także tła legislacyjnego. Analiza właściwości techniczno-ekonomicznych sugeruje wyznaczenie związków parametrów istotnych dla procesu podejmowania decyzji dotyczących konstrukcji farmy wiatrowej w rozważanej lokalizacji. Najważniejszym czynnikiem decydującym czy wspomniany rejon jest odpowiedni dla budowy farmy wiatrowej jest szybkość wiatru, która musi być określona doświadczalnie. Uzyskane wyniki analizy techniczno-ekonomicznej mogą być zastosowane zarówno dla Republiki Czeskiej jak i innych krajów europejskich. Szczególnie interesujące jest porównanie analiz dla krajów śródlądowych (np. Republika Czeska) oraz nadmorskich (np. Polska), szczególnie w przypadku państw sąsiadujących ze sobą.

Słowa kluczowe: farma wiatrowa, analiza ekonomiczna

Summary

The paper discusses technical and economic parameters of wind farms. They are particularly important as a number of wind farms have been erected in localities with unfavourable wind conditions being unaware of theoretical and expert knowledge and legislative background. The analysis of technical-economic parameters implies a determination of links among the parameters vital for the decision-making process related to a construction of a wind farm in a considered locality. The most important parameter to decide whether the given locality is suitable for construction of a wind farm is the wind speed which must be identified in the locality in question. The stated results of the technical-economic parameter analysis may be applied both for the Czech Republic as well as for other European countries. What is especially interesting is to compare analyses for inland countries (e.g. the CR) and seaside countries (e.g. Poland), particularly in case of neighbouring countries.

Keywords: wind farm, economic analysis

Wprowadzenie

Początkowo, rozważana jako mało perspektywiczna, energetyka wiatrowa jest obecnie głównym trendem w gospodarce światowej. Wzmożony rozwój energetyki wiatrowej jest obserwowany od lat 70 jako rezultat poszukiwania alternatyw dla konwencjonalnych źródeł energii. Następowo hojne wsparcie dla energii wiatrowej w Kalifornii, które stymulowało budowę kolejnych farm wiatrowych na całym świecie. Zorganizowany rozwój jest głównie związany z Danią. Obecnie można zaobserwować rozległe farmy wiatrowe na całym świecie. Ich dalszy rozwój jednak jest zagrożony przez zmniejszenie ilości odpowiednich lokalizacji i ograniczeń systemów energetycznych podczas wytwarzania energii. Poważniejsze instalacje farm wiatrowych są przewidywane w rejonach nadmorskich, szczególnie na wybrzeżach Morza Północnego.

Pierwsze farmy wiatrowe zostały wzniesione w czasach, kiedy ten rozwijający się obszar nie podstaw teoretycznych i eksperckich oraz podłoża legislacyjnego. Farmy wiatrowe były budowane w rejonach o niesprzyjających warunkach wiatrowych, co skutkowało spowolnieniem rozwoju tego typu energetyki. Rozwój energetyki wiatrowej w Czechach był wspie-

Introduction

Formerly considered as low prospective, wind energetics is currently one of the major trends in the world economy. More prominent development of this type of energetics has been observed from the 1970s as a result of searching for alternatives to conventional sources of energy. A generous support to wind energy in California followed, which stimulated constructions of wind farms (WF) world-wide. An organized development is mainly connected with Denmark. Currently, extensive installations of wind farms may be observed on a global level. However, their further development is threatened by a shortage of suitable localities and energy system limits during the generated energy transmission. More extensive construction of wind farms is expected in seaside regions, especially on the shores of the North Sea.

The first wind farms were erected at times when the developing field did not have a vital theoretical, expert and legislative background. Wind farms were installed in localities with unfavourable wind conditions, which resulted in a slow-down of the developing power-engineering field. The development of wind energetics in the CR has been supported since

rany od 2002 roku na podstawie decyzji Urzędu Regulacji Energetyki. Tabela 1 ukazuje całkowitą moc zainstalowaną farm wiatrowych w [MW] w latach 2007 – 2010 w Czechach.

Rozważając przyszły rozwój energetyki wiatrowej w Czechach, uwarunkowania kosztowe są korzystne, a w wybranych regionach Czech istnieją dobre warunki wiatrowe. Rozwój jest jednak hamowany przez skomplikowane zasady przyznawania koncesji oraz niejednoznaczna opinia publiczna [1, 2].

W 2010 roku liczba farm wiatrowych w Polsce znacząco wzrosła i przez to również zwiększył się udział źródeł odnawialnych w produkcji energii elektrycznej. Zagęszczenie zainstalowanych farm wiatrowych jest najniższe w Europie. Obecnie w Polsce wspiera się budowę farm, co jest konsekwencją dotacji z Unii Europejskiej.

Biorąc pod uwagę znakomite warunki wiatrowe i dogodne regulacje prawne, Polska jest jednym z najbardziej obiecujących rynków energii wiatrowej w Europie. W odniesieniu do geografii, najlepsze lokalizacje znajdują się w południowych górskich terenach oraz wzdłuż Morza Bałtyckiego, gdzie prędkość wiatru osiąga wartość $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [3, 4]. W tabeli 2 zestawiono całkowitą moc zainstalowaną w farmach wiatrowych w Polsce w [MW] w latach 2007 i 2010.

Na całym świecie występują analogiczne problemy związane z budową farm wiatrowych w niesprzyjających warunkach wiatrowych i przez to ważne jest zwrócenie szczególnej uwagi na analizę techniczno-ekonomiczną dotyczącą farm wiatrowych.

Parametry techniczne

Turbina wiatrowa umieszczona na wieży zamienia energię aerodynamiczną na energię mechaniczną za pośrednictwem łopatek. Ta jest przenoszona

2002 on the basis of a Price Decision of the Energy Regulatory Office. Table 1 states the overall installed capacity of WF in MW between 2007 and 2010 in the CR.

Considering future development of wind energetics in the CR the purchase price is favourable and in particular regions of the Czech Republic there are rather good wind conditions. However, the development is decelerated by a complicated permission-granting process and disunited attitudes of the public administration [1, 2].

In 2010 the number of wind farms in Poland grew significantly and thus also their participation on the Polish power plants' output making use of renewable sources. The density of installed wind farms is one of the lowest in Europe. There is currently a favourable support in Poland to construct WF as subsidies may be obtained both from the state as well as from the EU.

Considering excellent wind conditions and suitable legal regulations, Poland is one of the most promising markets as for wind energy in Europe. According to the atlas, the best localities are in the southern hilly areas and along the Baltic Sea coast, where the wind speed may reach $9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ [3, 4]. Table 2 states the overall installed capacity of WF in MW between 2007 and 2010 in Poland.

In all probability, analogous problems, particularly with constructing WF in localities with unfavourable wind conditions, may be identified worldwide and thus it is crucial to pay due attention to technical-economic analyses of wind farms.

Technical parameters

A wind turbine, which is located on a pole, converts the action of aerodynamic forces on the rotor blades, wind energy into mechanical energy.

Tabela 1
Moc elektrowni wiatrowych w Czechach
w latach 2007–2010

Rok Year	2007	2008	2010	2011
MW	180	520	720	800

Table 1
Overall installed capacity of WF in MW
between 2007 and 2010 in the CR

Tabela 2
Moc elektrowni wiatrowych w Polsce
w latach 2007–2010

Rok Year	2007	2008	2010	2011
MW	276	545	725	1,107

Table 2
Overall installed capacity of WF in MW
between 2007 and 2010 in Poland

dzięki skrzyni biegów na generator gdzie jest konwertowana na energię elektryczną.

Wraz ze wzrostem prędkości wiatru obserwuje się wzrost siły udźwigu, proporcjonalnej do kwadratu prędkości wiatru i energii produkowanej przez generator, proporcjonalnej do sześcianu mocy uzyskanej z prędkości wiatru. Ważne jest zapewnienie efektywnego ustawienia wydajności wirnika aby zapobiec mechanicznemu i elektrycznemu przeciążeniu turbiny wiatrowej. Poniższe równania są istotne dla opisanie podstawowych parametrów technicznych dowolnego rodzaju turbiny wiatrowej. Są one poparte równaniem energii kinetycznej E_k strumienia wiatru:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

gdzie m jest masą powietrza [kg], a v jest prędkością wiatru [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Moc wyjściowa P strumienia wiatru jest wyrażona równaniem:

$$P = \frac{E_k}{t} \quad (2)$$

gdzie t oznacza czas [s].

Moc wyjściowa może być również opisana jako:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (3)$$

gdzie ρ jest gęstością powietrza [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] a V jest strumieniem objętościowym wiatru [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$].

Jako że moc wyjściowa P jest funkcją prędkości wiatru v , gęstością powietrza ρ i powierzchnia omiotania wirnika S , to można zastosować poniższe równanie:

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4)$$

Na podstawie równania (4), można określić, że energia jest proporcjonalna do sześcianu mocy przepływającej masy powietrza. Łopatki turbiny wiatrowej są zasilane jedynie częścią energii kinetycznej przepływającego powietrza. Zgodnie z regułą Betz'a, turbina przy swobodnym przepływie nie jest w stanie osiągnąć wydajności większej niż 59 %.

Można dodać, że moc wyjściowa wiatru zwiększa się wraz ze wzrostem prędkości i jest generalnie bardzo niska w przypadku niższej prędkości. Obliczenia pozwoliły na zweryfikowanie poprawności obliczeń, co pokazano na rysunku 1.

W przypadku pojedynczego obszaru, teoretyczna moc wyjściowa P_t jest wyrażona formułą:

$$P_t = k_B \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \quad (5)$$

gdzie k_B jest stałą Betza.

This is carried by means of a gearbox into a generator, where it is converted into electric power.

Along with a rise in the wind stream speed there is an increase in the lift force proportional to the square of the wind speed and the energy produced by the generator proportional to the cubic power of the wind speed. It is necessary to ensure an effective regulation of the rotor's output to prevent mechanical and electric overload of a wind turbine. The equations below are vital to describe basic technical parameters of any type of a wind turbine. They are grounded in the kinetic energy E_k of the wind stream:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

where m is the air mass [kg] and v is the wind speed [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

The power output P of the wind stream is given by the equation:

$$P = \frac{E_k}{t} \quad (2)$$

where t is time [s].

The power output may also be expressed as:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V \cdot v^2 \quad (3)$$

where ρ is the air density [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$] and V is the volume rate of wind stream [$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$].

As the wind power output P is a function of wind speed v , air density ρ and the rotor swept area S , the formula below may be used:

$$P = \frac{1}{2} \cdot S \cdot v \cdot \rho \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot v^3 \quad (4)$$

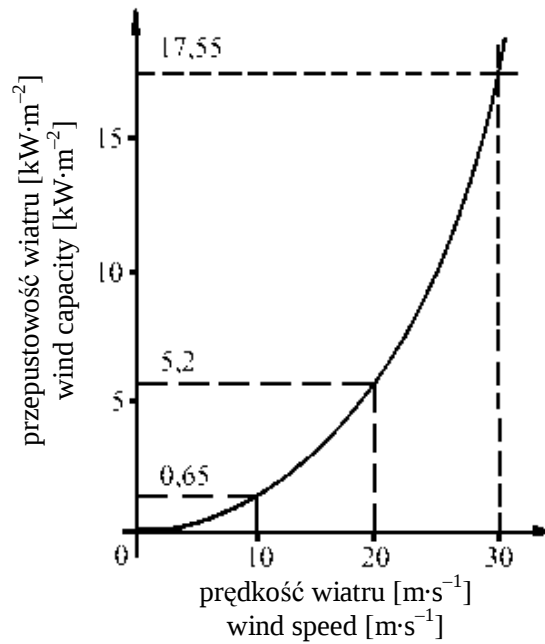
According to the formula (4) the gained energy is proportional to the cubic power of the flowing air mass speed. The wind turbine blades are delivered only a proportion of the air flow's kinetic energy. According to Betz's law, a turbine in free stream cannot achieve greater than 59 % efficiency.

It may be added that the wind power output augments along with an increase in the speed and is very low at slower wind speeds. Doing such calculations, the result correctness may be verified according to Figure 1.

In case of a unit area the theoretical reached power output P_t is given by the formula:

$$P_t = k_B \cdot \rho \cdot \frac{v^3}{2} \quad (5)$$

where k_B is the Betz's coefficient.



Rys. 1
Zależność ilości energii od wielkości strumienia powietrza

Fig. 1
Dependence of the power output of wind streaming through 1 m² on its speed

Aby określić wielkość mocy wyjściowej P_j turbiny wiatrowej można zastosować następujący wzór:

$$P_j = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho \cdot S \cdot v_j^3 \quad (6)$$

gdzie S jest powierzchnią omiotania wirnika wyrażającą się równaniem $S = \pi \cdot r^2$ [m²], ρ jest gęstością powietrza [kg·m⁻³], v_j jest nominalną prędkością wiatru [m·s⁻¹] a c_p jest stałą mocy [5].

Stała mocy c_p wskazuje, że część energii wiatru jest zamieniana na energię mechaniczną (maksymalnie 0,593) i jest zależna od stopnia do jakiego wirnik zmniejsza prędkość wiatru v . Jest definiowana równaniem:

$$c_p = 4 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha^2) \quad (7)$$

gdzie α to czynnik dopływu określany jako:

$$\alpha = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \quad (8)$$

gdzie v_0 jest prędkością wiatru w górę wirnika [m·s⁻¹] a v_1 jest prędkością wiatru na poziomie wirnika [m·s⁻¹].

Aby otrzymać wymaganą nominalną wydajność przy nominalnej prędkości wiatru, średnica wirnika D [m] może być otrzymana na podstawie równania:

$$D \sqrt{\frac{8P_j}{c_p \cdot \pi \cdot \rho \cdot v_j^3}} \quad (9)$$

To determine the rated output P_j of a wind turbine the formula below may be applied:

$$P_j = \frac{1}{2} \cdot c_p \cdot \rho \cdot S \cdot v_j^3 \quad (6)$$

where S is the rotor swept area specified by the equation $S = \pi \cdot r^2$ [m²], ρ is the air density [kg·m⁻³], v_j is the rated wind speed [m·s⁻¹] and c_p is the power coefficient [5].

The power coefficient c_p indicates what proportion of wind energy is converted into mechanical energy (maximum 0.593) and it is dependent on the extent to which the rotor decreases the wind stream speed v . It is defined by the equation:

$$c_p = 4 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha^2) \quad (7)$$

where α is the inflow factor defined as:

$$\alpha = \frac{v_0 - v_1}{v_0} \quad (8)$$

where v_0 is the wind speed upstream the rotor [m·s⁻¹] and v_1 is the wind speed at the rotor's level [m·s⁻¹].

To obtain a required rated output at the rated wind speed, the rotor' diameter D [m] may be determined according to the formula:

$$D \sqrt{\frac{8P_j}{c_p \cdot \pi \cdot \rho \cdot v_j^3}} \quad (9)$$

Końcowym pojęciem, które jest niezbędne do obliczenia w przypadku turbiny wiatrowej jest ilość obrotów wirnika n_j przy nominalnej mocy wyjściowej P_j :

$$n_j = \frac{\lambda_0 \cdot v_j}{\pi \cdot D} \quad (10)$$

gdzie λ_0 jest współczynnikiem prędkości końca wirnika obliczonym na podstawie prędkości końca wirnika v_r i prędkości wiatru płynącego v_0 płynącego do wirnika:

$$\lambda_0 = \frac{v_r}{v_0} \quad (11)$$

Maksymalny współczynnik prędkości dla końca turbiny wiatrowej jest ograniczona przez hałas powodowany przez wirnik, który znacząco wzrasta wraz z prędkością końca wirnika. Im mniejsza ilość łopatek tym wyższy współczynnik prędkości końca wirnika [6].

Jeśli średnica wirnika D zależy od wydajności turbiny wiatrowej to liczba obrotów również, co przedstawia równanie:

$$n_j = \lambda_0 \cdot v_j^2 \cdot \sqrt{\frac{c_p \cdot \rho \cdot v_j}{8 \cdot \pi \cdot P_j}} \quad (12)$$

Odpowiednie ilości, które określają techniczne parametry turbiny wiatrowej przedstawiono w tabeli 3. Tabela zestawia ilości chronologicznie tak, jak powinny być one z powodzeniem określone.

Przegląd parametrów technicznych niezbędnych do określenia rodzaju turbiny wiatrowej wskazuje na konieczność kontynuacji i ważności ich odpowiedniej identyfikacji. Tabela 3 ustala porządek według którego należy sukcesywnie dobierać parametry techniczne w celu oszacowania właściwej lokalizacji.

Tabele od 4 do 6 przedstawiają kolejno krytyczne wartości prędkości wiatru w skali Beaufort'a, które to prędkości mogą być wykorzystane podczas budowy farm wiatrowych, oraz krytyczne wartości czynnika dopływającego od zero do maksimum. Według V. Železného, wartości prędkości wiatru przy dokładnym wykorzystaniu zainstalowanej mocy turbiny wiatrowej wynoszą około $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Krytyczne wartości prędkości wiatru przedstawione w tabeli 3 odnoszą się do prędkości wiatru na Mapie Wiatru Republiki Czeskiej, gdzie zaznaczone są terytoria o prędkości wiatru poniżej $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, w przedziale 4 do $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, w prze-

For an overall concept of a wind turbine it is necessary to calculate the rotor's revolutions n_j at the rated output P_j according to:

$$n_j = \frac{\lambda_0 \cdot v_j}{\pi \cdot D} \quad (10)$$

where λ_0 is the rotor tip speed ratio defined by the ratio of the rotor tip speed v_r and the wind speed upstream of the rotor v_0 :

$$\lambda_0 = \frac{v_r}{v_0} \quad (11)$$

The maximum wind turbine tip speed ratio is limited by the rotor's noise which significantly grows along with the tip speed. The lower the number of blades, the higher the tip speed ratio [6].

If the rotor's diameter D depends on the wind turbine output, the revolutions are dependent on it too, according to the equation:

$$n_j = \lambda_0 \cdot v_j^2 \cdot \sqrt{\frac{c_p \cdot \rho \cdot v_j}{8 \cdot \pi \cdot P_j}} \quad (12)$$

Suitable quantities that determine the wind turbine technical parameters are in Table 3. The table lists the quantities chronologically as they can be successively determined.

The overview of the technical parameters necessary to determine a wind turbine type implies a necessary continuation and importance of their accurate identification. Table 3 stipulates the order of the technical parameters which must be successively determined in order to evaluate a suitable locality.

Tables 4 to 6 chronologically state the wind speed critical values of the Beaufort Wind Scale for wind speeds whose values may be used to construct a wind farm and critical values of the inflow coefficient from zero to maximum. According to V. Železný the values of a thorough utilization of the installed capacity are wind speeds around $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. The wind speed critical values stated in Table 3 correspond to wind speed values in the Wind Map of the CR, where there are territories with wind speed below $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the interval from 4 to $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, in the interval from 5 to $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ and over $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabela 3
Wielkości determinujące parametry techniczne dla gęstości powietrza ρ

v_0	v_1	α	c_p	P_j	v_j	D	v_r	λ_0	n_j
$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	—	—	MW	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	m	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	—	—

Table 3
Quantities determining the technical parameters for air density ρ

Tabela 4
Wartości krytyczne prędkości wiatru

Table 4
Wind speed critical values

$3 - 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Minimalna prędkość wiatru niezbędna do wytwarzania energii elektrycznej w turbinach wiatrowych Minimum wind speed required for electric power generation in wind turbines
$12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Optymalna prędkość wiatru Optimal wind speed
$12 - 25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Prędkość wiatru ,przy której część energii wiatrowej pozostaje niewykorzystana (ograniczone wejście) Wind speed at which a proportion of the wind energy remains unused (restricted input)
over $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	Przy takich prędkościach turbina wiatrowa musi być zatrzymana (niebezpieczeństwo uszkodzenia wirnika) The wind turbine must be halted at such speeds (danger of rotor damage)

Tabela 5
Skala siły wiatru Beauforta, zgodnie z tabelą 4

Table 5
Beaufort Wind Scale for wind speed critical values according to Table 4

Prędkość wiatru według tabeli 4 Wind speed according to Table 4	Prędkość [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$] Speed [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Obserwowane oznaki Observable signs	Skala Beaufort'a Beaufort Scale
$3 - 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	1.6 – 3.3	Słaby wiatr (szelest liści drzew) Light breeze (tree leaves rustle)	2
	3.4 - 5.4	Łagodny wiatr (liście drzew są w ciągłym ruchu) Gentle breeze (tree leaves constantly moving)	3
$12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	10.8 – 13.8	Silny wiatr (duże gałęzie w ruchu) Strong breeze (large branches in motions)	6
$25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	24.5 – 28.4	Sztorm (drzewa są łamane lub wyrwane z korzeniami) Storm (trees are broken off or uprooted)	10

Tabela 6
Krytyczne wartości współczynnika α

Table 6
Critical values of the inflow coefficient α

Niezmienny współczynnik α Invariant coefficient α	Konwersja energii wiatru Wind energy conversion	współczynnik mocy c_p Power coefficient c_p
$\alpha = 0$	Strumień wiatru przepływającego przez wirnik nie spowalnia wcale The wind stream flowing through the rotor does not slow down at all	$c_p = 0$
$\alpha = 1$	Cała energia wiatrowa zostanie przekształcona w pracę mechaniczną (wirnik ma całą energię ze strumienia wiatru) All the wind energy gets converted into mechanical work (the rotor takes all the energy from the wind stream)	$c_p = 0$
$\alpha = 1.33$	Maksymalne przekształcanie energii wiatru w energię mechaniczną (maksymalnie wirnik wyjściowy) Maximum conversion of wind energy into mechanical energy (maximum rotor output)	$c_p = 0.59$ (Limit Betz'a) (Betz Limit)

dziale od 5 do $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ oraz powyżej $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zaprezentowane tabele, szczególnie tabela 3 wykreślona dla podanych lokalizacji przy użyciu tabel 4 i 6, mogą być pomocne dla inwestorów podejmujących decyzję o budowie farmy wiatrowej na danym obszarze [5].

Wybór prędkości wiatru v_1 jest odnosi się do Mapy Wiatru Republiki Czeskiej, która precyzuje obszary według następujących prędkości wiatru w $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$: poniżej 4, pomiędzy 4 a 5, pomiędzy 5 a 6 oraz powyżej 6. Ostatnia grupa klasyfikuje prędkość

The presented tables, especially Table 3 plotted for a given locality also using Tables 4 to 6, may assist investors in their decision-making process whether to construct a wind farm in the locality in question [5].

The choice of wind speed v_1 is according to the Wind Map of the CR which specifies territories with wind speeds below $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, in the interval from 4 to $5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, in the interval from 5 to $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and over $6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The last group classifies wind speed around

wiatru równą około $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, co pozwala na dokładne wykorzystanie zainstalowanej mocy turbiny wiatrowej [7]. Analizy parametrów technicznych została przedstawiona np. w [8, 9].

Parametry ekonomiczne

W obszarach o sprzyjających warunkach i bliskim podłączeniu do sieci elektrycznej, farmy wiatrowe mogą konkurować z elektrowniami cieplnymi czy jądrowymi pod względem kosztów produkcji energii. Koszty zależą głównie od zasobów wiatru, inwestycji, kosztów operacyjnych oraz kosztów obsługi turbiny. Konkurencyjność energii wiatru w porównaniu z konwencjonalnymi źródłami energii jest również zapewniona dzięki ekonomicznym względom takim, jak obowiązkowe ceny zakupu, zielone certyfikaty oraz różnego rodzaju zniżki.

Oprócz parametrów technicznych, bardzo istotna jest analiza aspektów ekonomicznych, w szczególności zewnętrznych kosztów technologii energetycznych, aby otrzymany efekt nie był przypadkowym produktem ubocznym innych działań.

W Tabeli 7 podano ilości determinujące parametry ekonomiczne, które są najważniejsze podczas operacji stawiania farmy wiatrowej. Analiza powyższych parametrów dla lokalizacji powinna wpływać na decyzję o budowie farmy wiatrowej w podanym obszarze.

Dla bezstronnego porównania różnych technologii energetycznych należy rozważyć wszelkie koszty, to jest zarówno wewnętrzne jak i zewnętrzne. Zezwala się używanie powyższych parametrów w tym celu. Dla podstawowej oceny warunków ekonomicznych wykorzystania farm wiatrowych ważna jest wiedza obejmująca parametry zebrane poniżej.

Właściwe koszty inwestycji c_{ir} związane są z mocą wyjściową P_r .

$$c_{ir} = \frac{C_i}{P_i} = k_r \frac{C_i}{P_r} \quad (13)$$

gdzie C_i to koszty inwestycji [CZK], P_i to moc zainstalowana [kW] a k_r jest współczynnikiem rocznej eksploatacji zainstalowanej mocy [-,%].

Tabela 7

Wielkości determinujące parametry ekonomiczne w czasie x-godzin pracy farmy wiatrowej [w godzinach]

C_i	P_i	c_{ir}	W_r	k_r	P_r
CZK	kW	CZK·kW ⁻¹	kWh	–	kW
lub or					
CZK	MW	CZK·MW ⁻¹	MWh	–	MW

$10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, which are values when a thorough utilization of the installed capacity is reached [7]. See [8, 9] for the technical parameters.

Economic parameters

In localities with favourable conditions and a close connection to the electric network, as for production costs wind farms are able to compete with the electric power generated by thermal and nuclear power plants. The costs mainly depend on the wind sources, the investment and operational costs as well as the turbine service-life. The competitiveness of wind energy when compared with conventional sources of energy is also ensured by means of supportive economic tools, such as mandatory purchase prices, green bonus and various subsidies.

Apart from technical parameters, it is also vital to analyze the economic parameters, in particular the external costs of energetic technologies, so that the produced effect was not a random by-product of other legitimate activities.

Table 7 states quantities determining the economic parameters which are the most significant during the operation of a wind farm. An analysis of the stated parameters for a locality should contribute to a decision whether to construct a wind farm in the given locality.

For an impartial comparison of various energetic technologies all costs must be considered, i.e. both internal and external ones. This is permitted using the parameters above. For a basic evaluation in terms of an economic use of wind farms, it is crucial to know the parameters below.

Specific investment costs c_{ir} related to the mean annual power output P_r .

$$c_{ir} = \frac{C_i}{P_i} = k_r \frac{C_i}{P_r} \quad (13)$$

where C_i are the investment costs [CZK], P_i is the installed capacity [kW] and k_r is the annual installed capacity exploitation coefficient [-,%].

Table 7

Quantities determining economic parameters during an x-hour operation of a wind farm [in hours]

Współczynnik rocznej eksploatacji energii wskazuje na to, jak zainstalowana moc jest zużywana w cyklu rocznym. Jest to wskaźnik aktualnie generowanej energii W_r i maksimum energii produkowanej zakładając, że turbina wiatrowa pracowała przy nominalnej wydajności przez x godzin w ciągu roku, a wskaźnik ten wyrażony jest równaniem poniżej [10]:

$$k_r = \frac{W_r}{P_i \cdot x} \quad (14)$$

Roczna produkcja energii elektrycznej jest równa:

$$W_r = P_r \cdot x \quad (15)$$

gdzie P_r oznacza roczną produkcję mocy [kW, MW, GW]

$$k_r = \frac{W_r}{P_i} \quad (16)$$

Średnia roczna produkcja mocy P_r pozwala oszacować roczne wykorzystanie zainstalowanych farm wiatrowych w całkowitej produkcji mocy:

$$P_r = \frac{W_r}{x} = k_r \cdot P_i \quad (17)$$

Odpowiednie wielkości, które kształtują parametry ekonomiczne farm wiatrowych przedstawiono chronologicznie w tabeli 4 co może posłużyć w celu ich poprawnej identyfikacji.

Skutki zewnętrzne należy rozważać z punktu widzenia ekonomicznego jak i technologicznego. W przeciwieństwie do finansowych skutków zewnętrznych, mogą występować również technologiczne skutki zewnętrzne jeśli produkcja i konsumpcja jednego z podmiotów są zagrożone w zakresie stopnia produkcji i konsumpcji innych elementów. Zobacz [7, 11, 12, 13] w celu analizy parametrów ekonomicznych.

Wskaźniki zapewniające atrakcyjność inwestycji w odnawialne źródła energii zostały opisane w [14, 15].

Wnioski

Energetyka wiatrowa wykorzystuje niewyczerpane źródła energii kinetycznej wiatru, a uzyskana na farmach wiatrowych energia zwraca koszty inwestycji znacznie szybciej niż w przypadku energetyki jądrowej czy elektrowni opalanych węglem. Dlatego wymagana jest dogłębna analiza parametrów ekonomicznych i technologicznych dotyczących farm wiatrowych. Energetyka wiatrowa nie szkodzi środowisku i dzięki zmniejszaniu kosztów generowania kWh, koszt energii elektrycznej produkowanej z wiatru i węgla brunatnego wyrówna się w niedalekiej przyszłości.

Jak się okazuje, fizyczne uwarunkowania poszczególnych lokalizacji takie jak aspekty krajobrazowe, ilość turbin, odległość od domów mieszkalnych są na drugim miejscu jeśli chodzi o podejmowanie decyzji w sprawie budowy farmy wiatrowej i zostało

The coefficient of annual exploitation of an energy source determines how the installed capacity of an energy source is used during the year. It is a ratio of the actually generated energy W_r and maximum energy produced supposing the wind turbine worked at a rated output of x hours per year, expressed by an equation below [10]:

$$k_r = \frac{W_r}{P_i \cdot x} \quad (14)$$

The annual production of electric power is:

$$W_r = P_r \cdot x \quad (15)$$

where P_r is the mean annual power output [kW, MW, GW]

$$k_r = \frac{W_r}{P_i} \quad (16)$$

The mean annual power output P_r evaluates the annual exploitation of the installed wind farms in the electric power generation.

$$P_r = \frac{W_r}{x} = k_r \cdot P_i \quad (17)$$

The suitable quantities that determine the economic parameters of a wind farm are in Table 4, which lists the quantities chronologically as they may be successively identified.

The externality must be considered both for economic as well as technological effects. Contrary to financial externalities, there may be technological externalities if production and consumption activities of one entity are affected by the extent of production and consumption of other entities. See [7, 11, 12, 13] for the economic parameters.

Ratios ensuring the attractiveness for investment in renewable resources are described in [14, 15].

Conclusion

Wind energetics exploits the inexhaustible kinetic energy of the wind and the energy return on investment in wind farms is much faster than in nuclear and coal-fired power plants. Therefore, a thorough analysis of technical and economic parameters of wind farms is required. Wind energetics does not harm the environment and thanks to lowering of specific costs of a generated kWh, the costs of electric power produced from wind and brown coal will even out in close future.

The physical variations in the individual localities, such as the aspect of the landscape, extent of the project, number of turbines, distance from residences, are secondary in the decision-making process whether to construct a wind farm, as it appears

to potwierdzone w badaniach opinii publicznej, szczególnie osób mieszkających w sąsiedztwie farm. Czynniki wpływającymi na opinię lokalnych społeczności są kolejno: poziom publicznej świadomości, korzyści finansowe zarządów miejskich, kwota rekompensaty finansowej oraz stopień w jakim na opinię wpływają aktywiści i kampanie medialne.

Przedstawione techniczne i ekonomiczne parametry są ważne dla inwestorów i ekspertów, którzy biorą udział w procesie przyznawania zezwoleń. W dodatku, społeczności wśród których budowa farm wiatrowych jest rozważana powinny zapoznać się z analizą techniczno-ekonomiczną poszczególnych aspektów.

studying public attitudes and opinions of nearby living citizens. Factors influencing the opinion level of the local community are as follows: the level of public awareness, benefits for the municipality, the amount of financial compensation and the extent of influence exerted by various activists and media campaigns.

The stated technical and economic parameters are important for investors and experts who participate in the rogatory and permission-grating process. In addition, communities where construction of wind farms is considered should also familiarize themselves with the analysis of technical-economic parameters.

Literatura – References

- 1 http://www.mzp.cz/cz/vetrne_elektrarny
- 2 <http://www.csve.cz/clanky/aktualni-instalace-vte-cr/120>
- 3 <http://www.gwec.net/index.php%3Fid%3D132>
- 4 *Větrná energie v Polsku, Zpráva o trhu ES, obnovitelné zdroje energie* Baltské centrum, Gdaňsk – Warszawa, září 2000.
- 5 Klenovčanová A., Imriš I.: *Zdroje a premeny energie*. 1. vyd. Prešov: ManaCon, 2006. 492 s. ISBN 80-89040-29-2.
- 6 Rychetník V., Pavelka J., Janoušek, J.: *Větrné motory a elektrárny*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1997. 199 s. ISBN 80-01-01563-7.
- 7 Železný V.: *Větrné elektrárny*, Školská fyzika 3/2005, s. 59–65.
- 8 Kubín M.: *Problematika větrných a hybridních elektráren*. Energetika 6/2009, roč. 59, s.249–263
- 9 *Odhad realizovatelného potenciálu větrné energie na území ČR. Zpráva Ústavu fyziky atmosféry AV ČR, v.v.i. Akademie věd ČR 2008*, s.1–32.
- 10 Křenek V.: *Člověk a energie*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2006. 191 s. ISBN 80-7043-489-9.
- 11 Kappel J.: *Větrné motory, větrná energie č.1/98*.
- 12 Vašíček J.: *Zásady ekonomického hodnocení energetických projektů*.
- 13 <http://www.tzb.info/2565-zasady>
- 14 Mádrová M.: *Analysis of Risks of Renewable Energy Sources. Optimization of Structures of manufacturing processes*. Politechnika Opolska, 2009, p. 115–127. ISBN 978-83-60691-69-4, ISSN 1429-6063.
- 15 Gierulski K.: *Obnovitelné zdroje energie v Polsku, Aktuální politické trendy, Seminář Brandenburg Energie technologické iniciativy*, 2002.
- 16 Gawłowski S., Listowska-Gawłowska R., Piecuch T.: *Uwarunkowania i prognoza bezpieczeństwa energetycznego Polski na lata 2010-2110*, Rocznik Ochrona Środowiska, Tom 12, Rok 2010, pp. 127-176

Stowarzyszenie Polski Komitet Światowego Kongresu Górniczego

al. Mickiewicza 30; 30-059 Kraków

<http://www.gorn.agh.edu.pl/spkskg/>

KRS: 0000034794, REGON: 276708370, NIP: 634-23-91-840



Komitet opiera swą działalność o zadania i cele wynikające ze statutu Światowego Kongresu Górniczego.

Komitet koncentruje się na:

- 1) inicjowaniu i wspieraniu współpracy dla narodowego i międzynarodowego postępu w zakresie górnictwa surowców mineralnych,
- 2) uczestnictwie w wymianie informacji z zakresu rozwoju nauk górniczych w dziedzinie techniki, ekonomiki, bezpieczeństwa i higieny pracy, jak również ochrony środowiska na szczeblu krajowym i międzynarodowym,
- 3) podejmowaniu działań na rzecz prawidłowego rozwoju wszystkich rodzajów górnictwa i przemysłów współpracujących z górnictwem, a także ich promocji wobec władz państwowych, administracji rządowej, samorządu terytorialnego oraz mediów,
- 4) wspieraniu młodych inżynierów górniczych w inicjatywach na forum krajowym i międzynarodowym.

Władze stowarzyszenia

Przewodniczący prof. dr hab. inż. Piotr CZAJA
Wiceprzewodniczący prof. dr hab. inż. Antoni TAJDUŚ
Członkowie prof. dr hab. inż. Krystian PROBIERZ
mgr inż. Stanisław GAJOS
Sekretarz dr inż. Tomasz NIEDOBA

Inicjatorem Światowego Kongresu Górniczego (The World Mining Congress - WMC) był polski naukowiec i inżynier górnik **prof. Bolesław Krupiński**. Zorganizował on w 1958 roku w Warszawie pierwszy Światowy Kongres Górniczy. Prof. Krupiński był przewodniczącym Światowego Kongresu Górniczego do 1972 roku. Światowy Kongres Górniczy jest organizacją afiliowaną przez ONZ. Działa w sposób ciągły przez sekretariat mający swoją siedzibę w Polsce.



XXIII Międzynarodowy Kongres Górniczy odbędzie się w dniach 11-15 września 2013 w Montrealu w Kanadzie

Informacje można znaleźć na stronie: <https://www.wmc-expo2013.org/>

On behalf of Canadian National Organizing Committee we kindly invite you to attend the **23rd World Mining Congress and Expo 2013** which will be held from August 11 to 15, 2013 in **Montréal, Canada**.

The theme for WMC 2013 is **Mapping the Future: Advances in Mining Engineering**, and an extensive technical program of leading-edge, peer-reviewed papers will provide the opportunity for high level knowledge sharing with peers.

Please note the following deadlines:

Abstract Submission	October 1, 2012
Notification of Abstract Acceptance	November 1, 2012
Paper Submission	December 31, 2012
Paper Review	February 28, 2013
Authors' Registration and Payment	March 1, 2013
Early-Bird Registration	March 1, 2013

More details can be found by clicking here: <https://www.wmc-expo2013.org/>