

# POTENCJAŁ PRODUKCJI ENERGII ELEKTRYCZNEJ PRZEZ TURBINĘ WIATROWĄ W ZALEŻNOŚCI OD LOKALIZACJI I WARUNKÓW WIETRZNOŚCI

## THE POTENTIAL OF THE ELECTRICITY PRODUCTION BY WIND TURBINE DEPENDING ON LOCATION AND WIND CONDITIONS

Anna Nowacka, Marian Wygoda - Poltegor Instytut, IGO Wrocław

*W ramach projektu ENERGYREGION zostały przeprowadzone badania potencjału energetycznego wiatru dla małych i średnich turbin wiatrowych w wybranych lokalizacjach na Dolnym Śląsku. W tym celu na masztach pomiarowych zostały zainstalowane czujniki prędkości wiatru. Pomiarzy wiatru były wykonywane przez okres pełnego roku. Na podstawie uzyskanych danych przeanalizowano zależność potencjału energii od szorstkości terenu i prędkości wiatru mierzonej na różnych wysokościach. W publikacji przedstawiono opracowany autorski program „PowerCalculator”, który umożliwia oszacowanie wielkości produkowanej energii elektrycznej przez turbinę, z dostępnego potencjału energii wiatru dla zmiennych parametrów szorstkości terenu i prędkości wiatru mierzonego na różnych wysokościach.*

**Słowa kluczowe:** potencjał wiatru, prędkość wiatru, szorstkość terenu, elektrownia wiatrowa

*The wind energy potential studies for small and medium-sized wind turbines have been carried out within ENERGYREGION project. For this purpose, measuring masts at selected locations in the Lower Silesia were erected and wind measurements were realized for a full year. Based on the data from measurement sensors, the dependence of the wind energy potential with respect to the terrain roughness and wind speed measured at different heights has been presented. The “PowerCalculator” software has been developed to calculate the wind energy potential for varying values of parameters such as terrain roughness and wind speed at different heights, its applications presented in this paper.*

**Key words:** wind potential, wind speed, terrain roughness, wind power, wind power plant

### Wprowadzenie

Stale dostawy energii mają kluczowe znaczenie dla przyszłego rozwoju społeczeństwa oraz gospodarki krajowej i regionalnej. Szybki wzrost gospodarczy powoduje rosnące tempo zużycia energii. W sytuacji krajów o nierównomiernym rozłożeniu lub nawet braku zasobów paliw kopalnych nieunikniony jest zwiększony ich import mogący pokryć bieżące i przyszłe zapotrzebowanie. Jednak wyczerpywanie się zasobów tych paliw oraz problem nadmiernej emisji dwutlenku węgla zmusza do poszukiwania alternatywnych rozwiązań, mogących zaspokoić popyt ale jednocześnie nie wpływających na degradację środowiska.

Z obowiązującej Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. wynika, że kraje członkowskie wspólnie do roku 2020 osiągnąć powinny 20% udział energii ze źródeł odnawialnych (OZE) w całkowitym zużyciu energii [1]. Nowe założenia polityki klimatycznej Unii Europejskiej do 2030 roku sporządzone przez Komisję Europejską pozwolą na ograniczenie emisji CO<sub>2</sub> do atmosfery, o co

najmniej 40% do 2030 r. względem roku 1990 oraz zwiększenie udziału źródeł odnawialnych do 27% w miksie energetycznym na poziomie całej Unii oraz niewiążący cel dotyczący wzrostu efektywności energetycznej o 27%. Szczegółowe propozycje będą zależne od poparcia państw członkowskich. Polska chcąc spełnić nowe wymagania musi stworzyć dogodniejsze warunki do produkcji energii elektrycznej z wykorzystaniem ekologicznych źródeł energii, w tym wykorzystania energii wiatru. W porównaniu do energii konwencjonalnej, która może wytworzyć sporą ilość energii ze stosunkowo małej powierzchni użytkowanej, odnawialne źródła energii wymagają dużo większych powierzchni aby uzyskać znacznie mniej energii [2]. W związku z tym uważa się, że energia odnawialna ma większe wymagania powierzchniowe terenu niż energia z paliw kopalnych. Dodatkowo dla energetyki wiatrowej istotna jest energia wiatru w warstwie przyziemnej, której wysokość nad poziomem terenu zależy od jego ukształtowania (szorstkości), a także stanu równowagi pionowej atmosfery i prędkości wiatru (prędkość wiatru, przy której efektywnie pracują turbiny, to najczęściej zakres od 5 do 25 m/s).

Rozpatrując celowość budowy turbiny wiatrowej analizuje się szereg czynników związanych z rodzajem terenu, warunkami wietrzności oraz lokalnym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Wszystkie warunki związane z lokalizacją elektrowni wiatrowej, możliwe są do opisanego przez charakterystyczne parametry mające wpływ na wielkość pozyskanej energii.

### Program komputerowy do analizy produkcji energii elektrycznej

Na potrzeby szacowania potencjału produkcji energii elektrycznej z różnego rodzaju turbin wiatrowych, opracowany został program komputerowy PowerCalculator (rys. 1). Powstał on w efekcie trzyletnich badań wietrzności w wybranych lokalizacjach na Dolnym Śląsku, w ramach projektu ENERGYREGION „Efektywny rozwój rozproszonej energetyki odnawialnej w połączeniu z konwencjonalną”, wdrażanym w ramach Programu dla Europy Środkowej i współfinansowanym przez Regionalny Fundusz Rozwoju Regionalnego. Intuicyjne w obsłudze narzędzie pozwala na dobór podstawowych parametrów turbiny wiatrowej oraz oszacowanie spodziewanej wielkości produkcji energii elektrycznej pozyskanej z energii wiatru. Aplikacja dedykowana jest dla potencjalnych inwestorów przy podejmowaniu decyzji o budowie turbiny wiatrowej.

### Charakterystyka wiatru

Do opisanego charakterystyki wiatru określającej częstość występowania prędkości wiatru ( $f(v)$ ) w poszczególnych ustalonych przedziałach wartości w określonym czasie, stosuje się funkcję rozkładu prawdopodobieństwa. Najczęściej stosowanym modelem jest dwuparametryczny rozkład Weibulla określany wzorem (1):

$$f(v) = \frac{\alpha}{\beta} \left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{\beta}\right)^{\alpha}\right) \quad (1)$$

gdzie:

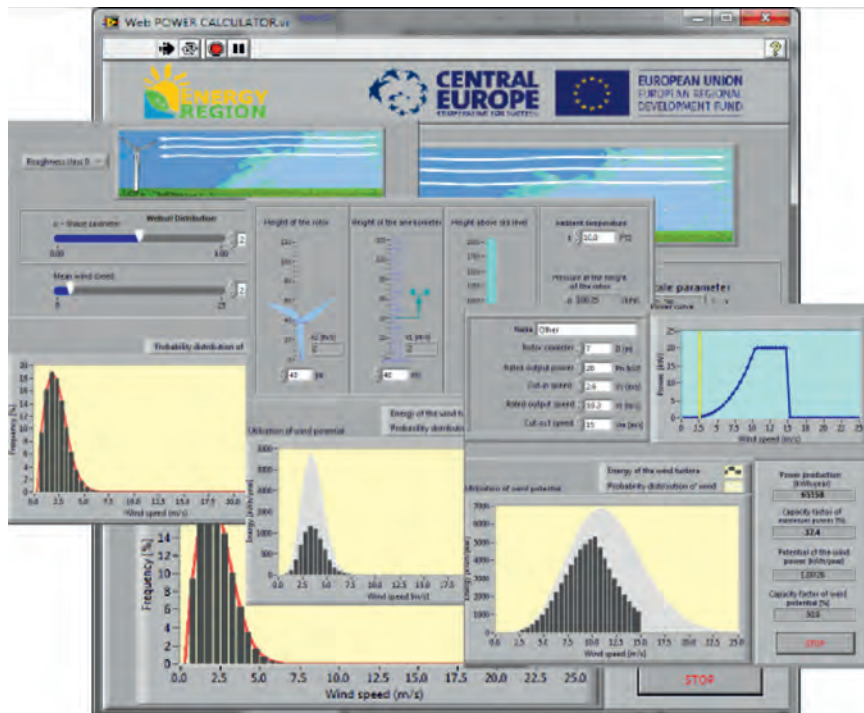
$v$  - prędkość wiatru, dla  $v > 0$ ,

$f(v)$  - częstość wystąpienia wiatru o wartości  $v$  (probability density function),

$\alpha$  - parametr kształtu (shape parametr),

$\beta$  - parametr skali (scale parametr), który można wyznaczyć z zależności (2):

$$\beta = \frac{v_{sr}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{\alpha}\right)} \quad (2)$$



Rys. 1. Panel czołowy programu PowerCalculator (zakładki: warunki wietrzności, wysokość turbiny, turbina)  
Fig. 1. Front Panel of PowerCalculator software ( tabs: wind conditions, height of the turbine, wind turbine)

Aplikacja PowerCalculator, po wprowadzeniu przez użytkownika niezbędnych informacji dotyczących: warunków wietrzności, wysokości otaczającej zabudowy oraz podstawowych parametrów turbiny, pozwala na oszacowanie ilości potencjalnej energii elektrycznej (rys. 1). Funkcjonalność programu została zaprezentowana na przykładzie miejscowości Prusice, która położona jest w powiecie trzebnickim województwa dolnośląskiego. Prowadzone były tam, przez Poltegor-Instytut, pomiary wietrzności a wyniki wykorzystano w celu sprawdzenia poprawności funkcjonowania programu.

gdzie:

$v_{sr}$  - średnia wartość prędkości wiatru (wartość oczekiwana),

$\Gamma$  - funkcja gamma dla zmiennej ogólnej  $x$  wyznaczona z zależności (3):

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} x^{n-1} e^{-x} dx \quad (3)$$

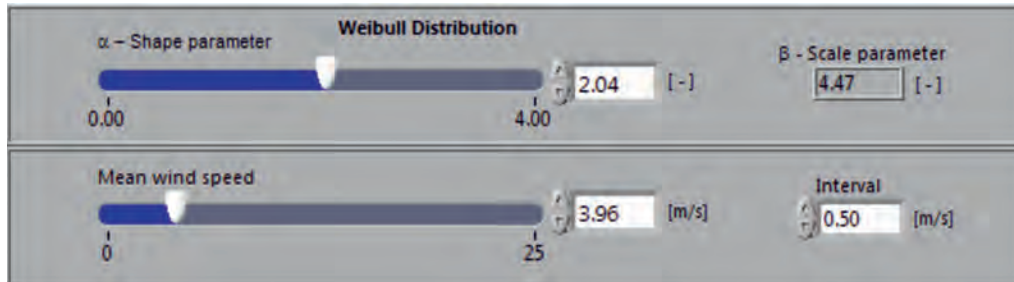
Prezentowane parametry ( $\alpha$ ,  $v$ ) (rys. 2) wprowadzone

do programu są poprawne dla tych uzyskanych z wyników pomiarów wietrzności wykonanych za pomocą specjalistycznego 50-metrowego masztu pomiarowego, wyposażonego w trzy czujniki prędkości i kierunku wiatru, rejestrator danych, czujnik wilgotności i temperatury, czujnik ciśnienia atmosferycznego oraz automatyczne zasilanie i sygnalizację ostrzegawczą w miejscowości Prusice. Kierunki i prędkości wiatru były mierzone na trzech wysokościach: 28, 38 i 48m n.p.t. od stycznia do grudnia 2013 roku z 10-minutowym interwałem zapisu danych [9].

W wyniku wprowadzenia parametrów ( $\alpha$ ,  $\nu$ ) do programu, uzyskano rozkład prędkości wiatru wraz z dopasowanym rozkładem Weibulla (rys. 3).

### Lokalizacja turbiny wiatrowej w terenie

Przy wyborze lokalizacji pod budowę elektrowni wiatrowej uwzględnić należy, w sposób możliwie dokładny, wszystkie przeszkody znajdujące się przed turbiną. Zdecydowanie poszukiwane są miejsca o laminarnej strudze powietrza, a więc

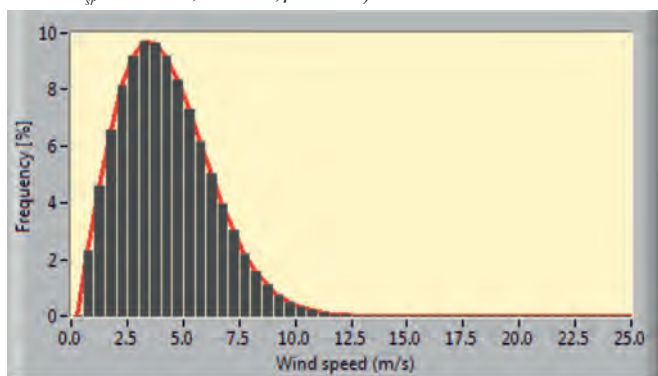


Rys. 2. Program PowerCalculator, parametry wiatru dla rozkładu Weibulla (wartości zmierzone na wysokości 38 m n.p.t. w miejscowości Prusice;

$$v_{sr} = 3,96 \text{ m/s}, \alpha = 2,04, \beta = 4,47$$

Fig. 2. PowerCalculator Software, wind parameters for the Weibull distribution (the measured values at height 38 m above the ground level (a.g.l.) in Prusice;

$$v_{sr} = 3,96 \text{ m/s}, \alpha = 2,04, \beta = 4,47$$



Rys.3. Histogram prędkości wiatru w miejscowości Prusice (pomiar dla  $h_f=38$  m n.p.t.)

Fig. 3. Histogram of wind speeds in Prusice ( the measurement at  $h_f=38$  m a.g.l.)

tereny o otwartych przestrzeniach, bez przeszkód wprowadzających zaburzenia w przemieszczającej się strudze masy powietrza. Ukształtowanie terenu charakteryzuje się własną szorstkością terenu definiowaną jako - wpływ nierówności terenu na rozkład prędkości wiatru w funkcji wysokości [5]. Zatem, im większa szorstkość terenu, tym większy wzrost prędkości wraz z wysokością. Klasa szorstkości wynika z jej długości, tzn. długość szorstkości jest maksymalną wysokością nad powierzchnią ziemi, na której prędkość wiatru wynosi 0 m/s. W programie wykorzystano podział na sześć klas szorstkości terenu (tab. 1), które wykorzystują typowy dla lokalizacji małych elektrowni wiatrowych przedział szorstkości terenu. Przyjęta klasa szorstkości ma bezpośredni wpływ na kształt rozkładu prędkości (rys. 4).

Tab. 1. Opisowy sposób klasyfikacji szorstkości terenu [3]

Tab. 1. A classification of terrain roughness [3]

| A | B | C      | D     | E   |
|---|---|--------|-------|---|
| 0 |   | 0,0002 | 0,150 | Teren płaski otwarty, na którym wysokość nierówności jest mniejsza od 0,5 m   |
| 1 |   | 0,01   | 0,165 | Teren płaski otwarty lub nieznacznie pofalowany. Mogą występować pojedyncze zabudowania lub drzewa w dużych odległościach od siebie           |
| 2 |   | 0,10   | 0,190 | Teren płaski lub pofalowany z otwartymi dużymi przestrzeniami. Mogą występować grupy drzew lub niska zabudowa w znacznej odległości od siebie |
| 3 |   | 1,0    | 0,220 | Teren z przeszkodami, tj. tereny zalesione, przedmieścia większych miast oraz małe miasta, tereny przemysłowe luźno zabudowane                |
| 4 |   | 2,0    | 0,270 | Teren z licznymi przeszkodami w niedużej odległości od siebie, tj. skupiska drzew, budynków w odległości min. 300 m od miejsca obserwacji.    |
| 5 |   | 5,0    | 0,350 | Teren z licznymi dużymi przeszkodami położonymi blisko siebie, obszary leśne, centra dużych miast   |

A - Klasy szorstkości terenu, B - opis graficzny, C - długość szorstkości ( $z_0$ ), D - wykładnik potęgowy ( $\alpha$ ), E - opis

## Potencjał energetyczny wiatru na różnych wysokościach

Nieczęsto występuje możliwość prowadzenia pomiarów wietrzności w miejscu i na wysokości zabudowania turbiny wiatrowej [6]. W przypadku opierania analizy na typowych danych dostępnych ze stacji meteorologicznych, gdzie pomiary prędkości wiatru prowadzone są standardowo na wysokości 10 m n.p.t., [10] wyższa zabudowa turbiny pozwala na uzyskanie większych średnich prędkości wiatru zgodnie z pionowym profilem prędkości wiatru. Profil ten w warstwie przyściennej określa prędkość wiatru w funkcji wysokości nad powierzchnią terenu. Ma on istotne znaczenie ponieważ jego znajomość pozwala na dokładniejsze wyznaczenie wydajności energetycznej turbiny [4]. W utworzonym programie został on wyznaczony przy pomocy funkcji wykładniczej, na podstawie przyjętej klasy szorstkości terenu. Z zależności (4), użyty we wzorze wykładnik potęgowy  $\alpha$  wyznaczany jest zazwyczaj doświadczalnie (tab. 1). Prędkość wiatru rośnie tylko do pewnej wysokości określonej jako wysokość wiatru gradientowego, która zależy od klasy szorstkości terenu:

$$v_{1(h_1)} = v_{2(h_2)} \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^\alpha \quad (4)$$

gdzie:

$v_{1(h_1)}$  prędkość wiatru [m/s] na wysokości  $h_1$ ,

$v_{2(h_2)}$  prędkość wiatru [m/s] na wysokości  $h_2$ ,

$\alpha$  - wykładnik potęgi zależny od klasy szorstkości terenu (tab. 1)

gdzie:

$p(h)$  – ciśnienie atmosferyczne na wysokości  $h$  [Pa]

$p_0$  – ciśnienie atmosferyczne na poziomie odniesienia [Pa]

$\mu$  – masa molowa powietrza [0,0289644 kg/mol]

$g$  – przyspieszenie ziemskie [m/s<sup>2</sup>]

$R$  – stała gazowa [J/(mol K)]

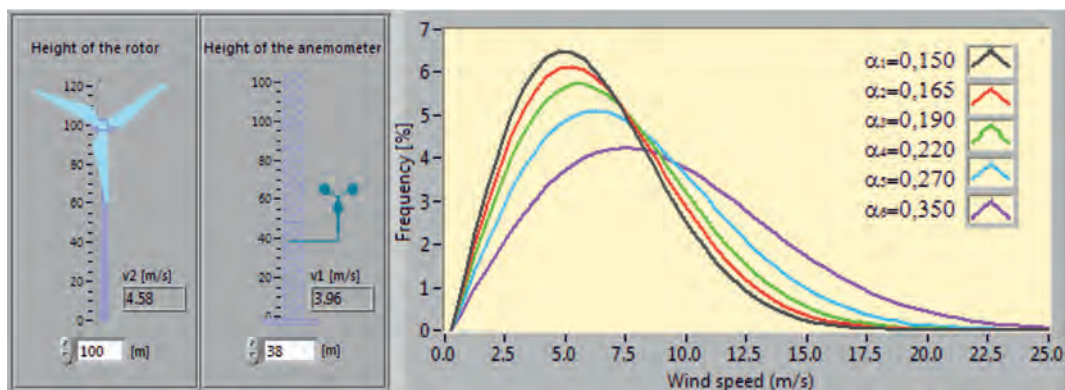
$T$  – temperatura powietrza [K]

$h$  – wysokość nad poziomem morza [m]

## Moc turbiny wiatrowej

Podstawową charakterystyką elektrowni wiatrowej jest krzywa mocy. Jest to zależność między chwilowymi wartościami mocy i prędkości wiatru, zazwyczaj przedstawiana w formie tabelarycznej przez producenta turbiny wiatrowej [5]. Charakterystyka mocy turbiny w omawianym programie komputerowym, aproksymowana jest na podstawie podstawowych parametrów turbiny, automatycznie wprowadzonych bądź opcjonalnie dobranych przez użytkownika (rys. 5):

- prędkość startowa (Cut-in speed) - jest to prędkość niezbędna do uruchomienia turbiny i produkcji przez nią energii elektrycznej,
- prędkość nominalna (Rated output speed) - jest to prędkość wiatru, przy której turbina osiąga swoją moc nominalną,
- prędkość zatrzymania (Cut-out speed) - jest to prędkość wiatru przy której system kontrolny turbiny zatrzymuje się ze względów bezpieczeństwa,
- moc nominalna turbiny (Rated output power),
- średnica wirnika (rotor diameter), od której szacowana jest wielkość współczynnika wykorzystania potencjału energii wiatru.



Rys. 4. Wpływ przyjętej klasy szorstkości terenu na zmianę statystycznego rozkładu prędkości wiatru dla ustalonej średniej prędkości wiatru na wysokości pomiarowej anemometru  $h_1$  i wysokości  $h_2$  wirnika turbiny

Fig. 4. The influence of the class of terrain roughness on the change in the statistical distribution of wind speed for a determined average wind speed at the anemometer height -  $h_1$  and the turbine rotor height -  $h_2$

Wysokość zabudowy turbiny wiatrowej nad poziomem morza wpływa bezpośrednio na wielkość energii wiatru (6), wraz ze wzrostem wysokości maleje bowiem gęstość powietrza, co prowadzi do zmniejszenia sprawności turbiny wiatrowej, a w efekcie końcowym zmniejszeniem produkcji energii elektrycznej. W programie uwzględniono tę zależność przez zastosowanie wzoru barometrycznego (5) - określającego zależność ciśnienia  $p(h)$  między wysokością nad poziomem morza  $h$ , a ciśnieniem atmosferycznym  $p_0$  na poziomie odniesienia:

$$\rho(h) = \rho_0 \cdot \exp\left(-\frac{\mu g h}{RT}\right) \quad (5)$$

Moc turbiny rośnie w przybliżeniu wykładniczo od prędkości rozruchu do prędkości nominalnej według wzoru (6), następnie od prędkości nominalnej do prędkości zatrzymania, moc turbiny jest w przybliżeniu stała i równa mocy nominalnej (rys. 5).

$$P = C_p \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3\right) \quad (6)$$

gdzie:

$P$  – moc elektrowni, [W]

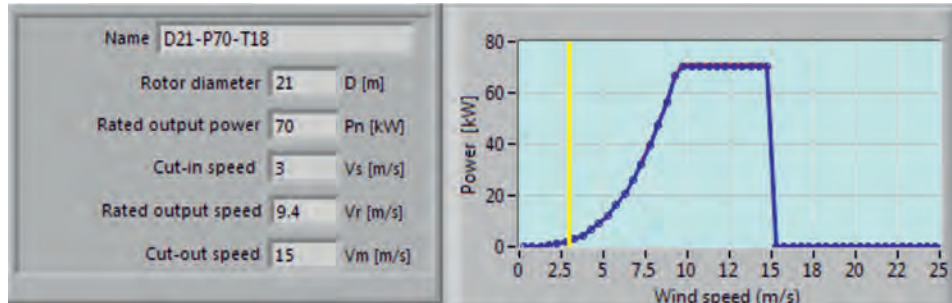
$A$  – powierzchnia wirnika, [m<sup>2</sup>]

$v$  – prędkość wiatru, [m/s]

$C_p$  - współczynnik mocy

Jeśli pominąć wszelkie straty, maksymalna teoretyczna

sprawność konwersji mocy wiatru na moc mechaniczną  $C_p$ , wynosi 0,59 (limit Betza), a jego praktyczna wartość maksymalna sięga  $0,48 \div 0,50$  w największych elektrowniach. W małych, przydomowych elektrowniach wiatrowych wartość ta zawiera się w zakresie  $0,25 \div 0,40$  i jest tym mniejsza, im mniejsza jest średnica wirnika elektrowni.



Rys. 5. Przykładowa charakterystyka mocy turbiny wraz z krzywą mocy  
Fig. 5. Example characteristic of a power turbine with the power curve

### Wytworzona energia elektryczna

Jeżeli prędkość wiatru byłaby każdego dnia powyżej prędkości nominalnej, uzysk energii można byłoby wyliczyć jako iloczyn mocy turbiny i ilości godzin w roku. W rzeczywistości prędkości wiatru są jednak znacznie słabsze, czasem tak niskie, że turbina nawet nie zacznie pracować, najczęściej jednak turbina pracuje jedynie z częścią mocy nominalnej. Dysponując danymi wietrzności i charakterystyką turbiny wiatrowej można obliczyć wartość mocy ( $P_{v_i}$ ) dla prędkości wiatru ( $v_i$ ) kolejnych przedziałach klasowych (6), a następnie całkowitą energię wytworzoną w ciągu roku przez elektrownię ( $E_{ew}$ ), która jest sumą energii składowych ze wszystkich przedziałów (7) w czasie  $t_i$ :

$$E_{ew} = \sum_{i=1}^k (P(v_i) \cdot t_i) \quad (7)$$

gdzie:

$P(v_i)$  - moc siłowni wiatrowej przy prędkości wiatru  $v_i$ ,  
wg krzywej mocy [W]

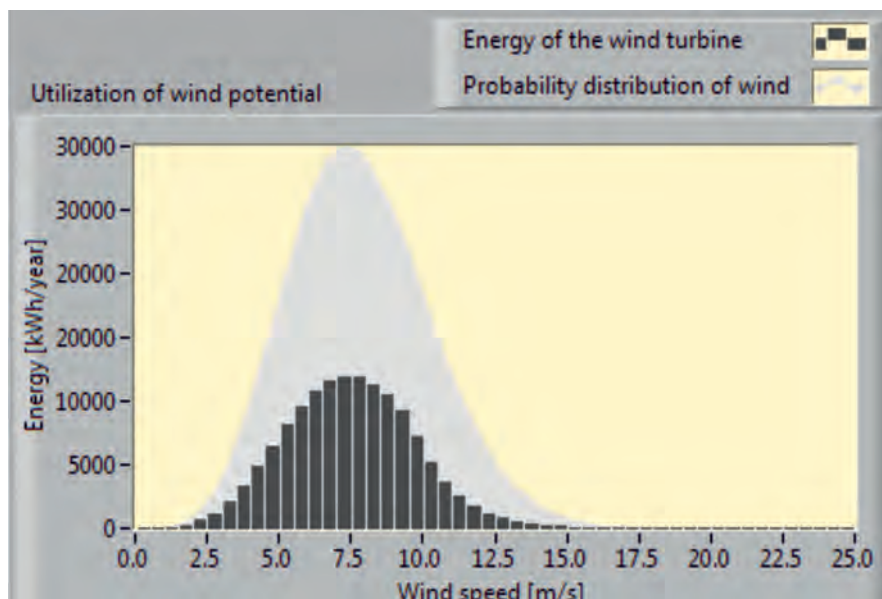
$t_i$  - czas trwania wiatru o prędkości  $v_i$  w ciągu roku [h]

Rysunek 6 przedstawia wynik przeprowadzonej analizy w miejscowości Prusice za pomocą histogramu rozkładu potencjalnej energii wiatru, histogramu rozkładu energii wiatru z dobranej turbiny oraz zbiorczej tabeli wynikowej. Na tej podstawie odczytać można w jakich zakresach prędkości wiatru można spodziewać się najwięcej energii. Współczynnik wykorzystania mocy maksymalnej (Capacity factor of maximum

power [%]) to procentowy współczynnik przedstawiający wyprodukowaną przez turbinę wiatrową energię, jako hipotetyczny procent czasu pracy z mocą maksymalną.

### Podsumowanie

Z przeprowadzonych badań wietrzności na terenie Dolnego Śląska i uzyskanych w ten sposób niezbędnych danych pomiarowych, utworzono program komputerowy PowrCalculator. Należy zwrócić uwagę, że program ma służyć jako narzędzie wsparcia przy analizowaniu warunków wiatrowych w terenie i w związku z tym, oblicza potencjał energii wyprodukowany przez turbinę wiatrową wraz z opcją określenia produkcji energii w zależności od wysokości usytuowania wysokości zabudowy turbiny. W przypadku, gdy potencjalna elektrownia wiatrowa mogłaby znajdować się na terenie zurbanizowanym, wyniki uzyskane z programu mogą odbiegać od rzeczywistych, pomierzonych wartości. Przy planowaniu potencjalnej inwestycji elektrowni wiatrowej, należy pamiętać, że tylko część potencjalnej energii wiatru zostanie wykorzystana, co ilustruje wykres na rysunku 6.



Rys. 6. Szacowana produkcja energii elektrycznej z jednej turbiny wiatrowej o mocy 70 kW

Fig. 6. The estimated production of electricity from the one wind turbine with a power of 70 kW

Praca została wykonana w ramach projektu ENERGYREGION „Efektywny rozwój rozproszonej energetyki odnawialnej w połączeniu z konwencjonalną”, wdrażanym w ramach Programu dla Europy Środkowej i współfinansowanym przez Regionalny Fundusz Rozwoju Regionalnego.



## Literatura

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniającą i w następstwie uchylającą dyrektywę 2001/77/WE oraz 2003/30/WE (Dz. Urz. UE L 140 z 05.06.2009, str. 16, z późn. zm.)
- [2] Smil V., *Science, energy, ethics, and civilization*. In: *Visions of Discovery: New Light on Physics, Cosmology, and Consciousness*, R.Y. Chiao et al. eds., Cambridge University Press, Cambridge 2010, pp. 709-729
- [3] <http://www.instantsani.pl/ozewiatr3.htm>
- [4] <http://green-power.com.pl/pl/home/wiatr-i-jego-pomiar-w-energetyce-wiatrowej/>
- [5] Duraczyński M., *Badania i analiza energii wiatru dla potrzeb energetyki w Polsce Południowo –Wschodniej*. Praca doktorska AGH w Krakowie, Kraków, 2013
- [6] Michalak P., *Ocena zasobów energii wiatru na potrzeby małej energetyki wiatrowej*. Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie „Elektrotechnika i Elektronika”, Tom 28, zeszyt 1-2, 2009
- [7] Brzeziński M. i in., *Małe (przydomowe) elektrownie wiatrowe*, Nowy Sącz, 2012
- [8] Wind Energy AGH. *Energetyka Wiatrowa*. [Online] [http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria\\_srodowiska/c\\_odnaw\\_zrodla\\_en/](http://zasoby1.open.agh.edu.pl/dydaktyka/inzynieria_srodowiska/c_odnaw_zrodla_en/).
- [9] [www.energy-region.eu](http://www.energy-region.eu)
- [10] Dancewicz A., Otop I., Szalińska W., *Ocena warunków środowiskowych województwa dolnośląskiego w aspekcie ich wykorzystania dla potrzeb energetyki wiatrowej*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Wrocław 2009



fot. Michał Duczmal

Z cyklu: „Piękno zakłete w skale” (Andy - Chile)