

Wyznaczanie parametrów wiatru w energetyce odnawialnej

Streszczenie. W artykule opisano metody wyznaczania parametrów wiatru stosowane w energetyce odnawialnej. Podano podstawowe wiadomości dotyczące powstawania wiatru. Opisano czynniki wpływające na zasoby energetyczne wiatru. Pokazano podstawowe zależności opisujące energię wiatru. Otrzymano rozkłady kierunku i prędkości wiatru na podstawie danych historycznych ze stacji meteorologicznej. Obliczono gęstości mocy wiatru dla różnych kierunków. Obliczenia przeprowadzono za pomocą oprogramowania WAsP – Wind Resource Estimation Program.

Abstract. Methods of wind parameters determining applied at the renewable power sector are described in this paper. Fundamental knowledge of wind formation is presented. Factors which have influence on wind energy resources are described. Fundamental dependences which characterized wind energy are shown. Distributions of wind direction and wind velocity on the basis of historical data from meteorological station are obtained. Power density of wind for different destinations is calculated. Calculations are carried out using Wind Resource Estimation Program (WAsP). (**Wind parameters determining in renewable power sector**)

Słowa kluczowe: parametry wiatru, metody wyznaczania, turbina wiatrowa, energia odnawialna

Keywords: wind parameters, determining methods, wind turbine, renewable energy

Wstęp - wiatr jako źródło energii

Wiatr, jako zjawisko naturalne, wykorzystywany jest przez ludzkość od wieków. Pierwsze znane zastosowanie wiatru to wykorzystanie jego energii do napędu statków żaglowych, co spowodowało rozwinięcie się transportu morskiego, a przez to powstanie i rozwój wielu cywilizacji. Energię wiatru stosowano szeroko do napędu młynów, a także do pompowania wody. Jednak wzrastające uprzemysłowienie i wprowadzenie technologii wytwarzania energii cieplnej i elektrycznej ze źródeł kopalnych spowodowało spadek zainteresowania wykorzystaniem energii wiatru.

W związku z prognozami wyczerpywania się zasobów paliw kopalnych służących do wytwarzania energii, a także z problemem wzrostu emisji do atmosfery dwutlenku węgla, pod koniec XX wieku rozpoczął się proces powrotu do wykorzystania tradycyjnych odnawialnych źródeł energii, w tym wiatru. Najważniejszymi walorami energii wiatru jest jej ogólna dostępność, niewyczerpalność zasobów, a także fakt, że przy jej zamianie w energię elektryczną nie powstają uboczne produkty w postaci zanieczyszczeń. Oblicza się, że zastąpienie energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach węglowych, energią wytwarzaną przez elektrownie wiatrowe, eliminuje emisję do atmosfery dwutlenku siarki (5,5 g/kWh), tlenków azotu (4,2 g/kWh), dwutlenku węgla (700 g/kWh) oraz pyłów (49 g/kWh) [1]. Energetyka wiatrowa ma również swoje wady, z których podstawową jest zmienność prędkości wiatru, co powoduje zmiany w ilości produkowanej energii, a nawet okresowe przerwy w pracy elektrowni. Problemem jest również zagrożenie dla ptaków oraz zmiany krajobrazu.

„Wiatrem nazywamy poziomą składową ruchu powietrza względem powierzchni ziemi” [1]. Wiatr jest dalekim efektem oddziaływania promieniowania słonecznego na powierzchnię Ziemi oraz ruchu obrotowego kuli ziemskiej wokół własnej osi. Nierównomierny dopływ energii słonecznej do Ziemi spowodowany szerokością geograficzną oraz ruch obrotowy Ziemi, z którym wiąże się dobowy cykl dopływu energii, a także siła Coriolisa, powodują powstawanie ogólnej cyrkulacji atmosfery, tj. charakterystycznego dla Ziemi układu krążenia powietrza w troposferze. Na prędkość i kierunek wiatru ma wpływ nierównomierność nagrzewania mas powietrza w zetknięciu z powierzchnią Ziemi spowodowana różnicami w zdolności pochłaniania i oddawania ciepła w różnych skalach przestrzennych, od kontynentalnych, w których rozpatruje się różnicę między lądem, a oceanem, do lokalnych, gdzie

bierze się pod uwagę różnice między południowym, a północnym stokiem wzgórza, lasem, a polem, czy też miastem, a obszarem wiejskim. Dodatkowo występują bardzo lokalne układy wiatru, stabilne przestrzennie, związane z orografią, bądź dynamiczne, związane z chmurami kłębiastymi.

Dla energetyki wiatrowej istotna jest energia wiatru w warstwie przyziemnej, zwanej również graniczną, bądź tarciovą, której wysokość nad poziomem terenu zależy od szorstkości podłoża, a także stanu równowagi pionowej atmosfery i prędkości wiatru. W warstwie przyziemnej wiatr charakteryzuje się ruchem nie laminarnym ze zmianami kierunku i prędkości strumienia powietrza. Ruch powietrza staje się turbulentny, czyli zmienny w czasie i przestrzeni, chaotyczny i nieregularny. Turbulencje w atmosferze spowodowane są głównie tarciem powietrza o podłoże, konwekcją termiczną i dynamiczną, a także wydzielaniem ciepła podczas tworzenia się chmur i ruchami falowymi nad obszarami górskimi. Efektem powyższych zjawisk są zmiany prędkości wiatru w stosunku do ruchu całej masy poruszającego się powietrza, a także oscylacje kierunków w stosunku do kierunku głównego, które określane są, jako struktura wiatru [2].

Ocena zasobów energetycznych wiatru

Energia kinetyczna niesiona z powietrzem o masie m poruszającym się z prędkością V określona jest wzorem:

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

Moc powietrza przepływającego przez powierzchnię określaną przez koło wiatrowe (powierzchnię określaną przez łopaty wirnika turbiny) wynosi:

$$(2) \quad P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3,$$

gdzie: ρ – gęstość powietrza, S – pole powierzchni określanej przez koło wiatrowe, V – prędkość powietrza.

Wartość energii niesionej przez cząsteczki powietrza jest proporcjonalna do trzeciej potęgi jego prędkości i do gęstości. Gęstość powietrza jest uzależniona od aktualnych parametrów pogody, tj. temperatury i ciśnienia. Do obliczeń przybliżonych przyjmuję się często wartość gęstości powietrza przy temperaturze 15°C i ciśnieniu 1000hPa, równą 1,25kg/m³. Równanie (3) przedstawia zależność na

energię kinetyczną wiatru przepływającą przez powierzchnię S prostopadłą do kierunku wiatru w określonym czasie t [1]:

$$(3) \quad E_k = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot t.$$

Przyjmując za pole powierzchni w równaniu (3) czynną powierzchnię przekroju wirnika turbiny wiatrowej oraz gęstość powietrza równą $1,25 \text{ kg/m}^3$ otrzymuje się przybliżoną zależność wyrażającą moc wiatru wykorzystywaną przez tę turbinę w [kW] [1]:

$$(4) \quad P_w = 0,000625 \cdot S \cdot V^3.$$

Pamiętać jednak należy, że zmiany gęstości powietrza, związane z warunkami atmosferycznymi, w znaczący sposób wpływają na energię wiatru. Wzrost gęstości powietrza, spowodowany spadkiem temperatury od 15°C do 0°C powoduje, że energia wiatru, przy niezmiennej prędkości, wzrasta o 6%, natomiast spadek gęstości powodowany ogrzaniem powietrza od 15°C do 30°C wywołuje obniżenie energii wiatru o 5%. Podobnego rzędu zmiany energii wiatru wywołują wahania ciśnienia atmosferycznego. Przejście od głębokiego niżu (973hPa) do silnego wyżu (1037hPa) wywołuje wzrost energii wiatru o 6%. W okresie zimowym powyższe zależności mogą się kumulować, ponieważ o tej porze roku w klimacie Polski wysokiemu ciśnieniu towarzyszy niska temperatura powietrza i odwrotnie, przy niskim ciśnieniu zimą temperatura jest wyższa. Jednocześnie najwyższe prędkości wiatr osiąga w zimie i wtedy wahania temperatury i ciśnienia atmosferycznego mogą mocno wpływać na wartość energii kinetycznej powietrza [1].

Rzeczywista energia pobierana przez łopaty turbiny wiatrowej jest proporcjonalna do różnicy prędkości powietrza przed i za wirnikiem turbiny i określona jest zależnością:

$$(5) \quad E_0 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (V^2 - V_0^2),$$

gdzie: V – prędkość wlotowa powietrza, V_0 – prędkość wylotowa powietrza.

Moc mechaniczna odbierana przez wirnik turbiny wiatrowej wynosi:

$$(6) \quad P_m = \frac{1}{2} \cdot \left(\rho \cdot S \cdot \frac{V + V_0}{2} \right) \cdot (V^2 - V_0^2).$$

Powyższą zależność można przekształcić do następującej postaci:

$$(7) \quad P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left(1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right)}{2}.$$

Moc mechaniczna pobierana przez łopaty wirnika turbiny wiatrowej jest najczęściej przedstawiana za pomocą wyrażenia:

$$(8) \quad P_m = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p,$$

gdzie:

$$(9) \quad C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left(1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right)}{2}.$$

Wielkość wyrażona przez równanie (9) nazywana jest współczynnikiem wykorzystania energii wiatru, albo współczynnikiem Betza. Wartość współczynnika C_p zależy od stosunku prędkości wiatru przed i za wirnikiem turbiny (V_0/V). W przypadku, gdy wiatr za turbiną wiatrową osiąga prędkość trzy razy mniejszą w stosunku do prędkości wiatru przed wirnikiem, współczynnik C_p osiąga swoją maksymalną wartość, równą $0,593$, nazywaną limitem Betza. W warunkach rzeczywistych, ze względu na straty aerodynamiczne, dla współczesnych, najczęściej stosowanych, trójłopatowych turbin wiatrowych z poziomą osią obrotu udaje się osiągnąć wartość C_p równą niewiele ponad $0,4$.

Bardzo istotnym elementem wpływającym na wartość energii mas powietrza w na danym obszarze jest pionowy profil prędkości wiatru w warstwie przyziemnej. Na pionowy profil prędkości wiatru wpływa tarcie zewnętrzne związane z rodzajem terenu oraz pionowa wymiana pędu, którą określa stan równowagi pionowej powietrza nazywany gradientem termicznym. Zagadnienie pionowego profilu wiatru autorzy opisali szczegółowo w pracy [3].

Pomiary prędkości i kierunków wiatru

Pomiar wiatru dla potrzeb energetyki wiatrowej ma na celu uzyskanie informacji o prędkości i kierunkach wiatru dla danej lokalizacji, a także o innych parametrach pogody wpływających na wartość energii niesionej przez wiatr. Pomiary prowadzi się w cyklu rocznym w celu uzyskania danych wiatrowych ze wszystkich pór roku. Do pomiarów używane są skalibrowane czujniki prędkości i kierunku wiatru montowane na masztach pomiarowych. Jako czujniki prędkości stosowane są anemometry mechaniczne (czasowe) wraz z przetwornikami kierunku, albo dokładniejsze oraz posiadające o wiele lepszą dynamikę, anemometry ultradźwiękowe, które umożliwiają również pomiar kierunku wiatru. Pomiar dokonywany jest w sposób ciągły, z uśrednianiem, co 10 minut. Rejestrowane są również inne parametry pogody, które wpływają bezpośrednio na wartość gęstości powietrza, tj. temperatura i ciśnienie atmosferyczne [4].

Pomiar parametrów wiatru dla potrzeb energetyki wiatrowej powinien być dokonany najlepiej na wysokości odpowiadającej wysokości umieszczenia wirnika przyszłej turbiny wiatrowej. Nie zawsze jednak opłacalne jest budowanie masztu pomiarowego o wymaganej wysokości. Alternatywnym rozwiązaniem jest pomiar na 2 lub 3 mniejszych wysokościach. Umożliwia to uzyskanie pionowego profilu prędkości wiatru i ekstrapolację wyników do odpowiedniej wysokości. Anemometry należy umieścić na maszcie pomiarowym w kierunku wiatru dominującego na danym terenie, aby cień aerodynamiczny masztu miał jak najmniejszy wpływ na wyniki pomiarów [5]. Obróbka wyników pomiarów polega na wyznaczeniu rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia danej prędkości wiatru, który może być pokazany w formie graficznej w postaci histogramu. Histogram jest tworzony poprzez sumowanie zdarzeń 10-minutowych n_i prędkości wiatru w wybranym przedziale V_i :

$$(10) \quad \left[V_i - \frac{\Delta V}{2}, V_i + \frac{\Delta V}{2} \right].$$

Gęstość prawdopodobieństwa wystąpienia danej prędkości wiatru wyznacza się z zależności:

$$(11) \quad P_i = \frac{n_i}{N},$$

gdzie: N , jest liczbą wszystkich pomiarów wykonanych w danym okresie czasu.

Otrzymany histogram prędkości wiatru interpoluje się następnie analitycznie. Najlepiej do tego celu nadaje się funkcja rozkładu Weibulla opisana wyrażeniem:

$$(12) \quad p(V) = \frac{k}{A} \cdot \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right],$$

gdzie: A i k , są parametrami decydującymi o kształcie funkcji rozkładu. Przy poprawnie dobranych parametrach A i k prędkość średnia oraz energia wiatru, pokazane za pomocą histogramu, będą równe wyliczonym z rozkładu Weibulla.

Energię wiatru brutto definiuje się jako energię powietrza przepływającego w ciągu roku przez jednostkową pionową powierzchnię ($Wh/rok/m^2$):

$$(13) \quad E_B = \frac{1}{2} \rho \cdot 8760 \sum_{i=1}^{\infty} V_i^3 P_i,$$

gdzie: liczba 8760 oznacza ilość godzin w roku.

Ocena zasobów energetycznych wiatru w skali lokalnej za pomocą modelu WAsP

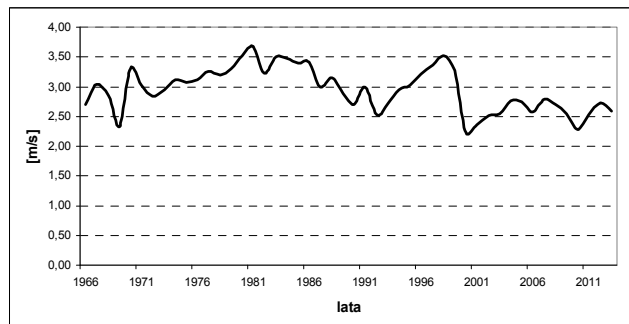
Ocenę zasobów energetycznych wiatru w skali lokalnej można przeprowadzić bez pomiarów, korzystając z danych historycznych ze stacji meteorologicznych, poprzez użycie modeli numerycznych wiatru. Liniiowy model numeryczny o nazwie Wind Atlas Analysis and Application Programme (Wind Resource Estimation Program) - WAsP służy do rozwiązywania problemu oceny zasobów energii wiatru w skali lokalnej z uwzględnieniem topografii oraz szorstkości terenu. Program wykorzystuje cyfrowe mapy terenu w skali 1:25000 lub 1:50000 w promieniu 50 km od miejsca obserwacji. Jako wartości wejściowe stosuje się „surowe” dane historyczne lub dane częściowo przetworzone w postaci na przykład histogramów wiatru uwzględniających wysokość nad powierzchnią terenu oraz parametry szorstkości. Program zawiera modele do opisu strumienia przepływu powietrza nad różnymi rodzajami terenu. Modele uwzględniają także analizę wiatru w pobliżu obiektów (przeszkód) mających wpływ na parametry wiatru [2]. Model WAsP składa się z następujących bloków obliczeniowych:

- analiza danych surowych bez wcześniejszej obróbki: opcja umożliwia analizę serii pomiarowych wiatru w dowolnym czasie dostarczając statystyczne streszczenie analizowanego parametru, specyfikację warunków wiatrowych;
- tworzenie danych do „atlasu wiatru”: dane wejściowe zostają przetworzone do regionalnych warunków wiatrowych, albo do zestawu danych dla potrzeb „atlasu wiatru”;
- szacunkowe obliczenia warunków wiatrowych: w bloku obliczeniowym programu można użyć zestawu obliczonych wcześniej danych „atlasu wiatru” w celu oceny warunków wiatrowych dla określonej lokalizacji;
- szacunkowe obliczenia potencjału wiatru: w bloku obliczeniowym uzyskuje się informacje na temat wartości średniej energii wiatru, ponadto po wpisaniu krzywej mocy turbiny można dokonać obliczenia rocznej produkcji energii z turbiny wiatrowej dla danej lokalizacji [6].

Obliczenia energetyczne wiatru

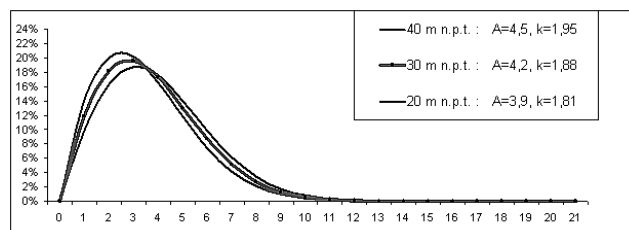
Obliczenia parametrów energetycznych wiatru za pomocą modelu WAsP zostały wykonane dla lokalizacji zespołu trzech elektrowni wiatrowych o pionowej osi obrotu (VAWT), o mocy po 10kW każda, na budynku Wydziału

Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej, opisanego w pracy [7]. Wykorzystano historyczne dane pomiarowe wiatru ze Stacji Meteorologicznej Częstochowa z lat 1966 – 2013, z których do badań użyto dane z wybranych 20 lat. W ramach wykonanych prac badawczych wyznaczono modelowane rozkłady kierunku i prędkości wiatru, a także wyliczono gęstości mocy wiatru dla poszczególnych kierunków. Na rys. 1 pokazano przebieg średniorocznej prędkości wiatru na terenie Częstochowy (w roku 2005 została zmieniona wysokość umieszczenia anemometru z 12,7m na 10,0m nad poziomem terenu, stąd na rys. 1 widoczny jest spadek wartości prędkości średniorocznej).



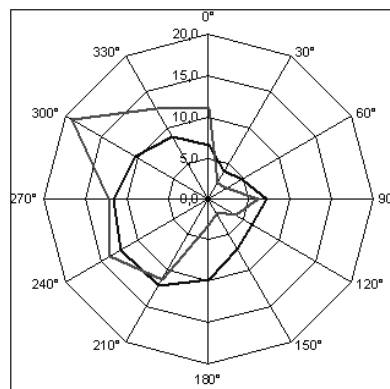
Rys. 1. Przebieg średniorocznej prędkości wiatru w latach 1966 – 2013 w Częstochowie

Na rys. 2 pokazano modelowane rozkłady prędkości wiatru ze wszystkich kierunków dla różnych wysokości nad poziomem terenu (n.p.t.) (20m, 30m, 40m).

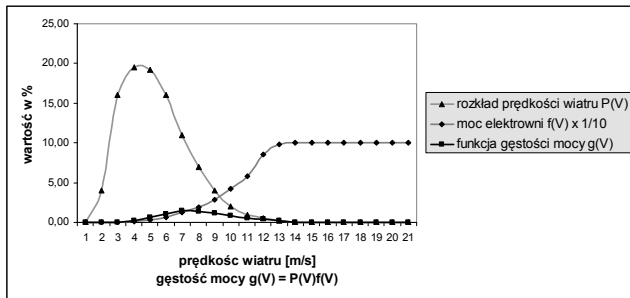


Rys. 2. Modelowane rozkłady prędkości wiatru ze wszystkich kierunków dla różnych wysokości n.p.t.

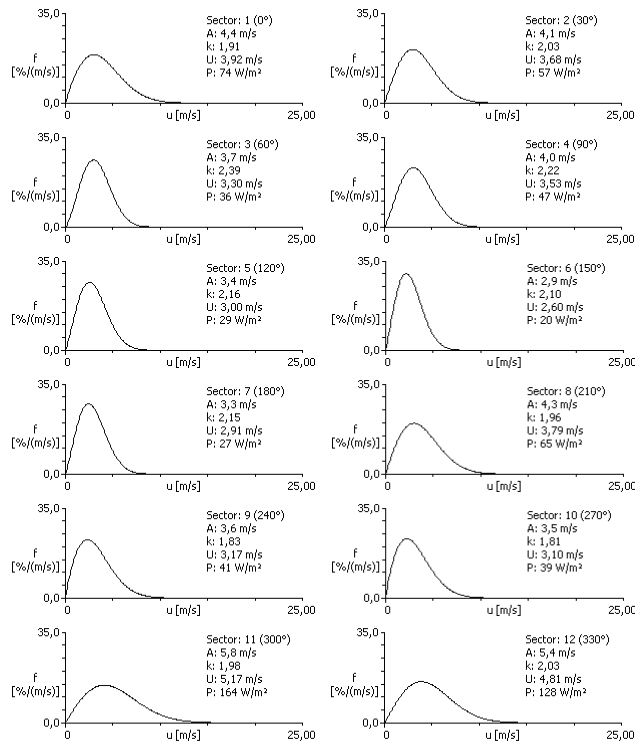
Na rys 3 pokazano modelowane rozkłady prędkości wiatru w miejscu lokalizacji zespołu siłowni wiatrowych ($50^{\circ}49'14,15''$ N, $19^{\circ}07'01,64''$ E) na wysokości 30m n.p.t. Na rys. 4. pokazano wykres gęstości mocy z uwzględnieniem charakterystyki elektrowni 10kW [8].



Rys. 3. Modelowane rozkłady prędkości wiatru w miejscu lokalizacji elektrowni na wysokości 30m n.p.t.; kolorem czarnym zaznaczono częstość wiatru z określonego kierunku; kolorem szarym zaznaczono udział procentowy wiatru z danego kierunku w zasobach energetycznych



Rys. 4. Wykres funkcji gęstości mocy z uwzględnieniem charakterystyki elektrowni wiatrowej 10kW



Rys. 5. Modelowane rozkłady prędkości wiatru w miejscach lokalizacji elektrowni z poszczególnych sektorów na wysokości 30 metrów n.p.t.; A, k – parametry rozkładu, U – średnia prędkość wiatru, P – gęstość mocy

Na rys. 5 pokazano wyliczone za pomocą oprogramowania: procentowy udział wiatru w danym sektorze, procentowy udział danego sektora w zasobach energetycznych wiatru, dobrane współczynniki rozkładu Weibulla oraz średnią estymowaną prędkość wiatru i estymowaną gęstość mocy dla podanej lokalizacji zespołu elektrowni.

Wnioski

Wyniki uzyskane z modelu numerycznego WAsP, szczególnie uzyskane wartości gęstości mocy z uwzględnieniem charakterystyki elektrowni pokazane na

rys. 4 (kilka procent mocy znamionowej) oraz wartości gęstości mocy wiatru z różnych kierunków na rys. 5, świadczą o skrajnie niekorzystnych warunkach wiatrowych w rozpatrywanym miejscu lokalizacji. Należy zwrócić uwagę, że model WAsP przewidziany jest zasadniczo do modelowania warunków wiatrowych w terenie otwartym z niewielką ilością łatwych do opisanego przeszkód terenowych. Miejsce posadowienia elektrowni znajduje się w terenie zurbanizowanym (w zasadzie w centrum miasta) dlatego wyniki uzyskane z modelu mogą odbiegać w znacznym stopniu od rzeczywistych wartości. W związku z tym przeprowadzona zostanie weryfikacja otrzymanych wyników poprzez wykonanie rocznego cyklu pomiarowego.

Przy planowaniu i projektowaniu siłowni wiatrowych pamiętać należy, że można wykorzystać tylko część energii wiatru, której wartość wynika z różnicy prędkości wiatru przed i za turbiną w trzeciej potędze oraz z gęstości powietrza. Uwzględnić należy również straty występujące przy zamianie energii mechanicznej w elektryczną, a także fakt, że turbina wiatrowa ma ograniczony zakres wykorzystywania energii wiatru określony przez prędkość rozruchu oraz prędkość wyłączenia (od około 4m/s do 25m/s, dla jednostek o pionowej osi obrotu od około 2m/s). Na spadek wydajności wpływają również przerwy remontowe i konserwacyjne. W rezultacie tylko niewielka część energii niesionej przez wiatr może być zamieniona w energię użyteczną.

LITERATURA

- [1] Kożuchowski K. (red.): *Meteorologia i klimatologia*, (2012), PWN, Warszawa
- [2] Lorenc H.: *Struktura i zasoby energetyczne wiatru w Polsce*, (1996), Materiały Badawcze IMiGW, Seria: Meteorologia - 25, Warszawa
- [3] Jąderko A., Kowalewski M. K.: *Metody wyznaczania energii wiatru*, Konferencja Naukowa „Europejski Wymiar Bezpieczeństwa Energetycznego Polski, a Ochrona Środowiska”, (2014), Poznań
- [4] Germanischer Lloyd Industrial Services GmbH, *Guideline for the Certification of Wind Turbines*, (2010), Hamburg - Germany
- [5] Duraczyński M.: *Badanie i analiza energii wiatru dla potrzeb energetyki w Polsce Południowo – Wschodniej*, Rozprawa doktorska, (2013), AGH-Kraków
- [6] <http://www.wasp.dk> [dostęp: 10.09.2014]
- [7] Flaszka J., Jąderko A., Popenda A.: *Kogeneracja (CHP) - szansa rozwoju elektrowni prosumenckich*, (2013), „Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne INiME KOMEL” 2013, Nr 2/2013 (99), ss. 293-297
- [8] Lubośny Z.: *Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym*, (2013), WNT, Warszawa

Autorzy:

dr inż. Andrzej Jąderko, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, e-mail: aj@el.pcz.czest.pl
mgr inż. Michał K. Kowalewski, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Monitoringu Klimatu Polski, ul Podleśna 61, 01-673 Warszawa, e-mail: michal.kowalewski@imgw.pl