

Model matematyczny strugi wiatru o różnych poziomach turbulencji działającej na turbinę wiatrową o pionowej osi obrotu (VAWT)

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia dotyczące strumienia wiatru, od którego zależy skuteczność energetyczna każdej turbiny wiatrowej. Z uwagi na dużą niestabilność prędkości wiatru na terenie Polski przyjęto do analizy strumień wiatru silnozmiennego (burzliwego). Składowe wielkości prędkości wiatru silnozmiennego dotyczą średniej prędkości strumienia wiatru oraz składowej turbulentnej. Przedstawiono metodykę wyznaczania zależności względnej intensywności turbulencji dla różnych średnich wartości prędkości strumienia wiatru. Ponadto, dla przyjętych przykładowo wielkości gęstości widma mocy silnozmiennego wiatru, wyniki obliczeniowe przedstawiono w formie tabelarycznej.

Abstract. The article presents selected issues regarding the wind stream, which determines the energy efficiency of each wind turbine. Due to the high instability of wind speed in Poland, a strongly variable (turbulent) wind stream was adopted for analysis. The components of the strongly variable wind speed concern the average speed of the wind stream and the turbulent component. The methodology for determining the relative intensity of turbulence for various average values of wind stream speed is presented. Moreover, for the assumed values of the power spectrum density of strongly variable wind as an example, the computational results are presented in tabular form. (**Mathematical model of a wind stream with different levels of turbulence acting on a vertical axis wind turbine VAWT**)

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa o pionowej osi obrotu, struga wiatru, model matematyczny turbulencji

Keywords: vertical axis wind turbine, stream of wind, mathematical model of the turbulence

Wstęp

Wyczerpywanie się organicznych zasobów paliw kopalnych oraz narastające problemy globalnego ocieplenia wynikające z emisji gazów cieplarnianych powodują potrzebę stosowania odnawialnych źródeł energii z wykorzystaniem między innymi energii wiatru. Polska nie należy do grupy państw, w których energia wiatru jest szeroko wykorzystywana w wytwarzaniu energii elektrycznej, niemniej w ostatnim czasie występuje zwiększone zainteresowanie zastosowaniem i rozwojem energetyki wiatrowej, w tym nowych rozwiązań konstrukcyjnych [1].

Pomimo, że w Polsce dobre warunki wiatrowe istnieją na niewielkim obszarze (głównie nadmorskim, a także na Suwalszczyźnie, środkowej Wielkopolsce, Mazowszu, Pogórzu Dynowskim) [2], mała energetyka wiatrowa podlega szybkiemu rozwojowi. Wiatr o określonej prędkości, wiejący przez dużą część roku, jest podstawowym warunkiem ekonomicznym uzasadniającym budowę komercyjnych farm wiatrowych. Jednak energia uzyskana z wiatru poprzez instalowanie małych elektrowni wiatrowych zużywana na potrzeby własne obniża znacząco koszty przesyłu energii oraz koszty eksploatacyjne obiektów, nawet w regionach o słabych warunkach wiatrowych. Właściciele budynków mieszkalnych oraz gospodarstw rolnych inwestują w elektrownie wiatrowe pomimo niekorzystnych do niedawna uwarunkowań prawnych i braku spójnego systemu dotacji państwowych. Na szczęście, uchwalona 02 lutego 2015 r. przez Sejm RP, Ustawa o odnawialnych źródłach energii w sposób zasadniczy zmieniła pozycję prosumentów na rynku energii elektrycznej w kraju. Dotyczy to szczególnie prosumentów na poziomie mikroźródeł, tj. źródeł o mocy do 50 kW.

Budowa prosumenckich mikroelektrowni wiatrowych doskonale wpisuje się w przedstawioną 28 listopada 2018 r. przez Komisję Europejską długoterminową strategiczną wizję dobrze prosperującej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki do roku 2050 - 28/11/2018 - COM (2018) 773 – Czysta planeta dla wszystkich – europejska długoterminowa wizja strategiczna dobrze prosperującej, nowoczesnej, konkurencyjnej i neutralnej dla klimatu gospodarki. Powyższy dokument

obejmuje: długoterminową strategię na rzecz redukcji emisji gazów cieplarnianych, transformację gospodarczą, transformację przemysłową oraz transformację społeczną.

Obecnie można zaobserwować kilka głównych kierunków rozwoju energetyki wiatrowej – podnoszenie efektywności, obniżanie kosztów inwestycji, podnoszenie sprawności pojedynczej elektrowni wiatrowej. Wynika to z prób coraz większego rozpowszechnienia tego źródła energii oraz dostosowania produktów w postaci elektrowni wiatrowych do zróżnicowanych potrzeb. Wciąż nierozwiązany problem ze zmiennością prędkości wiatru oraz faktem, że jego wykorzystanie jest opłacalne jedynie przez pewną część roku (zależnie od umiejscowienia elektrowni wiatrowej okres ten jest dłuższy lub krótszy) powoduje poszukiwania efektywnych rozwiązań w konstruowaniu i eksploatacji coraz bardziej popularnych małych elektrowni wiatrowych.

Potencjał energii wiatru na większości terenów Polski charakteryzuje się niewysoką, a wręcz małą średnioroczną prędkością strumienia wiatru na poziomie 3-4 m/s [3]. Ponadto strumień wiatru, zwłaszcza na małych wysokościach do kilkunastu metrów, charakteryzuje się właściwościami niekorzystnymi dla pracy turbin wiatrowych małej mocy, takimi jak niestabilne podmuchy, częsta zmiana kierunku oraz turbulencja. W takich warunkach, co wynika z praktyki, relatywnie dobrą efektywnością charakteryzują się elektrownie wiatrowe małej mocy jako autonomiczne źródła energii elektrycznej. Dla takich zastosowań celowe jest używanie elektrowni wiatrowych z turbinami o pionowej osi obrotu (VAWT – Vertical Axis Wind Turbine). Elektrownie wiatrowe małej mocy z turbinami o pionowej osi obrotu posiadają w stosunku do elektrowni wiatrowych o innych konstrukcjach istotne zalety, między innymi: niezależność od często zmieniającego się kierunku wiatru, proste i niezawodne eksploatacyjnie konstrukcje dzięki braku przekładni, niski poziom hałasu [4].

Podczas projektowania turbiny wiatrowej o pionowej osi obrotu niezbędne jest przeprowadzenie badań symulacyjnych modelu pracy turbiny dla rzeczywistych parametrów wiatru [4]. Istotnym elementem takiego modelu jest model matematyczny strugi wiatru z zadanymi wartościami średniej prędkości wiatru i zadanymi średnimi

poziomami turbulencjami. W tym celu opracowano model matematyczny silnozmiennego strugi wiatru z parametrami zbliżonymi do rzeczywistych oraz model matematyczny do badań symulacyjnych pracy turbiny VAWT z możliwością zmiany średnich wartości prędkości wiatru i zmiany intensywności (poziomów) turbulencji.

Modelowanie średniej prędkości wiatru

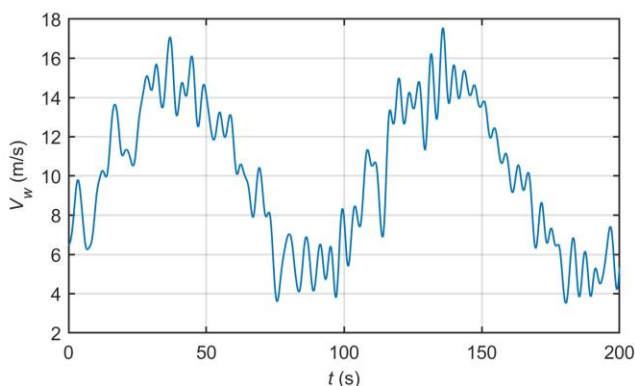
Silnozmienna prędkość wiatru może być opisana jako suma średniej prędkości wiatru oraz turbulentnej składowej prędkości wiatru w zależności od czasu następującą zależnością:

$$(1) \quad v(t) = V_{sr} + \tilde{v}(t),$$

gdzie: V_{sr} – średnia prędkość wiatru, $\tilde{v}(t)$ – turbulentna składowa prędkości wiatru.

Składowe równania (1) można określić różnymi metodami w zależności od zakładanego poziomu dokładności.

Przykładowy przebieg silnozmiennego wiatru o średniej prędkości wynoszącej 10 m/s oraz wysokim poziomie turbulencji pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg prędkości silnozmiennego wiatru o wysokim poziomie turbulencji

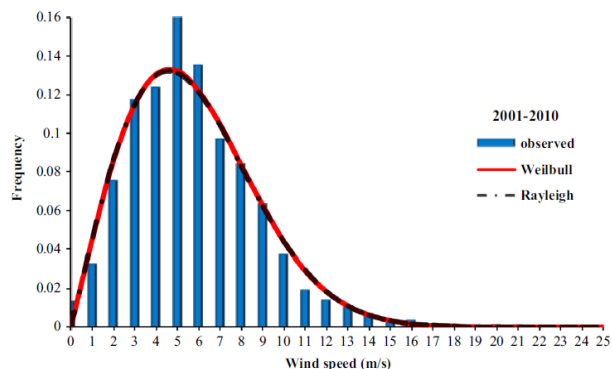
Średnia prędkość wiatru dla konkretnej miejscowości lub przyjętego rejonu wyznaczana jest na podstawie badań statystycznych i informacji o średniej 10-minutowej prędkości wiatru V_i w badanym okresie z podaniem dnia, miesiąca i roku. Uzyskane informacje opracowywane są statystycznie, zgodnie z potrzebami przyjętego algorytmu do modelowania średniej prędkości wiatru.

Otrzymane dane można przedstawić w postaci histogramu prędkości wiatru pokazanego przykładowo na rysunku 2. Dla opracowania histogramu częstości (prawdopodobieństwa) występowania danej prędkości wiatru V_i wyznacza się zależność:

$$(2) \quad f(V_i) = \frac{n_i}{N},$$

gdzie n_i – ilość wartości prędkości wiatru V_i w ciągu badanego okresu, N – ilość pomiarów prędkości wiatru w ciągu badanego okresu.

Średnia 10-minutowa prędkość wiatru określana jest z reguły liczbą całkowitą, przy czym zakłada się przedziały mniejsze i większe od danej liczby całkowitej. Przykładowo, dla przyjęcia przedziału zmniejszającego i zwiększającego wynoszącego 0,5 m/s wskazana w histogramie prędkość wiatru $V_i = 4$ m/s obejmuje przedział prędkości wiatru 3,5-4,5 m/s.



Rys. 2. Przykładowy histogram wiatru w przyjętym okresie pomiarów prędkości wiatru (2001-2010) wraz z przebiegiem funkcji rozkładu prawdopodobieństwa Weibull'a i Rayleigh'a

Z doświadczenia w zakresie opracowywania histogramu wiatru wynika, że histogramy rozkładu prędkości wiatru najlepiej opisywane są funkcjami rozkładu prawdopodobieństwa Weibull'a i Rayleigh'a (rys. 2) [5]. Powyższe funkcje rozkładu prawdopodobieństwa pozwalają na prognozowanie średniej prędkości wiatru w przyjętym okresie analizowania. W postaci ogólnej funkcja rozkładu prawdopodobieństwa Weibull'a jest dokładniejsza w odniesieniu do otrzymywanych pomiarowo prędkości wiatru, natomiast funkcja rozkładu prawdopodobieństwa Rayleigh'a dokładniej opisuje bardzo niskie i zbliżone do zera prędkości wiatru.

Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa Weibull'a określana jest następującą zależnością [6]:

$$(3) \quad f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right],$$

gdzie: $f(V)$ – prawdopodobieństwo występowania w przyjętym okresie danej prędkości wiatru V (dla $V < 0$ $f(V) = 0$), c ($c > 1$) – parametr skali, m/s, k ($k > 0$) – bezwymiarowy wskaźnik podziału.

Aby określić parametry wskazanej powyżej funkcji rozkładu prawdopodobieństwa, należy znaleźć średnie prędkości wiatru oraz intensywność występowania w badanym okresie z N punktami obserwacji co określają poniższe zależności:

$$(4) \quad V_{sr} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i,$$

$$(5) \quad \sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - V_{sr})^2.$$

Parametry funkcji rozkładu prawdopodobieństwa można wyznaczyć następującymi zależnościami [7]:

$$(6) \quad k = \left(\frac{\sigma}{V_{sr}} \right)^{-1,086} \quad (1 \leq k \leq 10),$$

$$(7) \quad c = \frac{V_{sr}}{\Gamma(1-1/k)},$$

gdzie: Γ – funkcja gamma określona poniższą zależnością:

$$(8) \quad \Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du.$$

Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa Rayleigh'a jest w pewnym stopniu uproszczoną funkcją rozkładu prawdopodobieństwa Weibull'a, dla której wskaźnik kształtu podziału ma stałą wartość $k = 2$. Na rysunku 2 widać, że funkcja rozkładu prawdopodobieństwa Weibull'a dokładniej opisuje histogram z wyjątkiem prędkości wiatru bliskiej zeru.

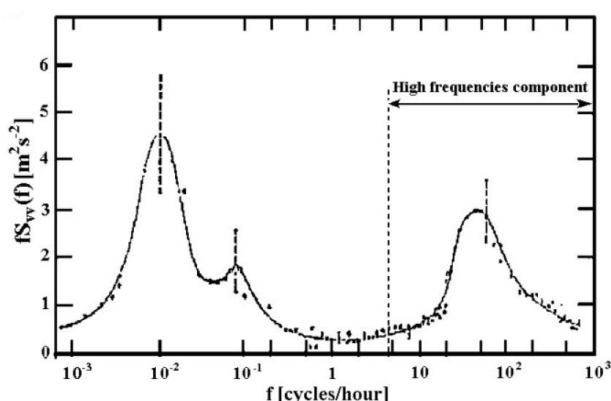
Funkcję rozkładu prawdopodobieństwa z obliczonymi dla danego miejsca parametrami można wykorzystać dla określania ilości godzin w roku, w których występuje dana średnia prędkość wiatru V_1 . Dla okresu jednorocznego ilość godzin, w którym występuje dana średnia prędkość wiatru można wyznaczyć następującą zależnością:

$$(9) \quad t_1 = f(V_1) \cdot T,$$

gdzie: $T = 8760$ godz. (ilość godzin w roku).

Modelowanie składowej turbulentnej prędkości wiatru

Składowa turbulentna prędkość wiatru w równaniu (1) charakteryzuje się przypadkowymi fluktuacjami względem prędkości średniej, a także względem czasu. Składową turbulentną w ogólnym przypadku można rozpatrywać jako stacjonarny proces Gaussa [8]. Opis czasowej zależności prędkości wiatru może być zrealizowany w obszarze czasowym i spektralnym. Jednym z często przyjmowanych do analizy opisów spektralnych zmian prędkości wiatru jest spektrum Van der Hovena [9], które daje pełny opis składowych energii turbulentności. Model widmowy mocy wiatru podany przez Van der Hovena wskazuje, że gęstość widmowa mocy wiatru $S_{vv}(f)$ ma wyraźne maksimum w zakresie małej i dużej częstotliwości. W oparciu o gęstość widmową mocy wiatru $S_{vv}(f)$ można matematycznie opisać średnio i długotrwałe fluktuacje prędkości wiatru, a także spektralny zakres składowych turbulentności (rys. 3). Z powodów opisanych w [10] model Van der Hovena stosowany jest jedynie do modelowania przypadków występowania niskiej częstotliwości turbulentności.



Rys. 3. Model widmowy mocy wiatru według Van der Hovena [10]

Do modelowania przypadków występowania wysokiej częstotliwości turbulentności wykorzystywana jest gęstość widmowa mocy wiatru zgodnie z zależnością opracowaną przez von Karmana [10], którą przedstawia następująca zależność:

$$(10) \quad S_{vv}(\omega) = \frac{0,475 \sigma^2 \frac{X_L}{V_{sr}}}{\left[1 + \left(\frac{\omega X_L}{V_{sr}} \right)^2 \right]^{5/6}},$$

gdzie: σ – intensywność turbulencji, X_L – długość silnozmiennnej skali, $\omega = 2\pi f$ – pulsacja.

Wystarczającą dokładnością charakteryzuje się analiza przyjęta w modelu Kaimala [11], zgodnie z którą gęstość widmowa mocy wiatru w całym zakresie częstotliwości zależy od turbulencji i jest określona następującą zależnością:

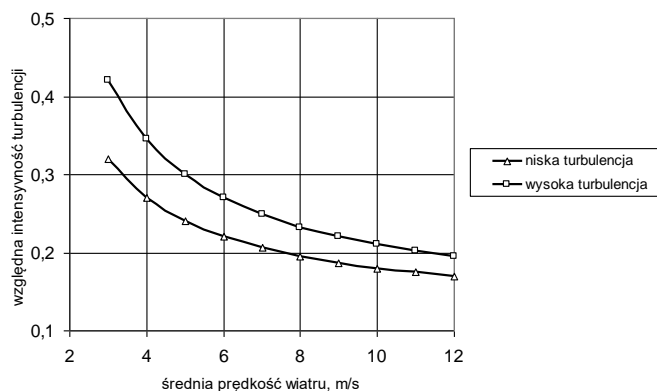
$$(11) \quad \frac{f S_{vv}(f)}{\sigma^2} = \frac{\frac{f X_L}{V_{sr}}}{\left(1 + 1,5 \frac{f X_L}{V_{sr}} \right)^{5/3}}.$$

Względną intensywność turbulencji wiatru analitycznie można opisać następującą zależnością otrzymaną w wyniku przeprowadzonych badań [12]:

$$(12) \quad I_w = \frac{\sigma}{V_{sr}} = \frac{I^* (a + 15/V_{sr})}{a + I},$$

gdzie: I^* – współczynnik dla wysokiej turbulencji wynoszący 0,18 oraz 0,16 dla niskiej turbulencji, a – współczynnik stały o wartości 2 dla niskiej turbulencji oraz o wartości 3 dla wysokiej turbulencji.

Obliczone wartości względnych intensywności turbulencji dla wiatrów o różnych średnich prędkościach w oparciu o zależność (12) przedstawiono na rysunku 4 jako zależność funkcyjną względnych intensywności turbulencji od średnich wartości prędkości wiatru.



Rys. 4. Wielkości względne intensywności turbulencji dla wiatrów o różnych poziomach ich średniej prędkości

Dla danej średniej prędkości wiatru V_{sr} i poziomu turbulencji (niskiego lub wysokiego) z zależności (12) można określić wartość σ , którą następnie można uwzględnić w zależności (11). Długość silnozmiennnej skali powinna być przyjmowana zgodnie z ukształtowaniem terenu, przy czym dla terenu pofałdowanego długość zmiennej skali przyjmowana jest w przedziale $X_L = 500$ - 600 m, a dla terenu płaskiego długość zmiennej skali przyjmowana jest w przedziale $X_L = 100$ - 200 m [10].

Aby otrzymać zależność określającą prędkości składowej turbulentnej strugi wiatru w wąskim paśmie częstotliwości Δf_i , funkcja widmowej gęstości $S_{vv}(f)$ wyrażana jest jako funkcja sinus i cosinus składników z losowo wybraną fazą φ_i w przedziale od 0 do 2π dla centralnej częstotliwości f_i pasma Δf_i i określana jest następującą zależnością:

$$(13) \quad \tilde{v}_i(t) = A_i \sin(2\pi f_i t) + B_i \cos(2\pi f_i t).$$

W równaniu (13) amplitudy harmonicznym określone są następująco:

$$(14) \quad A_i = A_{0i} \sin(\varphi_i), \quad B_i = A_{0i} \cos(\varphi_i),$$

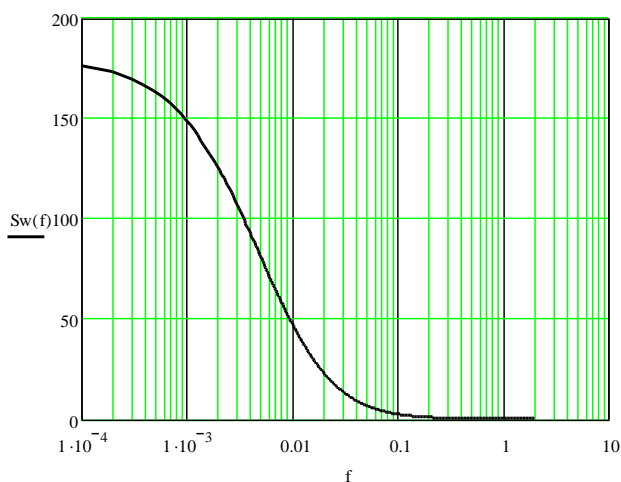
$$(15) \quad A_{0i} = \sqrt{\frac{I}{2} S_{vv}(f_i) \Delta f_i}.$$

Dla powyższych zależności, zgodnie z (1), model matematyczny szybkozmiennej prędkości wiatru przyjmuje następującą formę:

$$(16) \quad v(t) = V_{sr} + 2 \sum_{i=1}^m [A_i \sin(2\pi f_i t) + B_i \cos(2\pi f_i t)],$$

gdzie: m – liczba wydzielonych pasm częstotliwości Δf_i , dla których jest przyjęta funkcja widmowej gęstości $S_{vv}(f)$.

Dla wyznaczenia parametrów modeli matematycznych silnozmiennego wiatru opracowano program komputerowy w środowisku Mathcad, który pozwala obliczyć wartości współczynników A_i , B_i dla różnych pasm częstotliwości Δf_i określonych dla średnich prędkości wiatru. Z przeprowadzonych badań dostępnych w literaturze wynika, że aby wyznaczyć pełną gamę widmową silnozmiennego wiatru, wystarczy przyjąć 8-10 pasm zakresu częstotliwości. Przykładowo został opracowany model matematyczny silnozmiennego wiatru o średniej prędkości $V_{sr} = 5$ m/s oraz wysokiego poziomu turbulencji występującego na terenie z długością zmiennej skali wynoszącą $X_L = 400$ m. Dla powyżej przyjętych założeń z rysunku 4 otrzymujemy wartość $I_w = 0,3$ a następnie z zależności (12) wartość $\sigma = I_w V_{sr} = 1,5$ m/s. Obliczona na podstawie tych danych według zależności (11) gęstość widmową mocy wiatru pokazano na rysunku 5.



Rys. 5. Gęstość widmowa mocy silnozmiennego wiatru o średniej prędkości $V_{sr} = 5$ m/s oraz wysokim poziomie turbulencji

Dla przeprowadzenia symulacji w zakresie 10 min wystarczy ograniczyć częstotliwość po niskiej stronie do wartości $f = 1 \cdot 10^{-3}$ Hz. Dla przyjętych 10 wartości częstotliwością w zakresie $f_j = 0,001-0,5$ Hz oraz obliczone dla tych wartości gęstości widmowej mocy silnozmiennego wiatru $S_{vv}(f_j)$ przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1 Wyniki obliczeń parametrów harmonicznym turbulentnej składowej prędkości wiatru dla rozpatrywanego przykładu

f_j Hz	0,001	0,002	0,003	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,3	0,5
$S_{vv}(f)$	149,0	125,8	107,8	82,2	48,4	23,4	7,03	2,50	0,438	0,190
Δf_i Hz	0,001	0,001	0,002	0,005	0,01	0,03	0,05	0,2	0,2	
$S_{vv}(f)$	137,4	116,8	95,0	65,3	35,9	15,2	4,77	1,471	0,314	
f_i Hz	0,00147	0,00247	0,00389	0,00698	0,014	0,028	0,065	0,141	0,368	
A_{0i} m/s	0,262	0,242	0,308	0,404	0,424	0,478	0,345	0,384	0,177	

Pomiędzy częstotliwościami f_j znajduje się $n = 9$ pasm częstotliwości Δf_i . Dla każdego z nich otrzymano średnią wartość gęstości widmowej mocy burzliwego wiatru $S_{vv}(f_i) = 0,5 [S_{vv}(f_j) + S_{vv}(f_{j+1})]$, a następnie za pomocą zależności (11) – częstotliwość centralną f_i . W ostatnim wierszu tabeli 1 podano obliczone wartości A_{0i} według zależności (15), które są niezbędne do wyliczenia amplitud harmonicznym turbulentnej składowej prędkości wiatru A_i , B_i wyznaczonych zależnością (14).

Na rysunku 6 pokazano przykładową elektrownię wiatrową o pionowej osi obrotu (VAWT) i mocy nominalnej 10 kW umieszczoną na dachu budynku F Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej.



Rys. 6. Elektrownia wiatrowa o pionowej osi obrotu (VAWT) i mocy nominalnej 10 kW na dachu budynku F Wydziału Elektrycznego Politechniki Częstochowskiej

Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodykę wyznaczania zależności względnej intensywności turbulencji dla różnych średnich wartości prędkości strumienia wiatru. Dla przyjętych wielkości gęstości widma mocy silnozmiennego wiatru wyniki obliczeniowe przedstawiono w formie tabelarycznej. Modele matematyczne silnozmiennego wiatru mają zastosowanie w symulacji komputerowej pracy turbiny wiatrowej. Ponieważ przebieg prędkości wiatru otrzymany z modelu jest zbliżony z dużym prawdopodobieństwem do rzeczywistego przebiegu,

dlatego na tej podstawie możliwe jest opracowywanie algorytmów automatycznego sterowania pracą elektrowni wiatrowej w celu uzyskania maksymalnej ilości energii. W oparciu o opracowany model matematyczny możliwe jest również opracowanie zastępczego modelu fizycznego będącego symulatorem pracy turbiny wiatrowej, która pracuje przy silnozmiennej prędkości wiatru. Model fizyczny może być wykonany jako stanowisko badawcze z silnikiem elektrycznym sterowanym przez przekształtnik energoelektroniczny z mikrokontrolerem, który napędza odpowiednio dobrany wentylator wraz z konstrukcją do kierowania strugi powietrza.

Autorzy: dr inż. Andrzej Jąderko, e-mail: andrzej.jaderko@pcz.pl, Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa; mgr inż. Luiza Rakowska, e-mail: luiza.rakowska@pcz.pl, Politechnika Częstochowska, Szkoła Doktorska, ul. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa

LITERATURA

- [1] Michalak P., Zimny J., Wind energy development in the world, Europe and Poland from 1995 to 2009, current status and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (2011), No. 15, 2330–2341
- [2] Dygulska A., Perlińska E. Mapa wietrzności Polski. Projekt POKL.04.01.02.00-046/11-00, Akademia Centrum Czystej Energii, Słupsk, (2015)
- [3] Zaporowski B., Przyszłościowe technologie wytwarzania energii elektrycznej w Polsce, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2015), nr 2, 187–192
- [4] Simic Z., Havelka J. G., Vrhovcak M. B., Small wind turbines – a unique segment of the wind power market, *Renewable Energy*, Vol. 50 (2013), 1027–1036
- [5] Prasad A., Ziogas P., Manias S., An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 6 (1991), No. 1, 83–92
- [6] Kwon S. D., Uncertainty analysis of wind energy potential assessment, *Applied Energy*, Vol. 87 (2010), No. 3, 856-865
- [7] Młodzikowski P., Milczarek A., Malinowski M., Analiza pracy małej elektrowni wiatrowej – praca autonomiczna oraz przy podłączeniu do sieci elektroenergetycznej, *Politechnika Warszawska, Prace Instytutu Elektrotechniki*, (2011), Zeszyt 249, 167–179
- [8] Pishgar-Komleh S. H., Keyhani A., Sefeedpari P., Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooch county of Iran), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 42 (2015), 313-322
- [9] Neammanee B., Sirisumrannukul S., Chatratana S., Development of a wind turbine simulator for wind generator testing, *International Energy Journal*, (2007) No. 8, 21–28
- [10] Nichita C., Luca D., Dayko B., Ceanga E., Largeband simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 17 (2002), No. 4, 523–529
- [11] Eisenhut C., Krug F., Wind-turbine model for system simulations near cut-in wind speed, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 22 (2007), No. 2, 414–42
- [12] Trapp J. G., Farret F. A., Fernandes F. T., Correa L. C., Variable speed wind turbine using the squirrel cage induction generator with reduced converter power rating for stand-alone energy systems, *10th International Conference on Industry Applications*, 5-7 November 2012, Fortaleza, Brazil, 1–8