

OCENA ZASOBÓW ENERGII WIATRU NA POTRZEBY MAŁEJ ENERGETYKI WIATROWEJ

STRESZCZENIE

Wykorzystanie odnawialnych zasobów energetycznych ma, przy pewnych ograniczeniach, niewątpliwe walory środowiskowe. Jedną z popularniejszych technologii wykorzystywanych przez odbiorców indywidualnych są elektrownie wiatrowe małych mocy (do kilku-kilkunastu kilowatów). Charakteryzują się one prostą konstrukcją, coraz bardziej przystępną ceną oraz dobrymi parametrami technicznymi, co czyni je interesującym źródłem energii dla inwestorów indywidualnych.

Słowa kluczowe: energia wiatrowa, elektrownie przydomowe

WIND ENERGY RESOURCE ASSESSMENT FOR THE NEEDS OF SMALL WIND ENERGY

Use of renewable energy resources is, under certain restrictions, outstanding environmental qualities. One of the most popular technologies used by individual customers are small wind power (up to several-dozen kW). They are characterized by simple construction, more affordable price and good technical parameters, which makes them an interesting source of energy for individual investors.

Keywords: wind energy, small wind turbines

1. WSTĘP

Dokładna ocena warunków wiatrowych w danej lokalizacji jest jednym z wymogów określenia opłacalności budowy elektrowni wiatrowej. W przypadku inwestorów budujących elektrownie wiatrowe o małej mocy (rzędu kilku kW), wykorzystanie profesjonalnego sprzętu i oprogramowania dla energetyki wiatrowej jest z reguły zbyt kosztowne. Można jednak z powodzeniem, zachowując dobrą dokładność, skorzystać z tańszych i prostszych metod i narzędzi.

Rosnąca niezawodność i konkurencyjne ceny elementów elektronicznych powodują, iż można obecnie zbudować tanią stację meteorologiczną o dobrych parametrach, pozwalającą na pomiary m.in. prędkości i kierunku wiatru. Dane uzyskane z takiej stacji można z powodzeniem wykorzystać do przeprowadzenia uproszczonej analizy warunków wiatrowych w najbliższym otoczeniu miejsca pomiarów. Nie wymaga ona kosztownego specjalistycznego oprogramowania, a jej dokładność będzie wystarczająca do zastosowania w energetyce wiatrowej małych mocy. Metodyka prowadzenia takiej analizy została omówiona w [4, 5], jednak bez szerszego przedstawienia ze względu na zastosowanie w małej energetyce wiatrowej.

W artykule zostanie przedstawiony przykład analizy danych zebranych przez stację meteorologiczną lotniska w Gdańsku Rębiechowie. Na tej podstawie określone zostaną parametry energetyczne wiatru w badanej lokalizacji oraz produkcja energii elektrycznej przez dwie typowe małe elektrownie wiatrowe.

2. PROWADZENIE POMIARÓW WIATRU

Dane pomiarowe są zbierane przez cały okres prowadzenia obserwacji w stacji pomiarowej (loggerze) zamontowanej na specjalnym maszcie pomiarowym. Maszt pomiarowy powinien być umieszczony w miejscu usytuowania planowanej elektrowni wiatrowej.

Do pomiarów prędkości wiatru stosuje się anemometry czasowe. Na potrzeby profesjonalnej energetyki wiatrowej na maszcie pomiarowym montuje się zwykle 2–3 anemometry na różnych wysokościach. Poza nimi montuje się 1–2 czujniki kierunku wiatru. Wyposażeniem dodatkowym są czujniki temperatury (dla korekty gęstości powietrza). Wysokość zamocowania jednego z czujników prędkości i kierunku wiatru powinna być równa wysokości osi wirnika planowanej turbiny. Na tej podstawie można określić rzeczywiste warunki pracy przyszłej elektrowni, eliminując możliwość popełnienia błędu związanego z ekstrapolacją danych na inne wysokości.

Pomiary powinny być prowadzone ciągle przez co najmniej jeden rok. Wskazane jest wydłużenie czasu pomiarów, co zmniejsza ryzyko błędów związanych np. z trafieniem w rok o dużej, w porównaniu do średniej, wietrzności, co spowoduje przeszacowanie dostępnych zasobów energetycznych.

W przypadku małych inwestycji w przydomowe elektrownie wiatrowe nie jest konieczne stosowanie tak profesjonalnego sprzętu. Wystarczający jest prosty logger oraz jeden czujnik prędkości i kierunku wiatru i ewentualnie dodatkowo czujnik temperatury.

3. HISTOGRAM ROZKŁADU PRĘDKOŚCI WIATRU

Podstawowym przedmiotem analizy jest rozkład prędkości wiatru w ciągu roku. Na jego podstawie wyznacza się procentowy czas występowania wiatru o określonych prędkościach w okresie roku, a w efekcie i produkcję energii przez elektrownię wiatrową. Aby właściwie zobrazować rozkład prędkości wiatru, najłatwiej posłużyć się histogramem. Na wstępie należy uporządkować i pogrupować dane pomiarowe. Kryterium podziału danych na kolejne grupy (klasy) jest zmierzona wartość prędkości wiatru. Różnica między prędkością dolną ($v_{\min}$) i górną ($v_{\max}$) w przedziale nazywa się szerokością klasy. Istnieje szereg metod wyboru szeroko-

* Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

kości klas [1, 3] opartych zarówno na ilości posiadanych danych pomiarowych, jak i na ich rozkładzie. Z reguły ustala się jednakowe szerokości przedziałów klasowych, co znacznie ułatwia to analizę danych oraz poprawia jej przejrzystość. W przypadku pomiarów prędkości wiatru, przyjmuje się najczęściej [4, 5] szerokość przedziałów klasowych równą $\Delta v = 1$ m/s.

Po podziale całego zakresu zmierzonych wartości na przedziały, grupuje się dane pomiarowe, dzięki czemu można określić liczebność klas n_i , czyli ilość wystąpień prędkości wiatru w każdej, i -tej klasie. Z pojęciem liczebności wiąże się częstość f_i , określona jako stosunek liczebności do ilości wszystkich danych pomiarowych:

$$f_i = \frac{n_i}{N}, [-] \quad (1)$$

Częstość f_i można interpretować jako prawdopodobieństwo wystąpienia wiatru w i -tym przedziale prędkości. Jeżeli odniesiemy to do podstawowego okresu pomiarowego (oznaczonego T), jakim jest jeden rok, to można wyznaczyć czas trwania (t_i) w ciągu jednego roku wiatru o prędkości średniej v_i w danym przedziale:

$$t(v = v_i) = t_i = f_i \cdot T = f_i \cdot 8760, [\text{h/rok}] \quad (2)$$

Liczebność skumulowana dla i -tego przedziału (n_{isk}) jest sumą liczebności od pierwszego przedziału do przedziału o numerze i :

$$n_{isk} = \sum_{i=1}^i n_i, [-] \quad (3)$$

Do liczebności skumulowanej można odnieść pojęcie częstości skumulowanej f_{isk} , która dla i -tego przedziału klasowego jest obliczana jako stosunek skumulowanej liczebności do całkowitej liczby pomiarów N :

$$f_{isk} = \frac{n_{isk}}{N}, [-] \quad (4)$$

Częstość skumulowana również ma swoją interpretację statystyczną. Można ją traktować jako prawdopodobieństwo wystąpienia wiatru o prędkościach niższych od górnej prędkości danego i -tego przedziału klasowego:

$$f_{isk} = \frac{n_{isk}}{N} \approx \frac{t(v < v_{i\max})}{T}, [-] \quad (5)$$

gdzie $v_{i\max}$ – górna prędkość w i -tym przedziale klasowym.

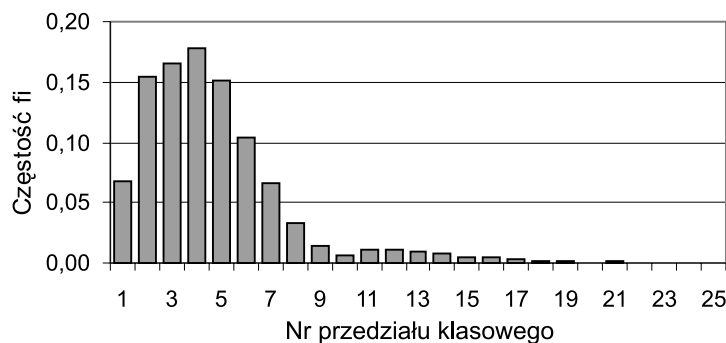
W niniejszym artykule do obliczeń wykorzystano dane zebrane przez stację meteorologiczną lotniska w Gdańsku Rębiechowie, która przesyła gromadzone pomiary w systemie depesz METAR, dostępnych także w sieci Internet [9]. Analizowana seria pomiarowa prędkości wiatru w okresie jednego roku (2004 r.) obejmuje $N = 16\,404$ pomiary.

W celu uporządkowania zebranych danych dla dalszej analizy sporządzono tabelę (tab. 1) w której zgrupowano rezultaty obliczeń wymienionych wcześniej wielkości.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń możliwe jest wykreślenie rozkładu empirycznego prędkości wiatru w formie histogramu (rys. 1). Jest on funkcją częstości prędkości wiatru dla poszczególnych przedziałów klasowych.

Tabela 1. Liczebności prób i częstości wiatru oraz czasy trwania wiatru w poszczególnych przedziałach

Nr przedziału klasowego	Przedział prędkości wiatru	Środek przedziału klasowego	Liczebność	Częstość	Czas trwania wiatru o prędkości w przedziale i	Liczebność skumulowana	Częstość skumulowana	Czas trwania wiatru o prędkości
i	Δv_i	v_i	n_i	f_i	t_i	n_{isk}	f_{isk}	$t(v < v_{i\max})$
$[-]$	$[\text{m/s}]$	$[\text{m/s}]$	$[-]$	$[-]$	$[\text{h/rok}]$	$[-]$	$[-]$	$[\text{h/rok}]$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0 do 1	0,5	1098	0,0669	586	1098	0,0669	586
2	1 do 2	1,5	2519	0,1536	1345	3617	0,2205	1932
3	2 do 3	2,5	2724	0,1661	1455	6341	0,3866	3386
4	3 do 4	3,5	2930	0,1786	1565	9271	0,5652	4951
5	4 do 5	4,5	2477	0,1510	1323	11748	0,7162	6274
6	5 do 6	5,5	1715	0,1045	916	13463	0,8207	7189
7	6 do 7	6,5	1090	0,0664	582	14553	0,8872	7772
8	7 do 8	7,5	544	0,0332	291	15097	0,9203	8062
9	8 do 9	8,5	242	0,0148	129	15339	0,9351	8191
10	9 do 10	9,5	101	0,0062	54	15440	0,9412	8245
11	10 do 11	10,5	186	0,0113	99	15626	0,9526	8345
12	11 do 12	11,5	178	0,0109	95	15804	0,9634	8440
13	12 do 13	12,5	150	0,0091	80	15954	0,9726	8520
14	13 do 14	13,5	128	0,0078	68	16082	0,9804	8588
15	14 do 15	14,5	81	0,0049	43	16163	0,9853	8631
16	15 do 16	15,5	89	0,0054	48	16252	0,9907	8679
17	16 do 17	16,5	39	0,0024	21	16291	0,9931	8700
18	17 do 18	17,5	27	0,0016	14	16318	0,9948	8714
19	18 do 19	18,5	29	0,0018	15	16347	0,9965	8730
20	19 do 20	19,5	11	0,0007	6	16358	0,9972	8735
21	20 do 21	20,5	22	0,0013	12	16380	0,9985	8747
22	21 do 22	21,5	11	0,0007	6	16391	0,9992	8753
23	22 do 23	22,5	8	0,0005	4	16399	0,9997	8757
24	23 do 24	23,5	5	0,0003	3	16404	1,0000	8760
25	24 do 25	24,5	0	0,0000	0	16404	1,0000	8760
SUMA:			16404	1,0000	8760			



Rys. 1. Histogram rozkładu częstości występowania wiatru w kolejnych przedziałach prędkości

Uzyskany histogram wskazuje, iż w rozpatrywanej lokalizacji przeważający udział mają wiatry o prędkościach w zakresie od 1 m/s do 6 m/s (przedziały od 2 do 6). Celem lepszego rozpoznania przydatności zasobów wiatru pod kątem ich energetycznego wykorzystania, należy określić podstawowe parametry energetyczne wiatru: prędkość średnią, moc i energię wiatru, dostępną w poszczególnych przedziałach klasowych. Na tej podstawie oblicza się całkowitą roczną energię wiatru.

4. ŚREDNIA PRĘDKOŚĆ WIATRU

Średnia prędkość wiatru wynika ściśle z jego rozkładu opisanego przez funkcję gęstości prawdopodobieństwa. Przedstawia ona rozłożenie całego prawdopodobieństwa (równego jedności) na wszystkie wartości, jakie przyjmuje badana prędkość wiatru. Przybliżeniem tej funkcji jest przedstawiony powyżej histogram. Korzystając z obliczeń przeprowadzonych przy wykreślaniu histogramu, można wyznaczyć średnią prędkość wiatru v_{sr} . Jest ona określona zależnością [5]:

$$v_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^k f_i v_i}{\sum_{i=1}^k f_i}, [\text{m/s}] \quad (6)$$

gdzie:

- k – liczba wszystkich przedziałów klasowych,
- v_i – środek i -tego przedziału klasowego.

Roczna prędkość średnia obliczona dla posiadanych danych pomiarowych na podstawie powyższego wzoru wynosi 4,216 m/s. W warunkach Polski [4] przyjmuje się, iż $v_{sr} > 4$ m/s kwalifikuje dany obszar jako korzystny dla energetyki wiatrowej, jakkolwiek elektrownie małej mocy są w stanie spożytkować wiatr o niższych prędkościach. Prędkość średnia nie jest jednak najważniejszym czynnikiem przesądzającym o przydatności, danego miejsca na inwestycje aeroenergetyczne. Wynika to z faktu, iż przy takiej samej wartości prędkości średniej rozkład prędkości wiatru może mieć różne kształty – różne będą udziały prędkości o niskich lub wysokich wartościach. Zasadnicza jest analiza wydajności energetycznej wiatru oraz produkcji energii przez konkretny typ elektrowni wiatrowej dla danych warunków wiatrowych.

5. MOC WIATRU

Moc wiatru traktowanego jako gaz o gęstości ρ przepływający przez powierzchnię S z prędkością v jest określona zależnością:

$$P = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}, [\text{W}] \quad (7)$$

W warunkach normalnych (temperatura 273 K, ciśnienie 10^5 Pa) gęstość powietrza wynosi: $\rho = 1,2759 \text{ kg/m}^3$. Obliczenia dla energetyki wiatrowej przeprowadza się dla temperatury 15°C i ciśnieniu 1013 hPa [1, 8] przy których $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$. Przyjmując przepływ powietrza przez powierzchnię jednostkową $S = 1 \text{ m}^2$, otrzymujemy zależność na moc jednostkową wiatru w i -tym przedziale prędkości:

$$P_i = \frac{\rho}{2} \cdot v_i^3 = 0,6125 \cdot v_i^3, [\text{W/m}^2] \quad (8)$$

Energię wiatru w przedziale w okresie jednego roku ($T = 8760$ h) można wyznaczyć z zależności:

$$E_i = P_i \cdot t_i = P_i \cdot f_i \cdot T, [\text{Wh}] \quad (10)$$

Mając dane z tabeli 1 oraz korzystając z powyższych zależności, można przeprowadzić obliczenia zasobów mocy i energii wiatru w miejscu przeprowadzonych pomiarów. Wyniki obliczeń przedstawia tabela 2.

Z przeprowadzonych obliczeń (tab. 2) wynika, iż w analizowanej lokalizacji w ciągu jednego roku przez powierzchnię 1 m^2 przepływa strumień wiatru niosący ze sobą energię 1362,41 kWh. Dominują wiatry o prędkościach w zakresie od 1 m/s do 6 m/s. Czas trwania wiatru w tym przedziale wynosi 6603 godziny rocznie, co stanowi 75% roku. Czas trwania wiatru o prędkościach od 10 do 25 m/s wynosi tutaj nieco ponad 500 godzin rocznie, jednak jego energia w tym przedziale to 887,40 kWh. Zatem przez około 5,7% czasu w roku wytworzone jest 65% całkowitej energii, co świadczy o dużej nierównomierności wytwarzania. Wynika to oczywiście z faktu iż energia wiatru rośnie w trzeciej potęgze prędkości, co widać w rezultatach obliczeń umieszczonych w kolumnie 7 tabeli 2. Wiatry o krótkim czasie trwania, ale o dużych prędkościach niosą porównywalną ilość energii jak wiatry o długim czasie trwania, lecz o małych prędkościach.

Tabela 2. Moc i energia wiatru

Nr przedziału klasowego	Środek przedziału	Moc jednostkowa wiatru	Liczebność	Częstość	Czas trwania wiatru w przedziale i	Energia w przedziale i	Energia skumulowana
i	v_i [m/s]	P_{wi} [W/m ²]	n_i [-]	f_i [-]	t_i [h/rok]	E_{wi} [kWh/rok]	E_{wisk} [kWh/rok]
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,5	0,08	1098	0,0669	586	0,04	0,04
2	1,5	2,07	2519	0,1536	1345	2,78	2,83
3	2,5	9,57	2724	0,1661	1455	13,92	16,75
4	3,5	26,26	2930	0,1786	1565	41,10	57,85
5	4,5	55,81	2477	0,1510	1323	73,84	131,69
6	5,5	101,90	1715	0,1045	916	93,34	225,04
7	6,5	168,21	1090	0,0664	582	97,90	322,93
8	7,5	258,40	544	0,0332	291	75,19	398,13
9	8,5	376,15	242	0,0148	129	48,52	446,65
10	9,5	525,14	101	0,0062	54	28,36	475,01
11	10,5	709,05	186	0,0113	99	70,20	545,20
12	11,5	931,54	178	0,0109	95	88,50	633,70
13	12,5	1196,29	150	0,0091	80	95,70	729,40
14	13,5	1506,98	128	0,0078	68	102,47	831,88
15	14,5	1867,28	81	0,0049	43	80,29	912,17
16	15,5	2280,87	89	0,0054	48	109,48	1021,65
17	16,5	2751,43	39	0,0024	21	57,78	1079,43
18	17,5	3282,62	27	0,0016	14	45,96	1125,39
19	18,5	3878,12	29	0,0018	15	58,17	1183,56
20	19,5	4541,61	11	0,0007	6	27,25	1210,81
21	20,5	5276,76	22	0,0013	12	63,32	1274,13
22	21,5	6087,25	11	0,0007	6	36,52	1310,65
23	22,5	6976,76	8	0,0005	4	27,91	1338,56
24	23,5	7948,95	5	0,0003	3	23,85	1362,41
25	24,5	9007,50	0	0,0000	0	0,00	1362,41
		SUMA:	16404	1,0000	8760	–	1362,41

6. WYDAJNOŚĆ ELEKTROWNI WIATROWEJ

Histogram rozkładu prędkości wiatru stanowi podstawę do wyboru typu elektrowni wiatrowej i określenia jej wydajności energetycznej w rozpatrywanym miejscu. Takie obliczenia wykonuje się, uwzględniając charakterystykę elektrowni wiatrowej podawaną przez producenta. Charakterystyka ta określa zależność mocy elektrowni od prędkości wiatru. Na takiej charakterystyce podawana jest prędkość startu elektrowni wiatrowej, tj. prędkość, przy której zostaje ona włączona do pracy. Wynosi ona zwykle od 2,5 m/s dla małych konstrukcji do około 4,5 m/s dla większych mocy. Wyłączenie elektrowni następuje zwykle przy prędkości wiatru 25 m/s. Dla elektrowni małych mocy prędkość wyłączenia może być większa (np. 30 m/s). Widać zatem, iż ze względu na techniczne warunki pracy elektrowni wiatrowych, część dyspozycyjnej energii wiatru nie jest wykorzystywana.

Dysponując charakterystyką elektrowni, należy obliczyć wartość mocy (P_{ewi}) dla prędkości wiatru (v_i) będących środkami kolejnych przedziałów klasowych. Na tej podstawie oblicza się energię (E_{ewi}) wyprodukowaną przez elek-

tronię w ciągu jednego roku w kolejnym i -tym przedziale klasowym:

$$E_{ewi} = P_{ewi} \cdot t_i = P_{ewi} \cdot f_i \cdot T, [\text{Wh}] \quad (11)$$

Całkowita energia wytworzona w ciągu roku przez elektrownię będzie sumą energii składowych ze wszystkich przedziałów:

$$E_{ew} = \sum_{i=1}^k E_{ewi}, [\text{Wh}] \quad (12)$$

Do przeprowadzenia przykładowych obliczeń produkcji energii elektrycznej w analizowanej lokalizacji wybrano dwie elektrownie wiatrowe małej mocy. Pierwsza z nich to elektrownia z generatorem synchronicznym ze wzbudzeniem od magnesów trwałych (PMSG), typ BWC XL.1 firmy Bergey [7]. Służy ona do zasilania odbiorców autonomicznych. Druga elektrownia to ZEFIR-6A, z generatorem asynchronicznym, o mocy znamionowej 5 kW, produkcji krajowej [10]. Jest ona przystosowana do współpracy z siecią energetyczną. Podstawowe dane techniczne obu siłowni zawiera tabela 3.

Tabela 3. Dane techniczne elektrowni wiatrowych Zefir 6A oraz BWC XL1

Wielkość	ZEFIR 6A	BWC XL1	Jednostka
Średnica wirnika	6,0	2,5	[m]
Liczba łopat	3	3	[–]
Prędkość obrotowa nominalna wirnika	150	490	[obr/min]
Moc generatora	5,0	1,0	[kW]
Rodzaj generatora	Asynchroniczny	Synchroniczny PMSG	[–]
Napięcie znamionowe generatora	3x380	24	[V]
Roboczy zakres prędkości wiatru	3,5–25	3–20	[m/s]
Wysokość osi wirnika nad poziomem gruntu	10	9–32	[m]
Prędkość wiatru przetrwania konstrukcji	60	54	[m/s]

Tabela 4. Energia wyprodukowana przez elektrownie z tabeli 3

Nr przedziału klasowego	Środek przedziału klasowego	Czas trwania wiatru w przedziale i	Moc elektrowni wiatrowej dla prędkości wiatru v_i	Energia wyprodukowana przez elektrownię w przedziale i	Moc elektrowni wiatrowej dla prędkości wiatru v_i	Energia wyprodukowana przez elektrownię w przedziale i
i	v_i [m/s]	t_i [h/rok]	P_{ewi} [W]	E_{ewi} [kWh]	P_{ewi} [W]	E_{ewi} [kWh]
ZEFIR 6A				BWC XL1		
1	0,5	586	0	0	0	0,00
2	1,5	1345	0	0,00	0	0,00
3	2,5	1455	0	0,00	6	8,34
4	3,5	1565	252	394,38	36	56,61
5	4,5	1323	480	635,04	90	119,07
6	5,5	916	905	828,98	174	159,65
7	6,5	582	1455	846,81	287	167,05
8	7,5	291	2265	659,12	430	125,13
9	8,5	129	3615	466,34	596	76,93
10	9,5	54	5000	270,00	780	42,12
11	10,5	99	5000	495,00	960	95,04
12	11,5	95	5000	475,00	1112	105,66
13	12,5	80	5000	400,00	1202	96,17
14	13,5	68	5000	340,00	1181	80,33
15	14,5	43	5000	215,00	1136	48,84
16	15,5	48	5000	240,00	1089	52,28
17	16,5	21	5000	105,00	1041	21,86
18	17,5	14	5000	70,00	992	13,88
19	18,5	15	5000	75,00	941	14,11
20	19,5	6	5000	30,00	888	5,33
21	20,5	12	5000	60,00	835	10,02
22	21,5	6	5000	30,00	780	4,68
23	22,5	4	5000	20,00	723	2,89
24	23,5	3	5000	15,00	666	2,00
25	24,5	0	5000	0,00	607	0,00
SUMA		8760	–	6670,66	–	1308,00

Na podstawie danych producentów określono moc elektrowni (P_{ewi}) dla prędkości wiatru (v_i) ze środków kolejnych przedziałów klasowych. Na tej podstawie, korzystając z obliczonego już wcześniej czasu trwania wiatru w poszczególnych przedziałach prędkości, wyznaczono energię E_{wi} wyprodukowaną przez elektrownię w ciągu jednego roku w każdym przedziale. Do tego celu posłużono się zależnością (10). Suma wszystkich energii cząstkowych według wzoru (11) daje energię roczną. Rezultaty obliczeń zamieszczono w tabeli 4.

Z rezultatów obliczeń wynika, iż elektrownia ZEFIR wyprodukuję (teoretycznie) w ciągu roku, przy danych warunkach wiatrowych, 6671 kWh energii, natomiast elektrownia BWC – 1308 kWh. Stosunek energii jest więc równy stosunkowi mocy znamionowych, i wynosi 5. Świadczy to o porównywalnych parametrach energetycznych obu turbin.

Należy także zauważyć, iż w warunkach krajowych, takie źródła dla odbiorcy indywidualnego, jakim jest gospodarstwo domowe, mogą być interesującym rozwiązaniem. Przy przeciętnym zużyciu energii elektrycznej w tej gru-

pie odbiorców wynoszącym w roku 2008 2035 kWh [6], takie siłownie z powodzeniem mogą pokryć z nadmiarem (ZEFIR), lub znacząco uzupełnić (BWC) konsumpcję pojedynczego odbiorcy.

Kolejnym zagadnieniem godnym uwagi jest sprawność energetyczna obu analizowanych siłowni. Z danych z tabeli 5 wynika, iż jednostkowa roczna energia wiatru wynosi 1362,41 kWh. Do obu siłowni dostarczana jest zatem energia proporcjonalna do powierzchni zakreślonej przez łopaty wirników (tab. 5). Na tej podstawie można określić ich sprawność energetyczną. Uzyskane wartości są charakterystyczne dla tego typu urządzeń i nie odbiegają od spotykanych w praktyce.

Tabela 5. Sprawność energetyczna siłowni wiatrowych

Wielkość	ZEFIR 6A	BWC XL1	Jednostka
Energia jednostkowa wiatru	1362,41	1362,41	[kWh/m ²]
Średnica wirnika	6,0	2,5	[m]
Powierzchnia zakreślana przez wirnik	28,27	4,91	[m ²]
Energia wiatru dostarczana do siłowni	38521,18	6687,71	[kWh]
Energia wytworzona	6670,66	1308,00	[kWh]
Sprawność	17,32	19,56	[%]

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu, iż wysokość prowadzonych pomiarów prędkości wiatru jest równa wysokości zawieszenia osi wirnika elektrowni. W przypadku gdy elektrownia będzie na wyższym maszcie, należy dokonać ekstrapolacji otrzymanych wyników prędkości wiatru według wzoru [4]:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (13)$$

Możliwe jest też wykonanie przeliczenia wartości wyznaczonej energii, według zależności:

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^{3\alpha} \quad (14)$$

gdzie:

- v_1 – prędkość wiatru na wysokości h_1 ,
- E_1 – energia na wysokości h_1 ,
- α – wykładnik o wartości zależnej od szorstkości terenu, wyznaczany doświadczalnie lub dobierany w przybliżeniu z tablic [2].

Należy pamiętać, iż tego typu przybliżone obliczenia związane są z ryzykiem powstawania błędów, a zatem pomiary wiatru powinny być prowadzone w warunkach jak najbardziej zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy przyszłej elektrowni.

7. WNIOSKI

Przedstawiona metodyka szacowania zasobów energetycznych wiatru i produkcji energii elektrycznej może być z powodzeniem stosowana na potrzeby małej energetyki wiatrowej. Obecnie istnieją możliwości budowy stosunkowo niewielkim kosztem odpowiedniej stacji pomiarowej dającej dobrej jakości dane pomiarowe. Konieczne jest przy tym zachowanie odpowiednich warunków pomiarów, zbliżonych do rzeczywistych warunków pracy turbiny wiatrowej, z uwzględnieniem wymagań producentów.

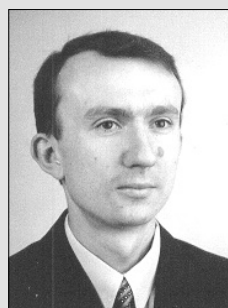
Omówiona analiza danych możliwa jest do wykonania za pomocą popularnych arkuszy kalkulacyjnych. Nie jest wymagane specjalistyczne kosztowne oprogramowanie. Dzięki temu potencjalny inwestor niewielkim nakładem, w stosunku do ceny elektrowni wiatrowej, może posiadać wiarygodne informacje na temat warunków wiatrowych i możliwości produkcji energii w analizowanej przez niego lokalizacji. Ułatwi to wydatnie planowanie przyszłej inwestycji i zmniejsza ryzyko popełnienia błędów.

Literatura

- [1] Gajek L., Kałużka M.: *Wnioskowanie statystyczne: modele i metody*. Wyd. 4 popr. i uzup. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2000.
- [2] Gumuła S. i in.: *Energetyka wiatrowa*. UWND AGH, Kraków, 2006.
- [3] Koronacki J., Mielniczuk J.: *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*. Wyd. 2. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2004.
- [4] Soliński I.: *Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej*. Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków, 1999.
- [5] Stępień J.C., Tytko J.: *Ocena potencjału energetycznego wiatru w rejonie Gór Świętokrzyskich*. Ogólnopolskie Forum „Mała Energetyka '96”, Chańcza, 28–30 maj 1996.
- [6] Władczyk M.: *Dystrybucja energii elektrycznej w Polsce*. Energia Elektryczna, nr 2, 2010.
- [7] www.bergey.com
- [8] www.elektrownie-wiatrowe.org.pl
- [9] www.warun.prv.pl
- [10] www.zaber.com.pl

Wpłynęło: 15.07.2010

Piotr MICHALAK



Studia magisterskie na kierunku Elektrotechnika, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, ukończył w roku 1999. Następnie podjął pracę w Katedrze Automatyki Napędu i Urządzeń Przemysłowych na stanowisku asystenta. Od roku 2009 adiunkt w Katedrze Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska. Zajmuje się problematyką wykorzystania odnawialnych zasobów energetycznych oraz zastosowań energoelektroniki w energetyce odnawialnej. Jest autorem i współautorem 25 referatów i artykułów.

e-mail: pmichal@agh.edu.pl