

Modelowanie wpływu warunków meteorologicznych na pracę siłowni wiatrowej

Streszczenie. Artykuł porusza problematykę modelowania wpływu parametrów meteorologicznych na pracę siłowni wiatrowej. W badaniach skupiono się na określeniu wpływu prędkości wiatru, jego podmuchów a także kierunku wiatru na ilość generowanej energii przez siłownię wiatrową. Z wykonanych badań wynika, że przy dużej zmienności warunków pogodowych to kierunek wiatru jest głównym czynnikiem decydującym o wielkości produkcji energii elektrycznej.

Abstract. This article addresses the problem of modeling the influence of meteorological parameters on the work of wind turbines. The study focused on determining the influence of wind speed, wind gusts and wind direction on the amount of energy generated by the wind turbine. The research shows that the conditions of high variability of weather conditions is the direction of wind is the main factor deciding the volume of electricity production. (*Modeling the influence of meteorological conditions on the work of a wind turbine*).

Słowa kluczowe: energia elektryczna, kierunek wiatru, prędkość wiatru, siłownia wiatrowa.

Keywords: electricity, wind direction, wind speed, wind power.

Wstęp

Bardzo istotnym aspektem zmian zachodzących w ostatnich latach w polskim systemie elektroenergetycznym jest dynamiczny rozwój źródeł generacji rozproszonej związanej z odnawialnymi źródłami energii. Z informacji opublikowanych przez Urząd Regulacji Energetyki wynika, że, moc zainstalowana odnawialnych źródeł energii wyniosła na koniec marca 2017 roku 8440,459 MW. Największy udział mocy w odnawialnych źródłach energii w Polsce posiadała energetyka wiatrowa i było to 5813,236 MW. Na kolejnych miejscach znalazły się elektrownie na biomasę (1297,970 MW) i wykorzystujące hydroenergię (993,992 MW).

Wraz z dynamicznym rozwojem mocy zainstalowanej w silnikach wiatrowych coraz częściej pojawia się pytanie na temat faktycznego wykorzystania zainstalowanej mocy [2 – 4,15]. W opracowaniach dotyczących kalkulacji kosztów bardzo często przyjmuje się, że siłownia będzie pracowała przez 2300 godzin w roku tj. 26%. Z danych Polskich Sieci Elektroenergetycznych [5] wynika, że stopień wykorzystania mocy zainstalowanej zawodowych siłowni wiatrowych w Polsce, liczony jako stosunek energii wyprodukowanej przez źródła wykorzystujące energię z wiatru do teoretycznie maksymalnej ich generacji, za 2016 rok wyniósł 23%, a za 2015 rok - 25%. Z badań Planeta i Sobótki [6] wynika, że w Polsce w miejscach uznawanych za dobre do budowy siłowni wiatrowych wskaźniki wykorzystania elektrowni mogą zawierać się w przedziale od 6 do 26%, a czas trwania ciszy wiatrowej może wynosić nawet 180 dni. Kolejną bardzo istotną kwestią dla pracy siłowni wiatrowej i stopnia wykorzystania jej przyłącza do sieci elektroenergetycznej jest zmienność wytwarzania energii elektrycznej w czasie. Do czerwca 2017 roku maksymalna moc generowana w elektrowniach wiatrowych miała miejsce 3 I i wyniosła ona ponad 5000 MW, przy ok. 5800 MW mocy zainstalowanej (wykorzystanie ponad 86%) [5]. Niestety takich dni w roku jest bardzo mało i już 7 stycznia rejestrowano godziny, w których sumaryczna generacja źródeł wiatrowych wynosiła zaledwie 663 MW (wykorzystanie 11%) [5].

W ostatnim czasie coraz więcej uwagi poświęca się zagadnieniom związanym z analizą wpływu czynników zewnętrznych na pracę odnawialnych źródeł energii [7 – 11]. Niestety dla naszej strefy klimatycznej ciągle brakuje opracowań dotyczących modelowania ich pracy w

warunkach rzeczywistych, szczególnie dla małych obiektów.

Cel i zakres pracy

Celem przedstawionego opracowania jest analiza wpływu warunków meteorologicznych na pracę turbiny wiatrowej w warunkach rzeczywistych. Na wstępie zostały wyznaczone zmienne istotnie wpływające na pracę siłowni w zależności od warunków pogodowych. Na ich podstawie opracowano modele regresyjne opisujące wartość mocy generowanej przez turbinę wiatrową o mocy znamionowej 150 kW.

Wyniki badań

Badania realizowano w okresie półrocznym od lipca do grudnia 2015 roku. W tym czasie siłownia wiatrowa o mocy 150 kW wygenerowała 26,4 MWh energii elektrycznej a na potrzeby własne zużyła 0,8 MWh energii. Z wykonanych analiz wynika, że średnia ilość generowanej energii dla godzinowych interwałów czasu wynosiła zaledwie 2,9 kWh. Przyczyną tak niekorzystnej pracy były panujące warunki meteorologiczne.

W opracowaniu skupiono się na analizie wpływu podstawowych czynników jakimi według autorów są prędkość wiatru (V), prędkość podmuchów wiatru (V_p) i kierunek wiatru, na uzyskiwaną moc (P) przez siłownię wiatrową. W pierwszej części opracowania wybrano dni, w których występowały stabilne warunki meteorologiczne poza prędkością i podmuchami wiatru. Informacje na temat warunków meteorologicznych w miejscu lokalizacji siłowni pozyskano z najbliższej stacji meteorologicznej, która oddalona była od siłowni wiatrowej w linii prostej o 3 km i była ona zlokalizowana na porównywalnej wysokości nad poziomem morza jak badana siłownia. Pozyskane wyniki przeliczono na warunki panujące na wysokości 30 m n.p.g. tj. na wysokości posadowienia gondoli na maszcie zgodnie ze wzorem wyznaczonym doświadczalnie [12]

$$V_h = V_o \cdot \left(\frac{h}{h_o} \right)^\alpha \quad (1)$$

gdzie: V_h - prędkość wiatru obliczona na wysokości h , V_o - prędkość wiatru zmierzona na wysokości h_o , h_o - wysokość usytuowania wiatromierza dla pomiarów prędkości wiatru V_o , h - wysokość, dla której oblicza się prędkość wiatru V_h , $\alpha = 0,190$ - wykładnik potęgowy zależny od klasy

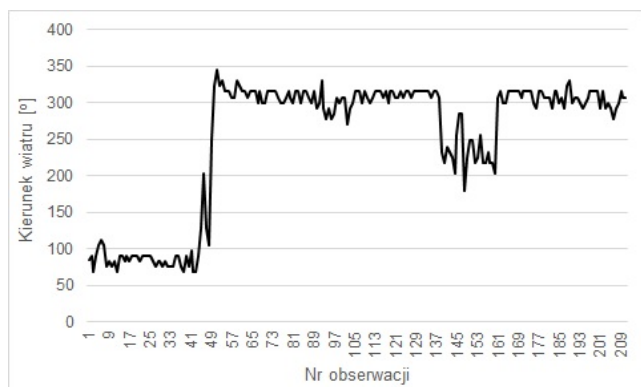
szorstkości terenu, prędkości wiatru i okresu uśredniania [13,14]

Krótką charakterystykę uzyskanych wyniku przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka strugi powietrza przy małej zmienności kierunku wiatru na wysokości 30 m.n.p.g

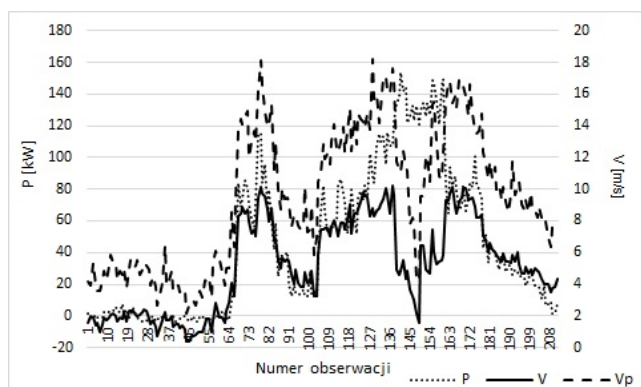
Parametr:	V_{\min}	V_{sr}	Współczynnik zmienności prędkości	Współczynnik zmienności kierunku
	m/s	m/s	%	%
wiatr	4,3	10,6	39,7	11,0
podmuch	5,7	17,3	31,4	

Z tabeli 1 wynika, że w miejscu lokalizacji siłowni wiatrowej w wybranych dniach, w których była mała zmienność kierunku wiatru występowały warunki sprzyjające do jej pracy. Średnia prędkość wiatru wyznaczona dla całego okresu wynosiła 7,4 m/s a jego przeciętna wartość w czasie, gdy siłownia pracowała wzrosła do ponad 10 m/s, a jej wartość minimalna wynosiła 4,3 m/s.



Rys. 1. Zmiany kierunku wiatru na wysokości 30 m.n.p.g

W okresie tym występował stabilny kierunek wiatru co zobrazowano na rysunku 1. Przez większość czasu rejestrowano zachodni kierunek, a jego zmienność w czasie, gdy występowały sprzyjające warunki do pracy siłowni wynosiła zaledwie 11%.



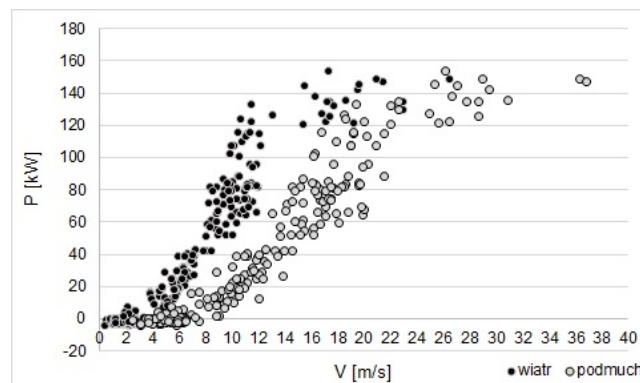
Rys. 2. Wpływ prędkości wiatru i podmuchów na generowaną moc siłowni wiatrowej

Modelowanie pracy siłowni wiatrowej przy małej zmienności kierunku wiatru

Na rysunku 2 zobrazowano zmiany wymuszenia (prędkość i podmuch wiatru) oraz odpowiedzi (moc) siłowni wiatrowej. Prędkość wiatru, przy której siłownia rozpoczynała pracę wynosiła około 4 m/s. Przy tak niskiej prędkości wiatru siłownia rozpoczynała pracę, lecz nie występowały jeszcze wymagane parametry by mogła ona stabilnie pracować w funkcji generatora energii elektrycznej. Przy wahaniach prędkości wiatru i jego podmuchów układ

sterujący w celu podtrzymania synchronizacji częstotliwości generowanego napięcia zezwala na pobór energii z sieci publicznej i napędzanie siłowni.

Ten stan pracy widoczny jest w pierwszej części wykresu (Rys. 2), w której bilans mocy siłowni oscyluje wokół zera i obciąża ona chwilowo sieć mocą na poziomie 10kW. Dopiero przy większych prędkościach wiatru możliwe jest wyłącznie wytwarzanie energii elektrycznej a moc siłowni jest zależna od prędkości wiatru oraz siły jego podmuchów. Zależność mocy siłowni wiatrowej od prędkości wiatru oraz jego podmuchów przy stabilnym kierunku wiatru pokazano na rysunku 3



Rys. 3. Wpływ prędkości wiatru i podmuchów wiatru na moc siłowni wiatrowej

W oparciu o wybrane dni, w których występował stabilny kierunek wiatru zbudowano modele regresyjne, w których jako zmienną wejściową wykorzystano prędkość wiatru oraz prędkość podmuchów wiatru. Budowano modele liniowe, wielomianowe oraz logistyczne a charakterystykę jakości opracowanych modeli zestawiono w tabeli 2. Jakość opracowanych modeli oceniano w oparciu o wartość współczynnika korelacji oraz średniego względnego błędzie prognozy MAPE.

$$(2) \quad MAPE = \frac{1}{m} \sum_{\tau=1}^m \left| \frac{E_t - E_t^p}{E_t} \right| \cdot 100$$

W zagadnieniach praktycznych wydaje się jednak, że ocena jakości modelu w oparciu o wartość błędzie MAPE może być niewystarczająca. W pracy ocenę rozszerzono o udział różnic bilansowych w całkowitej ilości wytworzonej energii zgodnie ze wzorem:

$$(3) \quad \Delta ESR_t = \frac{\sum_{t=1}^n |E_t - E_t^p|}{E_c} \cdot 100$$

gdzie: E_t – rzeczywista produkcja energii elektrycznej w godzinie t , E_t^p – prognozowana produkcja energii elektrycznej w godzinie t , E_c – rzeczywista produkcja energii elektrycznej w czasie objętym analizą.

Modele, dla których estymowane parametry były statystycznie istotnie różne od zera zapisano w postaci jawnej:

- $P_p = -16,77 + 8,56 \cdot V$
- $P_p = -10,84 + 2,93 \cdot V + 0,85 \cdot V^2 - 0,03 \cdot V^3$
- $P_p = -33,79 + 6,27 \cdot V_p$
- $P_p = -3,71 - 2,42 \cdot V_p + 0,63 \cdot V_p^2 - 0,01 \cdot V_p^3$
- $P_p = 10 - 9,32 \cdot V_p + 0,01 \cdot V_p^3 + 0,71 \cdot V_p^2 + 9,94 \cdot V - 0,22 \cdot V^2$

$$f) P_p = \frac{150}{1 + 60,97 \cdot \text{Exp}(-0,41 \cdot V)}$$

$$g) P_p = \frac{150}{1 + 15,14 \cdot \text{Exp}(-0,03 \cdot V^2)}$$

$$h) P_p = \frac{150}{1 + 99,33 \cdot \text{Exp}(-0,27 \cdot V_p)}$$

$$i) P_p = \frac{150}{1 + 17,21 \cdot \text{Exp}(-0,01 \cdot V_p^2)}$$

gdzie:

V – prędkość wiatru na wysokości 30 m.n.p.g. [m/s], V_p – prędkość podmuchów wiatru na wysokości 30 m.n.p.g. [m/s],

Tabela 2. Charakterystyka jakości opracowanych modeli generowanej mocy przez siłownię wiatrową

Model	R ²	MAPE	ΔESR_t	MAPE	ΔESR_t
		[%]	[%]	[%]	[%]
		W całym okresie		W czasie stabilnej pracy	
a	0,89	150,77	23,17	25,39	19,24
b	0,93	102,42	19,28	20,94	16,33
c	0,9	172,97	23,40	26,04	18,76
d	0,93	99,21	18,68	20,38	16,15
e	0,94	84,98	17,60	19,21	15,05
f	0,93	189,29	20,14	18,20	15,81
g	0,90	311,66	25,56	19,71	18,17
h	0,93	208,17	20,51	18,70	15,83
i	0,90	323,20	24,96	19,67	17,36

Tabela 3. Charakterystyka warunków meteorologicznych dla wybranych dni

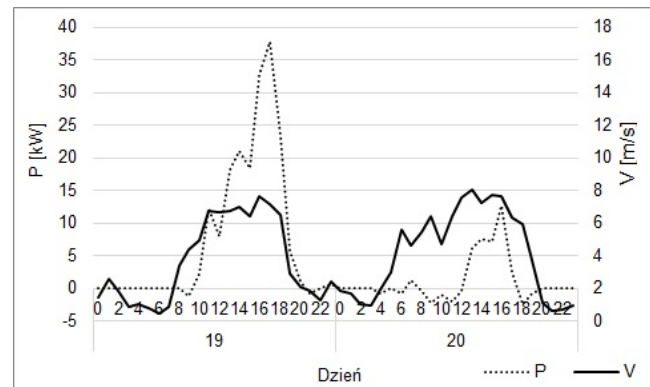
Parametr	Dzień		
	19 lipiec	20 lipiec	
Wiatr	V_{min} [m/s]	0,21	0,00
	V_{sr} [m/s]	3,66	4,21
	V_{max} [m/s]	8,08	8,80
	Współczynnik zmienności	70,67	63,79
	Udział obserwacji o prędkości wiatru pow. 4 m/s	41,67	55,21
Podmuch	$V_{p,min}$ [m/s]	1,50	1,35
	$V_{p,sr}$ [m/s]	8,48	8,09
	$V_{p,max}$ [m/s]	20,98	16,83
	Współczynnik zmienności	69,58	56,51
	Udział obserwacji o podmuchach wiatru pow. 6 m/s	51,04	59,38
Kierunek wiatru	Min	225,00	22,50
	Śr	302,90	243,34
	Max	352,50	360
	Współczynnik zmienności	7,12	48,09
Energia	Wytworzona [kWh]	189,80	58,14
	Pobrana [kWh]	10,46	31,67
	Bilans [kWh]	179,33	26,47

Z wykonanych analiz wynika, że w oparciu o prędkość wiatru lub jego podmuch w okresach niezmiennego kierunku wiatru można zbudować modele charakteryzujące się współczynnikiem determinacji na poziomie powyżej 0,9. Wartość średniego względnego błęd prognozy w czasie pracy siłowni oscylował wokół 20%, a udział różnic bilansowych był o kilka procent niższy. Ze względu na fakt, że w modelu nie uwzględniono algorytmu sterowania rozruchem siłowni, w analizach, w których uwzględniono okresy, gdy siłownia nie pracowała oraz nastąpił jej rozruch charakteryzujący się zarówno wytwarzaniem jak i poborem energii błąd MAPE wzrósł aż do ponad 100%. W obserwacjach tych występowały znaczne błędy w początkowych okresach pracy siłowni, ale nie miały one znaczącego wpływu na prognozy ilości wytworzonej energii,

ponieważ udział różnic bilansowych wzrósł nieznacznie. W trakcie badań nie zaobserwowano znaczących różnic pomiędzy jakością modeli budowanych w oparciu o prędkość wiatru i prędkość podmuchów wiatru.

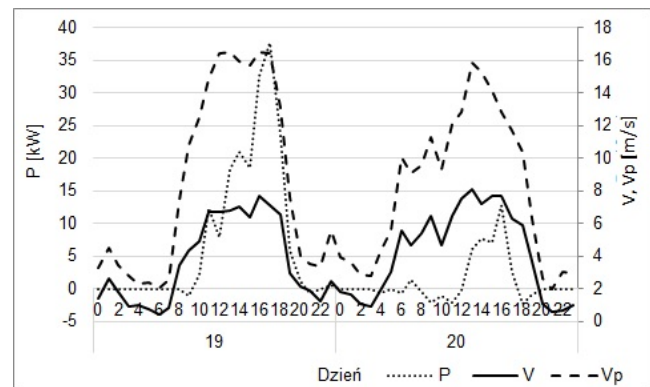
Z wykonanych analiz w dłuższym okresie czasu wynika, że w miejscu lokalizacji siłowni wiatrowej tak stabilne warunki odnośnie kierunku wiatru występowały bardzo rzadko. W celu przedstawienia wpływu kolejnego istotnego czynnika na pracę siłowni wiatrowej jakim jest kierunek wiatru wybrano na wstępie do analiz dwa porównywalne dni pod względem prędkości wiatru, lecz o odmiennej zmienności jego kierunku. W tabeli 3 przedstawiono wskaźniki charakteryzujące warunki meteorologiczne w wybranych do analizy dniach.

Z przedstawionej charakterystyki (Tab. 3) wnika, że nieznacznie lepsze warunki do pracy siłowni wiatrowej występowały 20 lipca niż 19 lipca. Dwudziesty lipca charakteryzował się bowiem wyższą średnią prędkością wiatru i wyższym udziałem obserwacji, w których prędkość wiatru była wyższa od prędkości startowej siłowni. Na rysunku 4 widzimy jednak, że ilość wygenerowanej energii 19 lipca jest znacznie większa niż w kolejnym dniu.



Rys. 4. Przebieg zmian mocy siłowni wiatrowej i prędkości wiatru

W celu wyjaśnienia zaobserwowanych różnic dokonano charakterystyki w tych dniach; prędkości wiatru i prędkości podmuchów wiatru, której wyniki zestawiono w tabeli 3 oraz przedstawiono w sposób graficzny na rysunku 5.

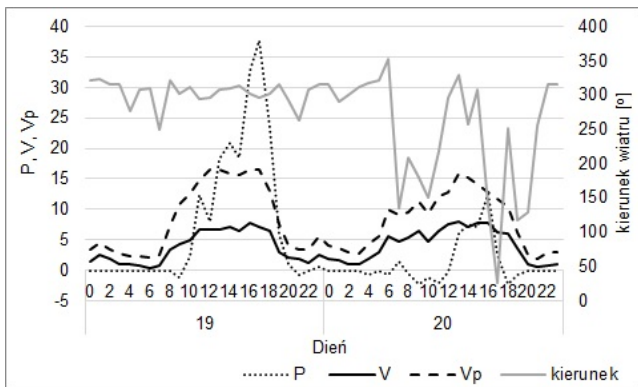


Rys. 5. Zmienność mocy siłowni wiatrowej, prędkości wiatru oraz podmuchów wiatru

Opracowane jednak dane nie pozwoliły na pełne wyjaśnienie przyczyny tak dużej różnicy pomiędzy generowanymi w tych dniach ilościami energii elektrycznej. Wprawdzie w pierwszym z badanych dni zanotowano średnie wyższe prędkości podmuchów wiatru i wyższą jego prędkość maksymalną, lecz udział obserwacji w których podmuch wiatru był o prędkości wyższej niż 6 m/s był już niższy. Celowe wydaje się jednak podjęcie prób w których jako zmienne wyjściowe do budowy modelu siłowni wiatro-

wej będzie jednocześnie wykorzystana informacja o prędkości wiatru i jego podmuchach. Dla badanych dni łączne wykorzystanie wymienionych parametrów spowodowało wzrost współczynnika determinacji o kilka procent i zmniejszenie błędu prognozy również o kilka procent, ale tylko dla okresu o stabilnych warunkach pracy. Nadal jednak jakoś zbudowanego modelu jest niezadawalająca.

W kolejnym kroku analizą objęto również kierunek wiatru. Z informacji pokazanych w tabeli 3 oraz na rysunku 6 wynika, że dopiero kierunek wiatru w znacznym stopniu różnicuje analizowane dni. W dniu 19 lipca występowała mała zmienność kierunku wiatru i był on głównie zachodni i północno-zachodni. Możliwa więc była praca siłowni wiatrowej, ponieważ układ automatyki był w stanie naprowadzić gondolę na strugę powietrza. W kolejnym dniu rejestrowano wiatr o dynamicznie zmieniającym się kierunku (od północno-zachodniego do południowo-wschodniego) i pomimo występowania wiatru o prędkości wyższej niż prędkość startowa, to praca siłowni była bardzo ograniczona. Dla pierwszego dnia wytworzona ilość energii była na poziomie 190 kWh, a dla drugiego niespełna 60 kWh. Z punktu widzenia bilansu energetycznego różnice pomiędzy dniami są jeszcze większe, ponieważ w drugiej dobie pobrano z sieci na potrzeby własne prawie trzykrotnie więcej energii elektrycznej.



Rys. 6. Zmienność mocy siłowni wiatrowej, prędkości wiatru, podmuchów wiatru oraz kierunku wiatru

Podsumowanie

Z przeprowadzonych analiz wynika, że w miejscu lokalizacji badanej siłowni wiatrowej rejestrowano bardzo dynamiczne zmiany kierunku wiatru. Takie warunki pracy dla siłowni wiatrowej są bardzo niekorzystne i powodują znaczne obniżenie ilości wytwarzanej energii pomimo występowania wymaganej prędkości wiatru. Dla rejestrowanych warunków pracy średnia dobowa ilość wytworzonej energii elektrycznej przez siłownię po uwzględnieniu jej potrzeb własnych była na poziomie zaledwie 270 kWh. Sytuacja ta wynika głównie z powodu niewłaściwego ustawienia gondoli względem strugi powietrza. Przy dużej zmienności kierunku wiatru układ automatycznego naprowadzania gondoli nie jest w stanie nadszarpnąć za strugą powietrza.

Na jakość opracowanych modeli regresyjnych generowanej mocy przez siłownię wiatrową w funkcji prędkości wiatru i jego podmuchów duży wpływ miał stan pracy siłowni. Jeśli w analizach uwzględniono cały okres pracy modele charakteryzowały się bardzo wysokim błędem MAPE od 85% do ponad 300%. Natomiast w okresie stabilnej jego pracy kształtował się on na poziomie oscylującym wokół 20%. Na wartość błędu duży wpływ miały rozbieżności w początkowej i końcowej fazie pracy. Ich udział w ilości generowanej energii był jednak bardzo mały co pozwoliło na osiągnięcie błędu ΔESR na znacznie niższym poziomie oscylującym w przedziale od 15 do 26%.

Autorzy: dr inż. Krzysztof Nęcka, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: krzysztof.necka@ur.krakow.pl; dr inż. Jakub Sikora, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: jakub.sikora@ur.krakow.pl; dr hab. inż. Jarosław Knaga, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: jaroslaw.knaga@ur.krakow.pl; dr inż. Tomasz Szul, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Energetyki i Automatykacji Procesów Rolniczych, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: tomasz.szul@ur.krakow.pl; dr hab. inż. Anna Szelaż-Sikora, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Inżynierii Rolniczej i Informatyki, ul. Balicka 116b, 30-149 Kraków, E-mail: anna.szelaż-sikora@ur.krakow.pl

LITERATURA

- [1] Urząd Regulacji Energetyki. <https://www.ure.gov.pl/pl/rynki-energi/energia-elektryczna/odnawialne-zrodla-ener/potencjal-krajowy-oze/5753,Moc-zainstalowana-MW.html>. (2017)
- [2] Niedziółka M., Analiza opłacalności farm wiatrowych, *Zielona energia w Polsce*, red. D. Niedziółka, CeDeWu, (2012).
- [3] Szczyrba T., Boczar T., Badanie efektywności turbin wiatrowych dużej mocy, *Prace instytutu elektrotechniki*, zeszyt 261 (2013), 97-104
- [4] Korzeniewska E., Drzymała, A., Elektrownie fotowoltaiczne – aspekty techniczne i ekonomiczne. *Przegląd Elektrotechniczny*, 89 (2013), nr 12, 324 - 327
- [5] PSE. Raporty dobowe z pracy Krajowego Systemu Elektroenergetycznego. Generacja źródeł wiatrowych. http://www.pse.pl/index.php?modul=21&id_rap=24
- [6] Planeta B., Sobótka K., Magazynowanie lub komplementarne wykorzystywanie energii elektrowni wiatrowych, <http://www.energetyka.xtech.pl>
- [7] Akpınar EK, Akpınar S., A statistical analysis of wind speed data used in installation of wind energy conversion systems, *Energy Convers Manage*, 46 (2005); nr 4, 515 - 532
- [8] Dai J., Tan Y., Yang W., Wen L., Shen X., Investigation of wind resource characteristics in mountain wind farm using multiple-unit SCADA data in Chenzhou: A case study, *Energy Conversion and Management*, Volume 148 (2017), 378 - 393
- [9] Jąderko A. Kowalewski M. K., Wyznaczenie parametrów wiatru w energetyce odnawialnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 91 (2015), nr 1, 148 - 151. doi:10.15199/48.2015.01.31
- [10] Nęcka K., Lis S., Drózd T., Oziębłowski M., Kielbasa P., Tomasiak M., Ostafin M., Nawara P., Charakterystyka pracy siłowni fotowoltaicznej w zmiennych warunkach meteorologicznych. *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 12, 105 - 108, doi:10.15199/48.2016.12.27
- [11] Seguro J.V., Lambert T.W., Modern estimation of the parameters of the Weibull wind speed distribution for wind energy analysis, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, (2000), Volume 85, 75 - 84, [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(99\)00122-1](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(99)00122-1).
- [12] Soliński I., Energetyczne i ekonomiczne aspekty wykorzystania energii wiatrowej, *Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, Kraków (1999)
- [13] Lorenc H., Zasoby wiatru w Polsce, *Materiały badawcze IGIMW, Seria Meteorologia 18*, Warszawa (1992)
- [14] Gumuła S., Knap T., Strzelczyk P., Szczerba Z., Energetyka wiatrowa, *Uczelniane Wydawnictwa Naukowo- Dydaktyczne, AGH*, Kraków (2006)
- [15] Pawlak R., Kawczyński R., Korzeniewska E., Lebiada M., Rosowski A., Rymaszewski J., Sibiński M., Tomczyk M., Walczak M., Ogniwa fotowoltaiczne o niekonwencjonalnych kształtach, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2013, R. 89, nr 7, 288-292