

**Zeszyty Naukowe***Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią
Polskiej Akademii Nauk*

rok 2018, nr 102, s. 101–110

Maciej ŻOŁĄDEK*, Wojciech GORYL**, Krzysztof SORNEK**, Aleksandra AUGUSTYN***

Analiza wybranych parametrów pracy turbiny wiatrowej zintegrowanej z budynkiem w zróżnicowanych warunkach pogodowych na przykładzie Centrum Energetyki AGH

Streszczenie: Wzrost zużycia energii w sektorze budownictwa wpływa na poszukiwanie rozwiązań dążących do poprawy efektywności energetycznej w tym zakresie lub uzyskania samowystarczalności energetycznej. Dotowanymi rozwiązaniami są podejścia bazujące na odnawialnych źródłach energii. W celu produkowania energii elektrycznej, na potrzeby własne budynku, wykorzystywane są przede wszystkim panele fotowoltaiczne oraz turbiny wiatrowe.

Niniejszy artykuł skupia się na analizie pracy turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu zintegrowanej z budynkiem. Przedmiotowa instalacja zlokalizowana jest na fasadzie budynku Centrum Energetyki AGH oraz skierowana w kierunku północno-zachodnim. W związku z tym turbina pracuje najbardziej efektywnie, gdy wiatr wieje z tego kierunku. Prędkość startowa instalacji wynosi 2,3 m/s, natomiast moc zainstalowana 1,5 kW. Analizowana instalacja posiada możliwość zmiany zarówno kąta łopat, jak i położenia gondoli turbiny względem kierunku wiatru, co poprawia jej wydajność.

W artykule omówiono parametry pracy turbiny w zależności od panujących warunków pogodowych. Dla porównania przyjęto okres, w którym nie występowały anomalie pogodowe oraz okres, w którym miał miejsce orkan Grzegorz. Dla tych dwóch przedziałów czasowych (od północy 27.10.2017 do południa 28.10.2017 oraz od północy 29.10.2017 do południa 30.10.2017) zmierzona i porównana została prędkość wiatru, prędkość obrotowa turbiny, moc generowana przez turbinę, a także takie parametry jak: wytwarzany hałas i drgania. Otrzymane wyniki pokazują znaczący wpływ orkanu Grzegorz na parametry pracy instalacji – w tym znaczący wzrost prędkości obrotowej wirnika, a co za tym idzie – siedmiokrotny wzrost średniej mocy generowanej przez turbinę. Z drugiej strony zaobserwowany został również wzrost poziomu hałasu oraz drgań.

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa zintegrowana z budynkiem, energetyka wiatrowa

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Kraków; e-mail: mzoladek@agh.edu.pl

** Mgr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Kraków; e-mail: wgoryl@agh.edu.pl; krzysztof.sornek@agh.edu.pl

*** Mgr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;
e-mail: augustyn@min-pan.krakow.pl

The operation of building integrated wind turbines in different weather conditions on the example of the AGH Center of Energy

Abstract: The rapidly growing energy consumption in the building sector has a significant impact on the efforts to find solutions aimed at improving energy efficiency in this area or even achieving self-sufficiency. One of approaches that can be used is electricity production from renewable energy sources. In order to produce electricity used for the own needs of the building, mainly photovoltaic panels and wind turbines are used.

The presented article focuses on the analysis of building an integrated wind turbine with a horizontal axis. The analyzed installation is located on the facade of the AGH Center of Energy building. The installation is oriented in a northwest direction. Therefore, the work of the wind turbine is most efficient when the wind blows from this direction. The installed wind turbine is characterized by the following parameters: the installed capacity amounts to 1.5 kW and the cut-in speed amounts to 2.3 m/s. The user can change the position of the turbine nacelle and set the optimal attack angles to achieve more efficiency.

The main purpose of the article is to show the impact of the atmospheric conditions on the work of the installation. The following parameters were analyzed: wind speed and power generation, rotation per minute, vibrations and noise level. The reference period was from October 27–28, 2017, when the atmospheric conditions were normal. The analyzed parameters were compared with the results achieved in the period from October 29–30, 2017, when the wind speed was very high.

The aim of presented paper is to show how the wind turbine works in different weather conditions. As it can be expected, the work of the wind turbine is most effective when the wind speed amounts to 5–10 m/s. However, such atmospheric condition are very rare in Poland, thus the wind turbine does not work optimally. It can therefore be stated that the wind turbines integrated with buildings are not a good technical solution in Polish conditions.

Keywords: building integrated wind turbine, wind energy

Wprowadzenie

Integracja turbin wiatrowych z budynkami związana jest przede wszystkim z dążeniem do poprawy efektywności energetycznej, a nawet samowystarczalności energetycznej w sektorze budownictwa. Ponadto zintegrowanie turbin wiatrowych z budynkami jest często jedynym rozwiązaniem, by wykorzystać potencjał wiatru w terenach miejskich. Należy mieć na uwadze, że ukształtowanie terenu w obszarach miejskich, gęsta zabudowa i występowanie przeszkód, stanowią poważne wyzwania dla rozmieszczenia turbin wiatrowych (Sunderland i in. 2013).

Sektor budownictwa jest obecnie uważany za jeden z głównych czynników wpływających na zużycie energii (Allouhi i in. 2015). Zużycie energii w budynkach w krajach rozwiniętych wynosi 20–40% całkowitego zużycia energii. Wzrastające zużycie energii w tym sektorze, a wraz z nim większa emisja dwutlenku węgla, sprawiły, że podjęto szereg działań dotyczących poprawy efektywności energetycznej oraz budownictwa samowystarczalnego energetycznie (Perez-Lombard i in. 2008). Jednym z rozwiązań jest instalowanie turbin wiatrowych zintegrowanych z budynkami. Mogą one być zlokalizowane zarówno na budynkach, jak i obok nich. Moc zainstalowana tych turbin mieści się w zakresie 1–20 kW (Haase i Lofstrom 2015). Badania prowadzone w tym zakresie wskazują, że turbina wiatrowa zintegrowana z budynkiem może zaspokoić jego potrzeby energetyczne nawet do 20% (Ragheb 2012). Dodatkowo instalowanie turbin wiatrowych zintegrowanych z budynkiem wpływa na zmniejszenie wykorzystania energii z paliw kopalnych na rzecz energii ze źródeł odnawialnych (Denoon i in. 2008).

W zależności od kierunku osi obrotu turbiny wyróżnia się turbiny z poziomą osią obrotu oraz z pionową osią obrotu. Kolejnym kryterium podziału jest typ integracji turbiny wiatrowej z budynkiem. Wśród nich występują turbiny wiatrowe fizycznie połączone z budynkiem, zazwyczaj zlokalizowane na dachu budynku. Kolejnym rodzajem są turbiny zintegrowane z budynkiem. Oznacza to, że ich konstrukcja powinna być uwzględniona już na etapie projektu budynku. Integracja może zachodzić na poziomie konstrukcyjnym, architektonicznym oraz energetycznym. Najwyższym poziomem integracji charakteryzują się obiekty, w przypadku których budynek celowo jest projektowany i wykorzystywany do zwiększania przepływu wiatru (Haase i Lofstrom 2015).

Zaprojektowanie budynku wraz z zintegrowaną turbiną wiatrową stanowi duże wyzwanie konstrukcyjne. Projekt musi uwzględniać prędkości i kierunek wiatru, jakie występują na danym obszarze oraz jak zmieniają się te parametry w zależności od geometrii budynku. Istnieje wiele czynników, które wpływają na przepływ wiatru w omawianych instalacjach. Wśród nich znajduje się nie tylko lokalizacja i występujące ukształtowanie terenu, ale również kształt budynku i jego wymiary. W zależności od kształtu budynku można uzyskać o 20–30% większą prędkość wiatru dla zainstalowanej turbiny wiatrowej z poziomą osią obrotu oraz o 20–40% w przypadku turbin z osią pionową (Cho i in. 2011). Przy projektowaniu takich budynków należy mieć również na uwadze, że wprowadzenie do konstrukcji turbiny wiatrowej wymaga wdrożenia większych środków bezpieczeństwa (Bobrova 2015).

W niniejszym artykule została poddana analizie praca turbiny z poziomą osią obrotu zlokalizowana na fasadzie budynku Centrum Energetyki AGH. Zbadano, jak zmieniają się wartości następujących parametrów w zależności od warunków atmosferycznych: prędkość wiatru, prędkość obrotowa turbiny, wielkość generowanej mocy, hałas oraz drgania wytwarzane podczas pracy turbiny.

1. Opis instalacji

Instalacja turbin wiatrowych zintegrowanych z budynkiem zlokalizowana na elewacji budynku Centrum Energetyki AGH składa się z dwóch turbin wiatrowych: jednej o poziomej oraz drugiej o pionowej osi obrotu. Pierwsza z nich zainstalowana jest na 8, a druga na 7 piętrze budynku. Miejsce montażu turbin zostało przedstawione na rysunku 1. Turbiny wiatrowe umieszczone zostały w specjalnie zaprojektowanych otworach technologicznych na elewacji budynku Centrum Energetyki AGH. Budynek ten zlokalizowany jest przy ulicy Czarnowiejskiej w Krakowie. Turbiny skierowane są w kierunku północno-zachodnim, co powoduje, że instalacja ta pracuje optymalnie, gdy wiatr wieje z tego kierunku.

Podstawowe parametry turbiny o poziomej osi obrotu zostały zestawione w tabeli 1.

Na górnym poziomie znajduje się turbina o poziomej osi obrotu firmy Ventus Energia o mocy maksymalnej 1,5 kW. Średnica turbiny wynosi 2,2 m. Posiada ona trzy łopaty, które mają możliwość zmiany kąta wokół własnej osi w zakresie ± 40 stopni. Wyniki zaprezentowane w dalszej części pracy przedstawiają pracę turbiny ze standardowym kątem, tj. 0 stopni. Dodatkowo, położenie gondoli turbiny można zmieniać względem kierunków



Rys. 1. Konfiguracja turbin przy elewacji budynku Centrum Energetyki
(u góry turbina o osi poziomej, na dole turbina o osi pionowej)

Fig. 1. The turbines configuration on the facade of Center of Energy building
(horizontal axis wind turbine – at the top, vertical axis wind turbine – at the bottom)

TABELA 1. Podstawowe parametry turbiny o poziomej osi obrotu zainstalowanej
na budynku Centrum Energetyki AGH

TABLE 1. The basic parameters of the horizontal axis wind turbine installed on the façade
of AGH Center of Energy building

Parametr	Wartość parametru
Typ	Ventus Energia, Swind New 1500
Prędkość startowa [m/s]	2,3
Moc maksymalna [kW]	1,5
Prędkość nominalna wiatru [m/s]	10
Średnica [m]	2,2
Zmiana kąta łopatek	tak, w zakresie +/- 40 stopni
Zmiana położenia gondoli turbiny względem kierunku	tak, w zakresie +/- 10 stopni
Liczba łopatek	3

świata o ± 10 stopni. Pozwala to na ustawienie turbiny możliwie jak najbardziej prostopadłe do wiejącego wiatru, co przyczynia się do bardziej efektywnej pracy. Prędkość startowa turbiny to 2,3 m/s, a moc maksymalna osiągnięta jest przy prędkości wiatru wynoszącej 10 m/s. Dodatkowo, turbina ta wyposażona jest w sprzęgło elektromagnetyczne, które łączy lub odłącza generator energii elektrycznej przy zadanych w programie prędkościach obrotowych turbiny. Dzięki zastosowaniu sprzęgła rozruch turbiny jest znacznie łatwiejszy, ponieważ do momentu osiągnięcia zadanej prędkości obrotowej turbina obraca się bez obciążenia i po przekroczeniu wartości granicznej następuje załączenie generatora już na pracującej turbinie. Zastosowanie sprzęgła pozwala na bardziej stabilną pracę instalacji.

Ponadto instalacja wyposażona jest w szereg elementów dodatkowych. Podstawowym elementem jest dedykowany system automatyki, który kontroluje pracę turbiny oraz umożliwia zapis wszystkich parametrów instalacji. Instalacja wyposażona jest również w stację meteorologiczną, która ma możliwość pomiaru temperatury i wilgotności powietrza oraz prędkości i kierunku wiatru. Przed turbiną zainstalowane są dwa anemometry, które pozwalają na dokładne określenie prędkości wiatru wiejącego w kierunku turbiny oraz ruchoma matryca składająca się z siedmiu anemometrów za turbiną. Czujniki znajdujące się za turbiną pozwalają na określenie spadku prędkości wiatru za turbiną w różnej odległości od turbiny. Turbina wyposażona jest również w hamulec, tachometr, czujnik drgań, czujnik momentu obrotowego oraz czujnik poziomu natężenia hałasu. Jak można zauważyć, instalacja ta różni się od typowych instalacji turbin wiatrowych ze względu na rozbudowany system gromadzenia i akwizycji danych, jak również zainstalowanych elementów pomocniczych. Instalacja ta nie tylko ma możliwość oddawania energii elektrycznej do sieci elektroenergetycznej, ale również jej magazynowania w akumulatorach oraz pracy ze sztucznym obciążeniem.

Dzięki systemowi automatyki, który reguluje pracę turbin, możliwe jest nastawienie pewnych charakterystycznych parametrów, dla których turbina się wyłącza lub włącza. Istnieje możliwość ustawienia maksymalnej prędkości wiatru, maksymalnej prędkości obrotowej turbin oraz maksymalnego dopuszczalnego poziomu drgań turbiny przy których turbina wyhamowuje.

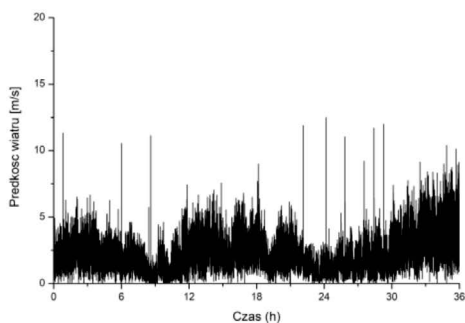
2. Wyniki

Poniżej porównane zostały parametry pracy turbiny o poziomej osi obrotu zarejestrowane w czasie trwania orkanu Grzegorz (od północy 29 października do południa 30 października 2017 r.) z wynikami otrzymanymi bezpośrednio przed wystąpieniem orkanu (okres od północy 27 października do południa 28 października 2017 r.), który odpowiada typowym warunkom pracy turbiny (tzw. okres reprezentatywny).

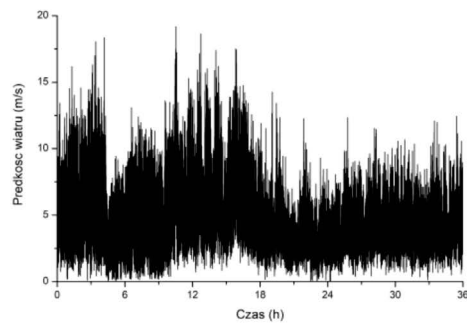
Prędkość wiatru

Prędkość wiatru w rozpatrywanych okresach przedstawiona została na rysunku 2. W okresie porównawczym występowały momenty, w których prędkość wiatru osiągała wartość do 10 m/s, jednakże nie wpływały one na prędkość obrotową turbiny, a co się z tym

Pomiar w okresie porównawczym



Pomiar podczas orkanu Grzegorz



Rys. 2. Prędkość wiatru w rozpatrywanych okresach

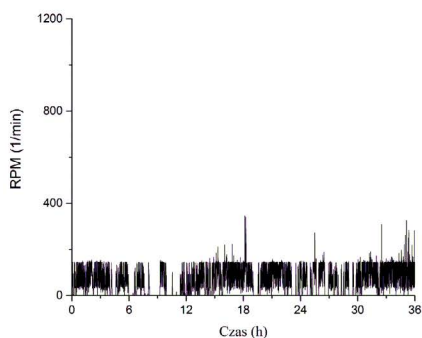
Fig. 2. Wind speed in the analyzed time periods

wiąże, na wielkość produkowanej energii elektrycznej (rys. 3). Średnia prędkość wiatru dla tego okresu to około 2–3 m/s. W przypadku orkanu Grzegorz siła wiatru była znacznie wyższa i jego prędkość zawierała się w zakresie 15–20 m/s, z wartością średnią na poziomie 7,5 m/s. Przełożyło się to znacznie na prędkość obrotową turbiny oraz wielkość produkowanej energii.

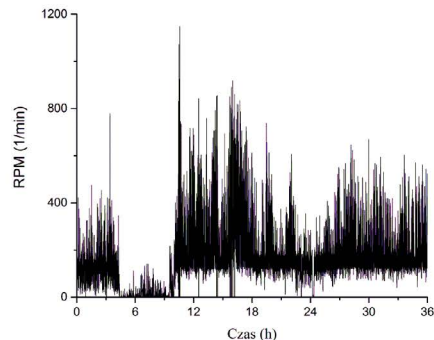
Prędkość obrotowa turbiny

Prędkość obrotowa turbiny w okresie porównawczym wahała się od 0 do 150 obr./min, incydentalnie przekraczając tę wartość i wzrastając chwilowo do niespełna 400 obr./min. Wyraźnie wyższe parametry były osiągnięte przez turbinę wiatrową podczas orkanu Grzegorz, gdzie maksymalna prędkość osiągnęła w szczytowym momencie 1170 obr./min

Pomiar w okresie porównawczym



Pomiar podczas orkanu Grzegorz



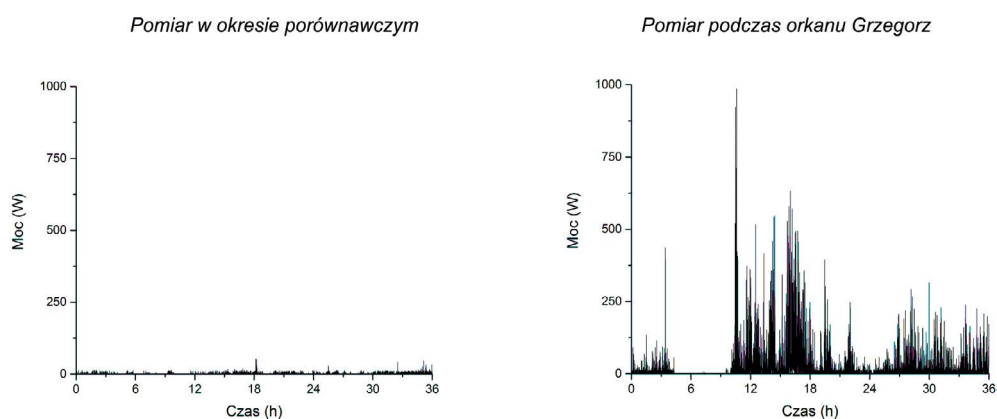
Rys. 3. Prędkość obrotowa turbiny wiatrowej w rozpatrywanych okresach

Fig. 3. Rotation speed of wind turbine in the analyzed time periods

(rys. 3). Prędkość obrotowa turbiny charakteryzowała się w tym czasie dużo większymi wahaniami, związanymi z występowaniem gwałtownych, silnych podmuchów wiatru. Wartość średnia prędkości obrotowej turbiny była w tym okresie 2,6 razy większa niż w okresie porównawczym.

Moc generowana przez turbinę

Następstwem występowania większych prędkości obrotowych turbiny w czasie trwania orkanu Grzegorz była wyraźnie większa moc generowana przez urządzenie w tym okresie. Maksymalna moc chwilowa zmierzona w okresie porównawczym wyniosła 90 W, a więc niespełna 10% w porównaniu do mocy maksymalnej zarejestrowanej podczas orkanu, która wynosiła 1000 W. Średnia moc turbiny wiatrowej pracującej w czasie orkanu była ponad 7 razy większa w porównaniu do okresu poprzedzającego wystąpienie silnych podmuchów wiatru. Przebieg zmian mocy generowanej przez badaną turbinę przedstawiony został na rysunku 4.

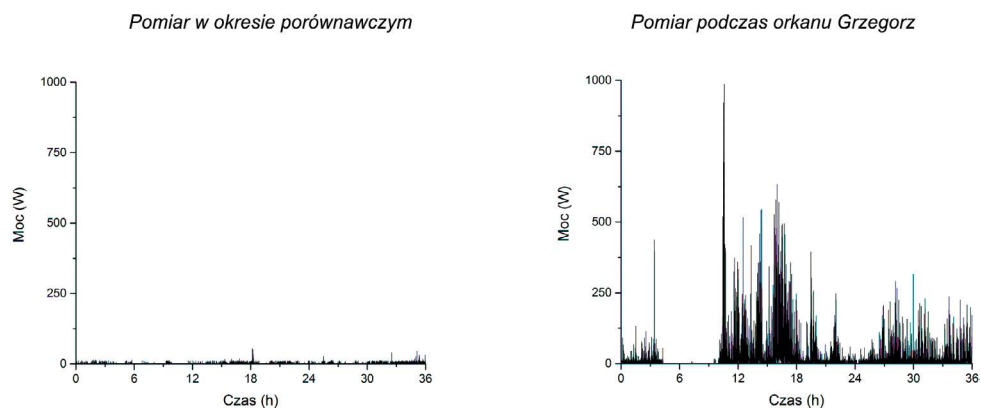


Rys. 4. Moc generowana przez turbinę wiatrową w rozpatrywanych okresach

Fig. 4. Power generated in wind turbine in the analyzed time periods

Hałas wytwarzany przez turbinę

Poziom hałasu wytwarzanego przez turbinę wiatrową jest kolejnym istotnym parametrem oceny pracy urządzenia. Jego poziom związany jest z konstrukcją turbiny oraz prędkością obrotową turbiny – im jest ona wyższa, tym generowany hałas jest większy. Interpretacja tego parametru nie jest prosta w przypadku badanej instalacji, ponieważ wpływ na rejestrowany hałas ma tutaj dodatkowo szum dochodzący z ruchliwej ulicy oraz szum działających na dachu elementów klimatyzacji budynku. Przebieg zmian hałasu rejestrowanego w badanym okresie przedstawiony został na rysunku 5. Średnia wartość hałasu w okresie porów-



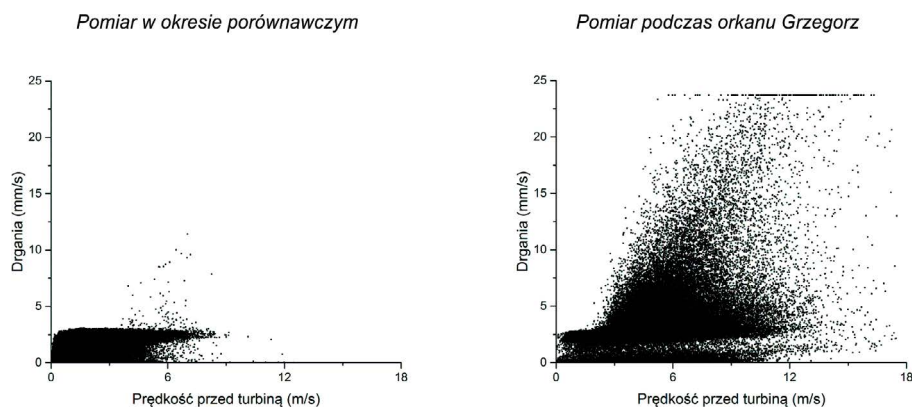
Rys. 5. Hałas generowany przez turbinę wiatrową w rozpatrywanych okresach

Fig. 5. The noise generated in wind turbine in the analyzed time periods

nawczym była równa 61,5 dB, natomiast w czasie występowania orkanu Grzegorz wzrosła do 62,3 dB. Maksymalne osiągnięte wartości chwilowe nie przekroczyły 85 dB.

Drgania wytwarzane podczas pracy turbiny

Wyższa prędkość obrotowa turbiny powoduje powstawanie wyraźnie większych drgań – w okresie porównawczym nie przekraczają one zasadniczo wartości 3 mm/s, natomiast w czasie trwania orkanu Grzegorz dochodzą do 24 mm/s. Należy przy tym zwrócić uwagę, że drgania nie są związane wyłącznie z pracą turbiny wiatrowej, ale również z drganiami własnymi budynku. Zaobserwowano, że drgania związane z pracą turbiny pojawiają się w momencie, gdy prędkość wiatru przekracza 5 m/s. Przebieg zmian mierzonych wartości drgań przedstawiony został na rysunku 6.



Rys. 6. Drgania generowane przez turbinę wiatrową w rozpatrywanych okresach

Fig. 6. Vibrations generated in wind turbine in the analyzed time periods

Podsumowanie

W artykule przedstawiono analizę pracy poziomej turbiny wiatrowej zainstalowanej na elewacji budynku Centrum Energetyki AGH w okresie porównawczym oraz w okresie trwania orkanu Grzegorz. Pomiary dotyczą 36 godzin dla każdego z okresów. W okresie porównawczym nie zaobserwowano znacznych zmian prędkości wiatru, prędkości obrotowej turbiny, hałasu oraz drgań wytwarzanych podczas pracy instalacji. Prędkość wiatru w tym okresie wynosiła średnio około 2–3 m/s, przez co moc generowana przez turbinę była znikoma. Natężenie hałasu zwierało się pomiędzy 55 a 65 dB i pochodziło głównie z szumu urządzeń wentylacyjnych oraz z szumu dochodzącego z ulicy. Drgania w tym przypadku pochodziły głównie z ruchów budynku.

Inaczej sytuacja wyglądała w przypadku orkanu Grzegorz. Prędkość wiatru wynosiła średnio 7,5 m/s co przełożyło się na znacznie wyższą generację mocy (zanotowano siedmiokrotny wzrost średniej mocy, z jaką pracowała turbina wiatrowa). Niestety, jednocześnie pojawiły się problemy z podwyższonym natężeniem hałasu, nawet do 85 dB wyższym niż w okresie porównawczym oraz znaczne drgania turbiny osiągające wartość do 25 mm/s.

Można zaobserwować, że praca analizowanej instalacji jest najbardziej efektywna podczas wysokich prędkości wiatru. Największe moce są generowane w okresach silnych wiatrów, podczas których prędkość wiatru osiąga wartość 5–10 m/s. Jednakże takie zjawiska atmosferyczne występują rzadko w warunkach polskich, przez co instalacja turbiny wiatrowej przez większość czasu pracuje z mocą niższą niż moc zainstalowana. W związku z tym, turbiny zintegrowane z budynkami nie mogą stanowić głównego źródła energii elektrycznej. Mają one charakter pomocniczy do podtrzymywania zasilania najważniejszych urządzeń elektrycznych i elektronicznych lub mogą zostać sprzęgnięte z innymi źródłami energii w postaci systemów hybrydowych i wzajemnie się uzupełniać.

Interesującym zagadnieniem, które powinno zostać podjęte, jest zbadanie wpływu turbulencji wiatru na działanie instalacji turbin wiatrowych – problemy z tym związane najprawdopodobniej znacząco wpływają na sprawność i możliwość do uzyskania energii elektryczną. Ponadto, zbyt duże zawirowania powietrza mogą oddziaływać negatywnie na trwałość turbin, możliwe ich awarie, co również zostanie poddane analizie po dłuższym czasie funkcjonowania instalacji.

Praca realizowana przy użyciu infrastruktury Laboratorium Przemian Energetycznych w Energetyce Odnawialnej Centrum Energetyki AGH.

Praca zrealizowana w ramach prac statutowych Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego Wydziału Energetyki i Paliw AGH oraz w ramach prac statutowych Pracowni Zrównoważonego Rozwoju Gospodarki Surowcami i Energią IGSMiE PAN.

Literatura

- Allouhi A. i in. 2015 – Allouhi, A., Fouig, Y. El., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraoui, Y. i Mourad, Y. 2015. Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. *Journal of Cleaner Production* 109, s. 118–130.
- Bobrova, D. 2015. Building-Integrated Wind Turbines in the Aspect of Architectural Shaping. *Procedia Engineering* 117, s. 404–410.
- Cho i in. 2011 – Cho, K.P., Jeong, S.H., Sari, D.P. 2011. Harvesting wind energy from aerodynamic design for building integrated wind turbines. *International Journal of Technology* 3, s. 189–198.
- Denoon i in. 2008 – Denoon, R., Cochran, B., Banks, D., Wood, G. 2008. Harvesting Wind Power from Tall Buildings. CTBUH 2008, *8th World Congress – Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future, Congress Proceedings*.
- Haase, M. i Lofstrom, E. 2015. *Building augmented wind turbines – BAWT: integrated solutions and technologies of small wind turbines*. Wyd. 1. Oslo. SINTEF Academic Press.
- Perez-Lombard i in. 2008 – Perez-Lombard L., Ortiz J., Pout C. 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40, s. 394–398.
- Ragheb M., 2012. *Wind turbines in the urban environment*. [Online] Dostępne w: <https://www.energybc.ca/> [Dostęp: 17.01.2018].
- Sunderland K. i in. 2013 – Sunderland, K., Woolmington, T., Conlon, M., Blackledge, J. 2013. Small wind turbines in turbulent (urban) environments: A consideration of normal and Weibull distributions for power prediction. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 121, s. 70–81.