Pomiary i analiza hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe

Politechnika Opolska | Opole University of Technology | www.po.opole.pl Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki | Faculty of Electrical Engineering Automatic Control and Informatics | www.we.po.opole.pl



Michał Kozioł

Opole, 2023



Rodzaje emitowanego hałasu

1) Hałas aerodynamiczny 2) Hałas mechaniczny 3) Hałas emitowany przez generatory









Hałas aerodynamiczny

Hałas niskoczęstotliwościowy Hałas w wyniku turbulencji



- Hałas własny przejścia łopaty przez powietrze





Hałas mechaniczny

Przekładnie Skrzynia biegów Napędy do ustawiania turbiny i łopat System chłodzenia

Wyposażenie dodatkowe





Hałas mechaniczny



Źródło: Malec Tomasz: Pomiary i analiza sygnałów infradźwiękowych generowanych pracą turbin wiatrowych dużych mocy, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Rozprawa doktorska, Opole 2016



Generator a/b Lwa = 87,2 dB

Urządzenia dodatkowe a/b $Lwa = 76,2 \, dB$

> Rys. 1. Przykładowe poziomy mocy akustycznej poszczególnych źródeł hałasu wraz z mocą wypadkową oraz zaznaczonymi drogami emisji dla turbiny wiatrowej o mocy znamionowej 2 MW (a/b – powietrzną i s/b – materiałową).





Rys. 2. Przykład widm hałasu turbiny wiatrowej: typu downwind – z wiatrem (lewy rysunek) i typu upwind – pod wiatr (prawy rysunek).

Źródło: Shepherd, K.P., Hubbard, H.H., Infrasound Emission Wind Turbine "Physical Characteristics and Perception of Low Frequency Noise from Wind Turbines". Noise Control Engineering Journal 36(1), 1991, pp. 5 - 15.

Przykładowe widmo hałasu









Powszechnie stosowane metody pomiaru hałasu akustycznych







Rys. 3. Położenie mikrofonu i stacji meteorologicznej względem turbiny wiatrowej, zgodnie ze standardem PN-EN 61400-11.





Stanowisko pomiarowe



(a)

Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego: (a) osłony mikrofonu (zewnętrzne i wewnętrzne); (b) umiejscowienie mikrofonu na płycie odbijającej, gdzie A = 1m.







Stanowisko pomiarowe



Rys 5. Stanowisko pomiarowe: A – zewnętrzna osłona przed wiatrem, B – mikrofon pojemnościowy B&K 4190, C – Karta pomiarowa PULSE LAN-XI type 3050-A module, D – reflective board, E – wewnętrzna osłona przed wiatrem.





Mikrofon pojemnościowy



Rys 6. Mikrofon B&K typ 4190.





Kamera akustyczna



b)

Rys. 7. Kamera akustyczna: widok ogólny urządzenia (a); zdjęcie akustyczne (b).

Źródło: Malec Tomasz: Pomiary i analiza sygnałów infradźwiękowych generowanych pracą turbin wiatrowych dużych mocy, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Rozprawa doktorska, Opole 2016











SYSTEM POMIAROWY INFRA



Badania realizowane m.in. w ramach projektu naukowo-badawczego nr: 2015/17/B/ST8/03371, pt. "Numeryczna i doświadczalna analiza niskoczęstotliwościowych zjawisk akustycznych generowanych podczas pracy turbin wiatrowych, finansowanego przez NCN w ramach konkursu OPUS 9

Narodowe Centrum Nauki



Celem technicznym projektu było m.in. opracowanie i przetestowanie nowej metodologii zastosowanej do pomiaru niskoczęstotliwościowych i akustycznych sygnałów generowanych podczas pracy elektrowni wiatrowej przy użyciu innowacyjnego, mobilnego systemu, który umożliwia bezprzewodową, jednoczesną rejestrację sygnałów w trzech lokalizacjach.



PROJEKT BADAWCZY







Rys. 8. Ogólny schemat funkcjonalny systemu INFRA



System INFRA



Rys. 9. Schemat ogólny stacji bazowej.







Rys. 10. Stacja bazowa: A – stacja pogodowa Vantage Vue 6250EU, B – dookólna antena WI-FI, C – statyw, D – porty komunikacyjne, E - walizka z bezprzewodowym przełącznikiem sieciowym i akumulatorem; F – interfejs stacji pogodowej G – komputer z dedykowanym oprogramowaniem.



System INFRA





Rys.11. Schemat ogólny stacji pomiarowej.



System INFRA





Rys. 12. Stacja pomiarowa: A – walizka transportowa, B – drewniana płyta odbijająca, C – external wind protection, D – antena kierunkowa LineEter 19, E – czujnik kierunku wiatru, F – czujnik prędkości wiatru.





Rys. 13. Stacja pomiarowa: 1 – czujnik prędkości wiatru, 2 – statyw, 3 – walizka transportowa, 4 - czujnik kierunku wiatru, 5 – antena kierunkowa LineEter 19, 6 – akumulator.







Rys 14. Mikrofon GRAS typ 46AZ.

- Frequency range
- Frequency range
- Sensitivity
- Dynamic range lo
- Dynamic range up
- Nominal sensitivi
- Input current (CC





Parameter	Unit	Value
(±1 dB)	Hz	1 – 10 k
(±2 dB)	Hz	0,5 – 20 k
	dB(A)	17
ower limit with GRAS preamplifier	dB	138
pper limit with GRAS preamplifier	mV/Pa	50
rity at 250 Hz	mA	2 - 20
CP)	°C	od -30 do +70

Tabela 1. Podstawowe parametry mikrofonu GRAS 46AZ









Rys. 15. Stacje pomiarowe w terenie



a)

System INFRA



Rys. 16. (a) Badana turbina; (b) rozmieszczenie stacji pomiarowych względem badanej turbiny (WT), stacja pogodowa Davis (WS) system pomiarowy PULS B&K (MS).









METODY ANALIZY I INTERPRETACJI DANYCH





Dane pomiarowe



Rys. 17. Przykładowy przebieg w czasie ciśnienia akustycznego w poszczególnych torach pomiarowych





Dane pomiarowe





Rys. 18. Przykładowe dane meteorologiczne – prędkość wiatru i kierunek wiatru.



Analiza danych

Sygnały akustyczne zarejestrowane podczas pomiarów terenowych zostały poddane analizie w dziedzinie częstotliwości. Sygnały zostały przeanalizowane w zakresie niskich częstotliwości, tj. pasmo częstotliwości od 0,5 Hz do 200 Hz. Ponadto pasmo infradźwięków w zakresie częstotliwości od 0,5 Hz do 20 Hz zostało poddane bardziej szczegółowej analizie. W tym celu wyznaczono gęstości widm mocy (PSD) z zarejestrowanych sygnałów ciśnienia. Częstotliwość próbkowania wynosiła Fs = 51,2 kHz.





Gęstość widmowa mocy (PSD)



Rys. 19. Przykładowe charakterystyki dwuwymiarowe gęstości widmowej mocy (PSD) zebrane z trzech stacji pomiarowych w czasie 70 minut.





Analiza danych



Rys. 20. Przykład rozkładu PSD (Power Spectral Density) z Rys 21. Przykład rozkładu PSD (Power Spectral Density) z jednominutowego sygnału odniesionego do poziomu ciśnienia jednominutowego sygnału odniesionego do poziomu ciśnienia dźwięku (SPL) oraz linii trendu obliczonej przy użyciu modelu dźwięku (SPL) oraz linii trendu obliczonej przy użyciu modelu oraz zmodyfikowanego sygnału. Zakres częstotliwości do 200 Hz. oraz zmodyfikowanego sygnału. Zakres częstotliwości do 40 Hz.











Rys. 22. przykładowy wykres przedstawiający 7 najważniejszych składowych częstotliwości w odfiltrowanym sygnale poziomu ciśnienia dźwięku (SPL).

Analiza danych





CPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (Continuous Wavelet Transform - CWT)

ST_1



Rys. 23. Skalogramy sygnałów infradźwiękowych (CWT) zarejestrowanych przy pracującej turbinie wiatrowej, podczas 5 minutowej serii pomiarowej.

ST_2



ST_3



CPOLE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY **Transformata falek Synchrosqueezed Wavelet Transform (SWT)**

ST_1



Rys. 24. Transformata Falek (SWT) sygnałów infradźwiękowych zarejestrowanych przy pracującej turbinie wiatrowej, podczas 5 minutowej serii pomiarowej.

ST_2



ST_3



OPOLE UNIVERSITY OF **TECHNOLOGY Transformata falek** Synchrosqueezed Wavelet Transform (SWT)



Rys. 25. Histogram dla Transformaty (SWT) sygnałów infradźwiękowych zarejestrowanych przy pracującej turbinie wiatrowej, podczas 5 minutowej serii pomiarowej.





OPOLE UNIVERSITY OF **TECHNOLOGY** Koherencja Transformacji Falek Wavelet Transform Coherence (WTC)

ST_1 i ST_2



Rys. 26. Koherencja falkowa między ciśnieniem akustycznym fal infradźwiękowych zarejestrowanym w poszczególnych lokalizacjach.

ST_1 i ST_3



ST_2 i ST_3



Podsumowanie

- przewodową.
- VV \bullet identyfikowane przy zastosowaniu opracowanych skryptów obliczeniowych.



Wykorzystany podczas badań bezprzewodowy, trzytorowy system pomiarowy umożliwił rejestrację zachodzących zmian emitowanych przez turbinę wiatrową sygnałów niskoczęstotliwościowych, jednocześnie w trzech dowolnych kierunkach, w odległościach do 300 m od miejsca ich generacji. Tego typu pomiary nie są możliwe do przeprowadzenia przy zastosowaniu profesjonalnej aparatury pomiarowej wykorzystującej standardowo komunikację

przebiegach widm zmodyfikowanych, otrzymanych w wyniku zastosowania zaproponowanych procedur przetwarzania zarejestrowanych sygnałów, dla zakresu infradźwięków widoczne są pojedyncze częstotliwości rezonansowe, które występują podczas całych serii pomiarowych. Ich wartości mogą być automatycznie



Możliwe kierunki dalszych prac badawczych

- Nowe podejście do pomiarów i analizy sygnałów akustycznych
- Zastosowanie narzędzi uczenia maszynowego do analizy sygnałów
- Zastosowanie analizy sygnałów akustycznych do diagnostyki online
- Budowa bazy wiedzy





Pomiary i analiza hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe

Politechnika Opolska | Opole University of Technology | www.po.opole.pl Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki | Faculty of Electrical Engineering Automatic Control and Informatics | www.we.po.opole.pl



Michał Kozioł

Opole, 2023

