

## Analiza wpływu czynników zewnętrznych na wyniki pomiarów infradźwięków emitowanych przez turbiny wiatrowe

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki pomiarów i analiz sygnałów niskiej częstotliwości w zakresie od 1 do 10 kHz zarejestrowanych w farmie wiatrowej na południu Polski. W skład elektrowni wchodziło 15 turbin każda o mocy 2,05 MW. W części wynikowej artykułu zostaną przedstawione zależności ilustrujące wpływ zmian prędkości wiatru, a także odległości między punktami rejestracji a turbiną wiatrową na uzyskiwane zależności częstotliwościowe i czasowo-częstotliwościowe.

**Abstract.** The paper presents the results of measurements and analyses of low frequency signals in the range from 1 to 10 kHz recorded in a wind farm in southern Poland. The power plant consisted of 15 turbines each with a capacity of 2,05 MW. In the resulting part of the article the dependencies illustrating the influence of wind speed changes and also distances between the recording stations and the wind turbine on the obtained frequency and time-frequency relationships will be presented. (Analysis of the influence of external factors on the measurement results of infrasounds emitted by wind turbines).

**Słowa kluczowe:** turbina wiatrowa, sygnały infradźwiękowe, analiza czasowo-częstotliwościowa, analiza częstotliwościowa.

**Keywords:** wind turbine, infrasound signals, time-frequency analysis, frequency analysis.

### Wstęp

Problematyka hałasu niskoczęstotliwościowego, w tym infradźwiękowego, generowanego przez pracujące turbiny wiatrowe, sposoby jego pomiaru i analizy oraz ocena uciążliwości dla środowiska naturalnego są zagadnieniami, które nadal wymagają prowadzenia szczegółowych prac badawczych, które są realizowane przez liczne ośrodki naukowe [1-6]. Efektem końcowym powinno być opracowanie referencyjnej metodyki pomiarowej i wskazanie jednoznacznych kryteriów oceny ich dopuszczalnego oddziaływania. Przy czym, w równym stopniu dotyczy to środowiska pracy i osób narażonych zawodowo oraz środowiska otwartego ogólnie dostępnego dla ludzi i zwierząt. W szczególności, że infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy charakteryzują się bardzo dużą długością fali (powyżej 17 m) i przez to są słabo tłumione w przestrzeni, stąd mogą rozchodzić się na duże odległości. W praktyce, w przypadku tak długich fal, skuteczne ich tłumienie wymaga stosowania przegród o wymiarach większych od nich.

Istotnym zagadnieniem, które do tej pory nie zostało w sposób jednoznaczny rozwiązane, jest problem modelowania zjawisk fizycznych towarzyszących formowaniu i propagacji infradźwięków, analogicznie jak to ma miejsce w przypadku sygnałów akustycznych w paśmie słyszalnym, dla których można dodatkowo wyznaczać, wykorzystując liczne dostępne na rynku aplikacje komputerowe, wartości poziomu natężenia dźwięku dla zadanych warunków terenowych i parametrów charakteryzujących sztuczne źródła ich emisji. Poziom wiedzy i zakres poznawczy, w każdej z wymienionych wyżej kwestii, jest dość zróżnicowany, a prezentowane rezultaty często pozbawione są szeregu istotnych informacji, które umożliwiłyby ich obiektywną weryfikację [1-6]. Istnieją teoretyczne opracowania opisujące sposoby generowania fali akustycznej przez łopaty i gondolę turbin wiatrowych oraz jej propagację w przestrzeni otwartej. Zostały opracowane także metody badań hałasu w paśmie słyszalnym, które dopuszczają rozszerzenie pomiarów o pasmo infradźwiękowe [1-7]. Natomiast, brak jest ogólnego i obejmującego wszystkie istotne, z punktu widzenia poznawczego oraz praktycznych zastosowań, aspekty spojrzenia na tą problematykę, w szczególności mając na uwadze dynamikę rozwoju energetyki wiatrowej, zarówno w skali naszego kraju, Europy, jak również niemal całego Świata.

Należy przy tym podkreślić, że kwestie oceny potencjalnego ryzyka i występujących zagrożeń oraz możliwych skutków zdrowotnych dla organizmów żywych, które mogą wynikać z długotrwałego oddziaływania sygnałów o niskiej częstotliwości i wysokiej wartości ciśnienia akustycznego, są często podejmowane przez przeciwników energetyki wiatrowej. Coraz częściej budzą również niepokój społeczności lokalnych mieszkających na obszarach, gdzie pracują lub są planowane lokalizacje pojedynczych turbin i odpowiednio dużych farm wiatrowych.

Podjęte w niniejszym artykule zagadnienia badawcze stanowią kolejny etap prac realizowanych w tym obszarze tematycznym, które są prowadzone od ponad 10 lat przez pracowników naukowo-dydaktycznych Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w Opolu. Ich wyniki były szeroko omawiane w serii artykułów naukowych i referatów konferencyjnych m.in. [8-10], a także prezentowane w ramach realizowanychorzprawy doktorskich, dra inż. Tomasza Malca i mgra inż. Grzegorza Pierzgi. Prowadzone obecnie prace zmierzają m.in. do opracowania modelu matematycznego opisującego proces generacji i propagacji sygnałów infradźwiękowych.

Natomiast, zakres tematyczny artykułu dotyczy przeprowadzenia pomiarów sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową o dużej mocy znamionowej, przy wykorzystaniu nowego systemu pomiarowego. Umożliwia on wykonywanie zsynchronizowanych rejestracji za pomocą trzech niezależnych, bezprzewodowych i tożsamy torów pomiarowych. W szczególności zostanie określony wpływ prędkości wiatru oraz odległości między badaną turbiną wiatrową a miejscem pomiaru sygnałów niskiej częstotliwości na uzyskiwane rezultaty przeprowadzonych analiz w dziedzinie częstotliwościowej i czasowo-częstotliwościowej.

### Charakterystyka badanej turbiny wiatrowej

Badanym obiektem była trójłopatowa turbina wiatrowa niemieckiej firmy REpower typ MM92 o mocy znamionowej 2050 kW, która jest wyposażona w 4-biegunowy generator asynchroniczny dwustronnie zasilany, o napięciu znamionowym 690 V i maksymalnej prędkości obrotowej równej 1800 obr./min. Badana turbina jest zainstalowana w farmie wiatrowej złożonej z 15 jednakowych instalacji REpower MM92. Elektrownia zlokalizowana jest w południowej Polsce, położona jest na obszarze nizinnym i

znajduje się w IV strefie – tzw. mało korzystnej (według terminologii IMiGW z Warszawy), pod względem uzyskiwanych wartości średniorocznych prędkości wiatru (poniżej 4 m/s). W strefie tej szacowana wielkość energii wiatru na wysokości 30 m wynosi średnio 750 kWh/m<sup>2</sup>/rok.

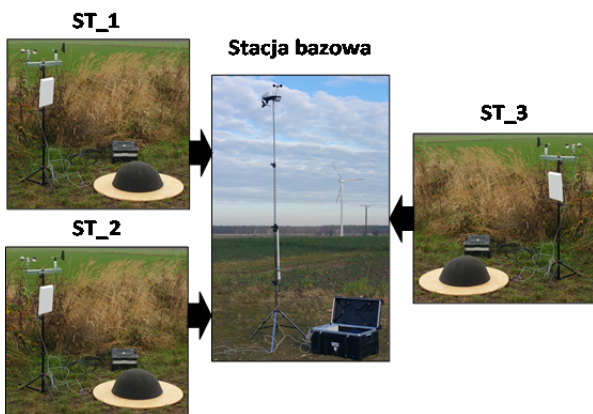
Wirnik turbiny ma średnicę 92,5 m, wysokość wieży wynosi 100 m, a powierzchnia omiatania jest równa 6,720 m<sup>2</sup>. Stąd, gęstość mocy ma wartość 3,33 m<sup>2</sup>/kW. Turbina jest uruchamiana przy prędkości wiatru 3,0 m/s. Natomiast nominalna prędkość wiatru, przy której osiągana jest moc znamionowa wynosi 12,5 m/s i jest stosunkowo wysoka. Ze względów bezpieczeństwa turbina jest automatycznie wyłączana przy prędkości wiatru powyżej 24 m/s. Zakres obrotów wirnika mieści się w przedziale od 7,8 do 15 obr./min. [11].

Turbina ta została w sposób szczegółowy zbadana pod kątem generowanych sygnałów akustycznych w paśmie słyszalnym, a uzyskane w tym zakresie wyniki były m.in. prezentowane w artykule [12] oraz w dokumentacji technicznej producenta [13].

### Charakterystyka układu pomiarowego

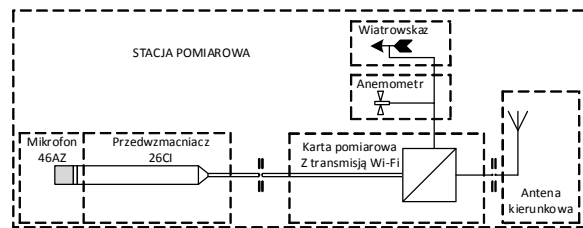
Do rejestracji sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbiny wiatrowe został wykorzystany system pomiarowy o nazwie INFRA firmy KFB ACOUSTICS Sp. z o.o. Spełniał on wszystkie założenia funkcjonalne i parametry techniczne, jakie zostały określone dla potrzeb realizacji badań w ramach projektu naukowo-badawczego pt. „Numeryczna i doświadczalna analiza niskoczęstotliwościowych zjawisk akustycznych generowanych podczas pracy turbin wiatrowych”, nr: 2015/17 / B / ST8 /03371, finansowanego przez NCN w ramach konkursu OPUS 9.

Ogólny schemat ideowy zastosowanego systemu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 1. Umożliwia on jednoczesną i zsynchronizowaną czasowo rejestrację sygnałów akustycznych za pomocą trzech jednakowych torów pomiarowych. Dodatkowo, każda z trzech stacji pomiarowych umożliwia rejestrację kierunku i prędkości wiatru. Rejestrowane dane są bezprzewodowo transmitowane do stacji bazowej, w której są wstępnie archiwizowane.



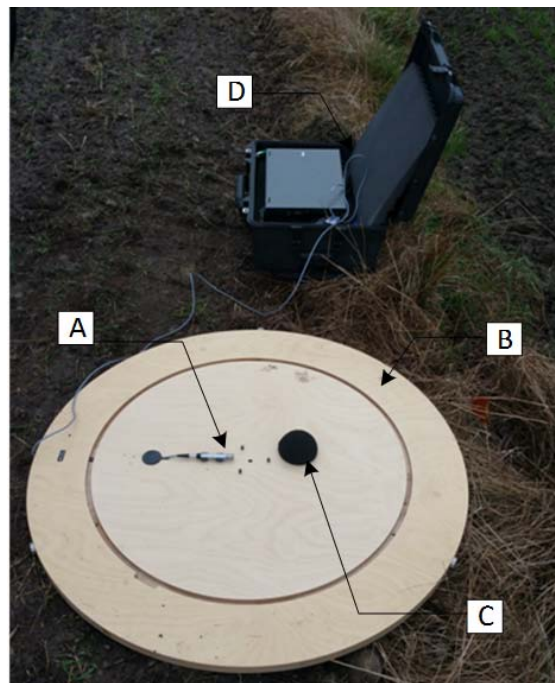
Rys.1. Schemat poglądowy systemu pomiarowego INFRA, gdzie: ST\_1– ST\_3 stacje pomiarowe

Każda stacja pomiarowa złożona jest z następujących modułów funkcjonalnych: mikrofonu z zintegrowanym przedwzmacniaczem, karty pomiarowej, która umieszczona jest w specjalnej walizce odpornej na warunki zewnętrzne i udary mechaniczne, wiatrowskazu, anemometru oraz zewnętrznej anteny kierunkowej Wi-Fi. Schemat ideowy pojedynczej stacji pomiarowej został zilustrowany na rysunku 2.



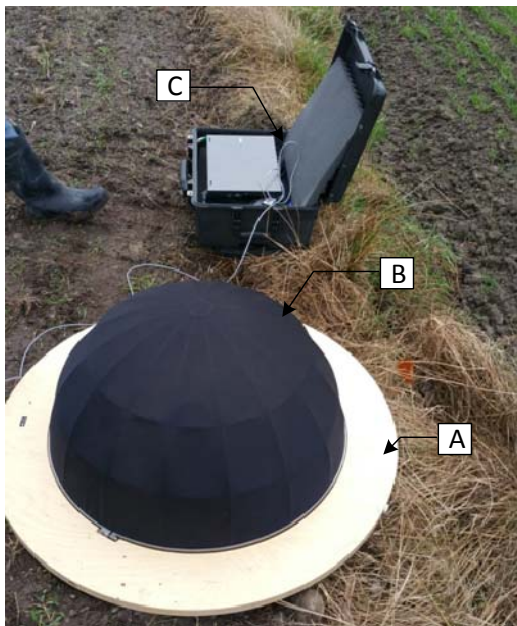
Rys. 2. Schemat ideowy stacji pomiarowej

W każdej stacji pomiarowej zastosowano mikrofon pojemnościowy pola swobodnego firmy GRAS Sound & Vibration A/S typu GRAS 46AZ, który we wspólnej obudowie jest zintegrowany z przedwzmacniaczem typu 26CI. Posiada on praktycznie płaską charakterystykę przenoszenia w paśmie częstotliwości od 0,5 Hz do 20 kHz i stosunkowo dużą wartość czułości równą 50 mV/Pa. Zgodnie z procedurami opisanymi w normie PN-EN 61400-11:2004/A1 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu, podczas pomiarów wykorzystano dwie ochronne osłony przeciwwietrzne (wewnętrzną i zewnętrzną) w celu wyeliminowania wpływu podmuchów wiatru na uzyskiwany wyniki rejestracji. Natomiast mikrofon pomiarowy był umieszczany na drewnianej powierzchni odbijającej w kształcie koła o średnicy 1 m, separującej układ od podłoża (rys. 3 i rys. 4).



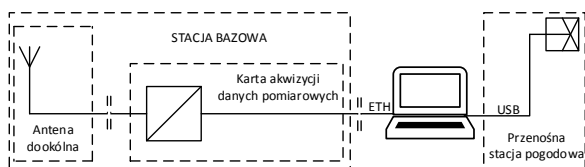
Rys.3. Widok zastosowanego zestawu pomiarowego, gdzie: A – mikrofon B – płyta-odbijająca, C – wewnętrzna osłona przeciwwietrzna, D – walizka pomiarowa

W każdej stacji pomiarowej, do komunikacji bezprzewodowej ze stacją bazową, zastosowano antenę kierunkową firmy Cyberbajt, typ LineEter 19, o zysku energetycznym 19 dBi, która przeznaczona jest do pracy w zakresie częstotliwości od 2,4 do 2,5 GHz. Z walizką pomiarową zostały zintegrowane moduł pomiarowy National Instruments cDAQ-9191 oraz czterokanałowa, 24 bitowa karta pomiarowa NI 9234 wyposażona w filtry antyaliasingowe, której maksymalna częstotliwość próbkowania wynosi 51,2 kS/s.



Rys.4. Widok zastosowanego zestawu pomiarowego, gdzie: A – płyta odbijająca, B – zewnętrzna osłona przeciwwietrzna, C – walizka pomiarowa

W skład stacji bazowej, której schemat ideowy został przedstawiony na rysunku 5, wchodzi następujące elementy funkcjonalne: router Wi-Fi Ubiquiti BULLET M2, który został umieszczony w specjalnej walizce pomiarowej odpornej na wilgoć, zapylenie i uszkodzenia mechaniczne, antena dookólna firmy CyberBajt, typ ProEter10. Podczas rejestracji antena jest instalowana na maszcie teleskopowym na wysokości ok. 2 m, co zapewnia komunikację bezprzewodową ze stacjami pomiarowymi, przy gwarantowanej prędkości transmisji danych równej 100 Mbps+. Zastosowana konfiguracja systemu pomiarowego zapewnia stabilną komunikację stacji bazowej ze stacjami pomiarowymi w terenie otwartym, w promieniu co najmniej 300 m.



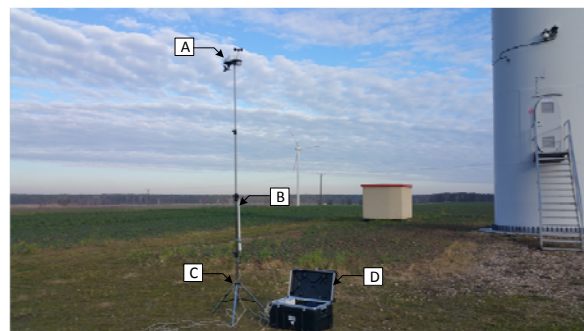
Rys.5. Schemat ideowy stacji bazowej

Ze stacją bazową współpracuje bezprzewodowa stacja pogodowa Vantage Vue 6250EU amerykańskiej firmy Davis.

Posiada ona szereg zewnętrznych czujników pomiarowych, umożliwiających rejestrację podstawowych parametrów charakteryzujących w sposób jednoznaczny aktualne warunki meteorologiczne. Zastosowana stacja pogodowa mierzy temperaturę zewnętrzną powietrza w zakresie od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+65^{\circ}\text{C}$ , z dokładnością  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ ; wilgotność względną powietrza w przedziale od 0 do 100% z dokładnością 1%; ciśnienie atmosferyczne w zakresie od 540 hPa do 1100 hPa, z dokładnością 0,1 hPa; prędkość wiatru w zakresie od 1 m/s do 80 m/s (320 km/h), z dokładnością 0,1 m/s (1 km/h) oraz jego kierunek w zakresie od 0 do  $359^{\circ}$  z dokładnością  $1^{\circ}$ ; a także wielkość ciekłych opadów atmosferycznych w przedziale od 1 do 1016 mm/h, z dokładnością 0,2 mm. Posiada również

dodatkowe funkcjonalności umożliwiające wyznaczenie takich parametrów jak: temperatura punktu rosy, a także wartość temperatury odczuwalnej.

Na rysunku 6 przedstawiono widok stacji bazowej i zastosowanej stacji pogodowej podczas pomiarów, która była umieszczona na 4 metrowym maszcie pomiarowym.



Rys.6. Widok stacji bazowej, gdzie: a – stacja pogodowa, b – antena dookólna, c – maszt pomiarowy; d – walizka pomiarowa z laptopem

Stacje bazowa i pogodowa są podłączone do laptopa DELL Latitude E7270, w którym zainstalowano dedykowane oprogramowanie INFRA v. 1.2 umożliwiające ustawienie parametrów pomiarowych, a także archiwizację i wstępne przetwarzanie rejestrowanych on-line wyników pomiarowych. Na podstawie danych znamionowych zastosowanych przyrządów rejestrujących oszacowano dla całego układu pomiarowego standardową niepewność typu B, która była równa 0,51 oraz obliczono niepewność rozszerzoną typu B, przy założonym przedziale ufności 95,5 %, która wynosiła 0,92.

#### Metodyka wykonywania pomiarów

Badania zostały przeprowadzone późną jesienią, na przełomie listopada i grudnia, podczas pięciu dni. Pomiarów sygnałów niskiej częstotliwości wykonywano w seriach trwających 15 minut, przy zachowaniu stałej prędkości i kierunku wiatru, podczas bezdeszczowej pogody. Mierzoną wielkością fizyczną były czasowe zmiany poziomu ciśnienia akustycznego, które były rejestrowane jednocześnie w trzech torach pomiarowych, przy częstotliwości próbkowania równej 51,2 kS/s. Podczas dni pomiarowych zarejestrowano następujące wartości parametrów pogodowych: średnia wartość prędkości wiatru była w zakresie od 3,1 do 10,8 m/s, ciśnienie atmosferyczne w przedziale od 996,1 do 1002,4 hPa, temperatura powietrza była w zakresie  $5-9^{\circ}\text{C}$ , a jego wilgotność mieściła się w zakresie: 75-87%.

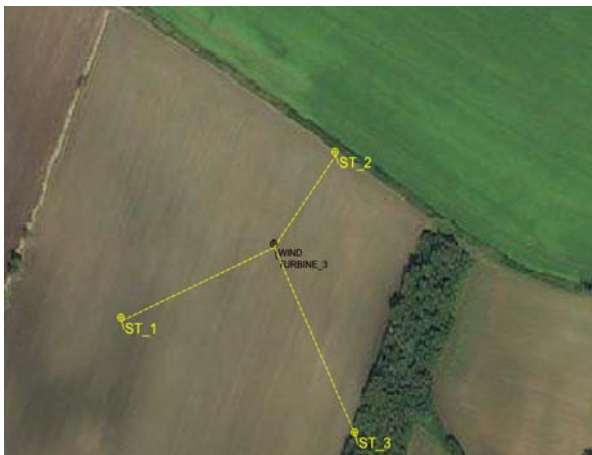
Na rysunku 7 przedstawiono lokalizację badanej turbiny wiatrowej (oznaczenie: WIND\_TURBINE\_3) oraz rozmieszczenie trzech stacji pomiarowych (oznaczenie: ST\_1; ST\_2; ST\_3), które według przyjętych założeń miały mieć kształt symetrycznej gwiazdy trójramiennej.

Należy podkreślić, że wszystkie pomiary zostały wykonane przy pracującej tylko jednej badanej turbinie i unieruchomionych pozostałych. W tym czasie na pozostałych turbinach były prowadzone standardowe prace konserwacyjne i serwisowe.

Przy czym, odległość punktów pomiarowych od turbiny była zmieniana w zakresie od 20 do ok. 210 m, z gradacją co 10 m, w kierunku zgodnym z linią przerywaną. Przyjęte odległości dawały gwarancję, że wszystkie stacje pomiarowe były zlokalizowane na płaskiej powierzchni zaoranego pola uprawnego, a między nimi i badaną turbiną nie było przeszkód terenowych. Dla większych odległości, w



przypadku stacji pomiarowej ST\_3 występowała ściana zagajnika drzew mieszanych. Natomiast w przypadku stacji pomiarowej ST\_2 znajdowała się nieutwardzona droga, a następnie porośnięta trawą łąka, co powodowało brak powtarzalności przestrzeni otwartej rozchodzenia się rejestrowanych fal akustycznych.



Rys.7. Lokalizacja badanej turbiny wiatrowej (WIND TURBINA\_3) i trzech stacji pomiarowych (ST\_1, ST\_2 i ST\_3)

Przed każdą serią pomiarową przeprowadzano kalibrację każdego z trzech torów pomiarowych przy wykorzystaniu kalibratora akustycznego klasy 1 firmy B&K typ 4231, postępując według procedur określonych przez jego producenta. Testowy sygnał miał częstotliwość 1 kHz i poziom 94 dB, o stabilności  $\pm 0,2$  dB. Dodatkowo, w każdym dniu pomiarowym, przeprowadzano pomiary tła akustycznego, przy zatrzymanych wszystkich turbinach. Uzyskane wyniki były odejmowane od wartości rejestrowanych podczas normalnej pracy badanych turbin wiatrowych sygnałów akustycznych. Ponadto, z pomiarów były usuwane serie pomiarowe, podczas których występowały dodatkowe źródła sygnałów niskiej częstotliwości, takie jak poruszające się maszyny rolnicze i specjalistyczne pojazdy wykorzystywane przez leśników, a także samochody wykorzystywane przez osoby serwisujące turbiny wiatrowe.

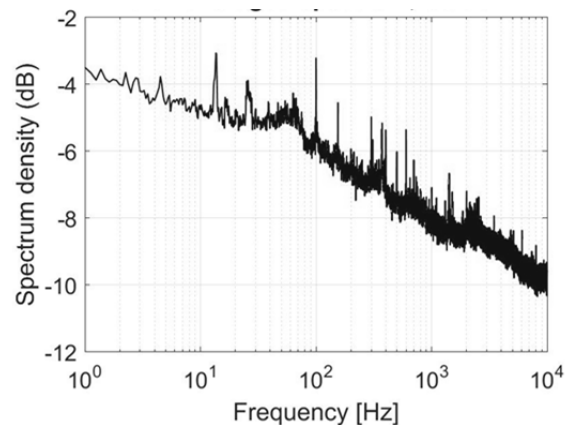
### Wyniki przeprowadzonych analiz

W pierwszym etapie przeprowadzonych analiz zarejestrowane sygnały niskoczęstotliwościowe zostały poddane przekształceniom częstotliwościowym i czasowo-częstotliwościowym. Na rysunkach 8-10 przedstawiono uśrednione przebiegi widm gęstości mocy, które wyznaczono przy zastosowaniu metody Welch, obliczone oddzielnie dla każdego z trzech torów pomiarowych. Zilustrowane widma częstotliwościowe zostały wyznaczone dla odległości 200 m między stacjami pomiarowymi i badaną turbiną i dla prędkości wiatru równej 7,5 m/s, wiejącego

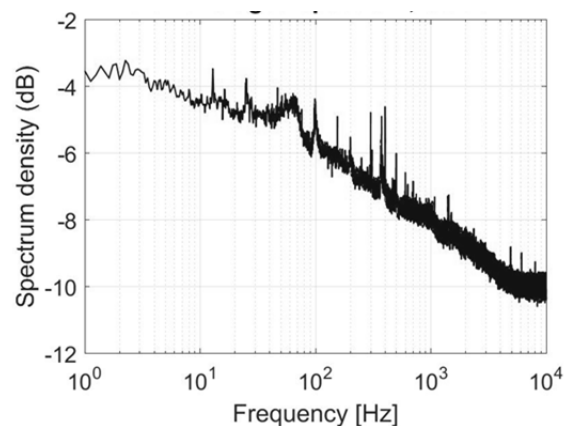
z kierunku północno-wschodniego. Przy czym, przedstawione przebiegi widm zostały wyznaczone dla zakresu częstotliwości od 0,1 Hz do 10 kHz.

Dla obliczonych widm częstotliwościowych wyznaczono krzywą trendu w postaci krzywej aproksymacyjnej  $S(f)$ . Przy czym, w procesie regresji zastosowano Metodę Najmniejszych Kwadratów oraz simpleksową Metodę Nelder-Meada. Otrzymane w ten sposób przebiegi zostały zilustrowane na rysunkach 11-13, na których za pomocą pojedynczych punktów oznaczono obliczone wartości uśrednionego widma gęstości mocy, natomiast linią ciągłą zilustrowano wyznaczoną krzywą regresji  $S(f)$ . Dodatkowo,

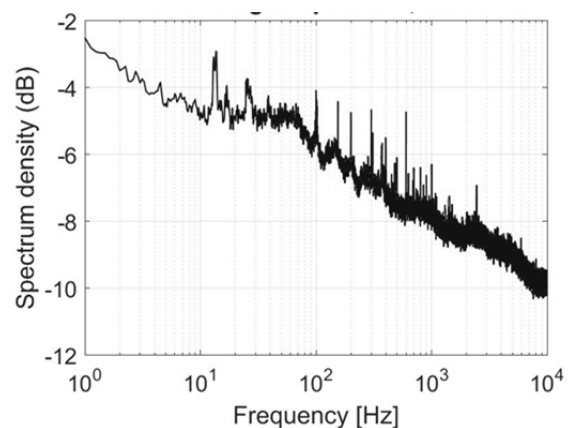
w legendzie każdego z rysunków zamieszczono równanie obliczonego modelu, a także wskaźnik determinacji  $R^2$ , którego wartość obrazuje stopień dopasowania wyznaczonego modelu do rzeczywistych danych.



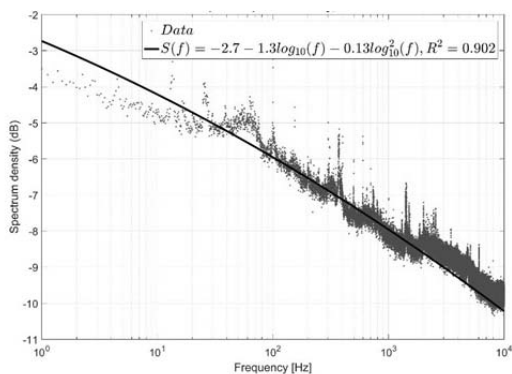
Rys.8. Widmo gęstości mocy sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_1



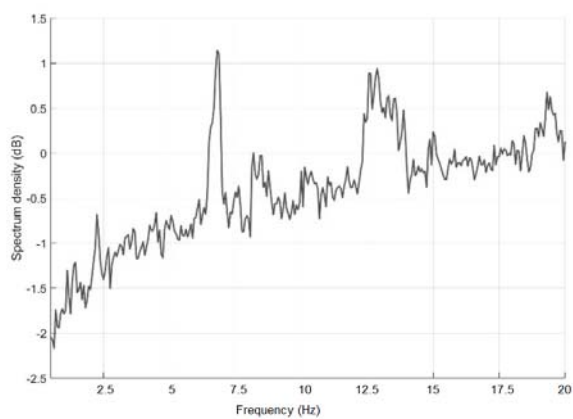
Rys.9. Widmo gęstości mocy sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2



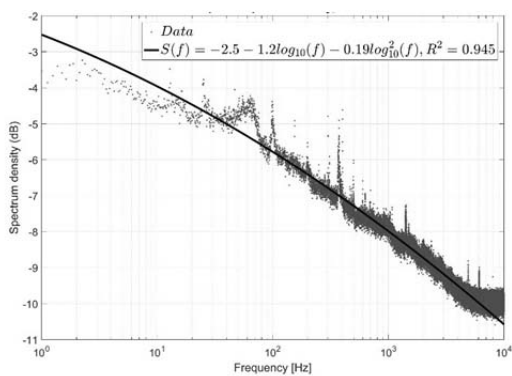
Rys.10. Widmo gęstości mocy sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_3



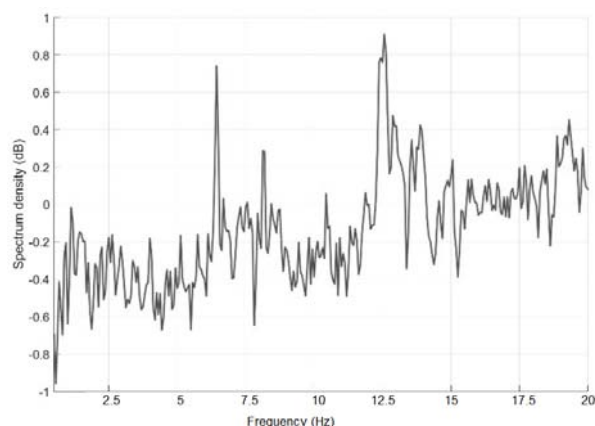
Rys. 11. Widmo gęstości mocy (punkty) i krzywa trendu (linia ciągła) sygnałów niskoczęstotliwościowych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_1



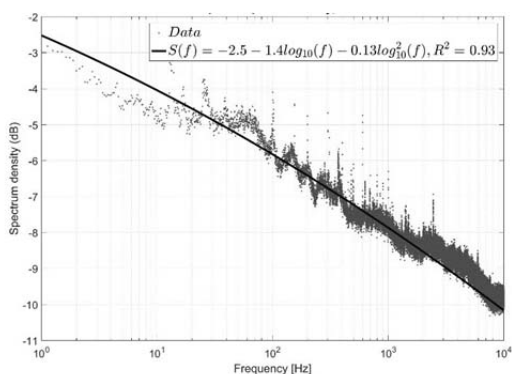
Rys. 14. Zmodyfikowane widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_1



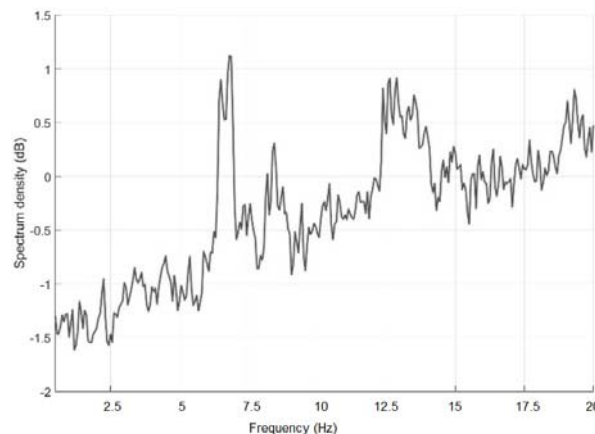
Rys. 12. Widmo gęstości mocy (punkty) i krzywa trendu (linia ciągła) sygnałów niskoczęstotliwościowych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2



Rys. 15. Zmodyfikowane widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2



Rys. 13. Widmo gęstości mocy (punkty) i krzywa trendu (linia ciągła) sygnałów niskoczęstotliwościowych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_3



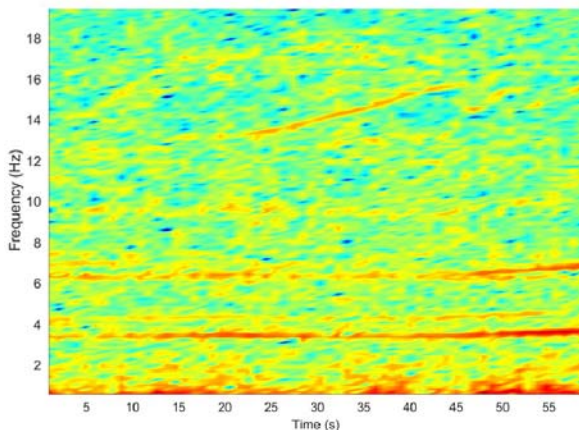
Rys. 16. Zmodyfikowane widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_3

W następnym kroku wykonanych analiz obliczone krzywe trendu odejmowano od wyznaczonych widm gęstości mocy. Jako rezultat uzyskano przebiegi tzw. widm zmodyfikowanych (ang. Detrended Spectrum Density), które przedstawiono na rysunkach 14-16. Przekształcenie to zastosowano celu wyekspozowania użytecznego sygnału odszumianego, co ułatwia dalszą analizę i interpretację uzyskiwanych zależności. Dodatkowo, zawężono zakres prezentowanych częstotliwości do pasma infradźwięków.

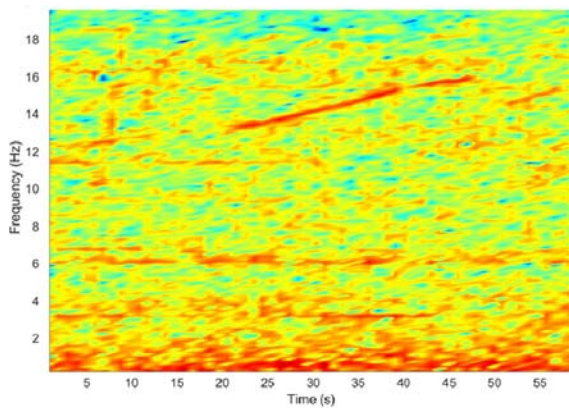
W kolejnym etapie przetwarzania zarejestrowane sygnały zostały poddane krótkoczasowemu przekształceniu Fouriera (ang. STFT), otrzymując obrazy czasowo-częstotliwościowe. W obliczeniach zastosowano okno czasowe Hamminga, które jest obecnie powszechnie stosowane do przetwarzania sygnałów szybkochylnych. Na rysunkach 17-19 przedstawiono otrzymane w ten sposób spektrogramy, które obliczono dla przedziału czasu



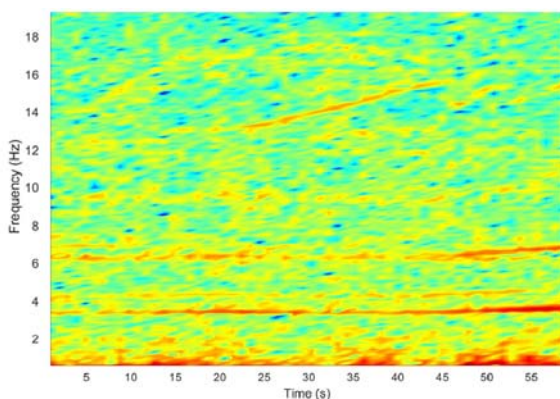
równego 1 min. Przy czym, analizowany przedział czasowy z 15 minutowych rejestracji był wybierany na drodze losowej, a uzyskane obrazy czasowo-częstotliwościowe są takie same w całym analizowanym zakresie czasowym.



Rys.17. Spektrogram sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_1



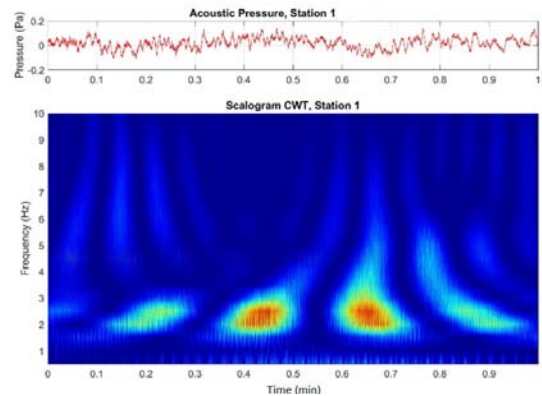
Rys.17. Spektrogram sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2



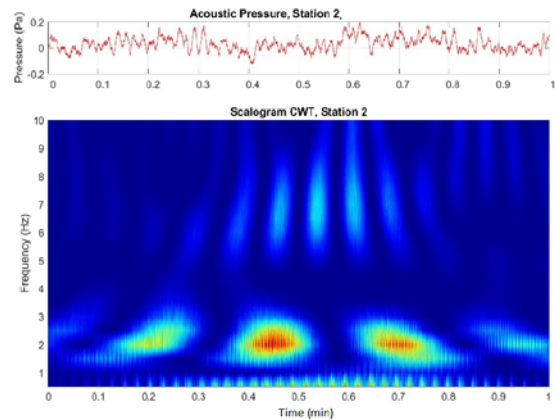
Rys.18. Spektrogram sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_3

Następnie, w ramach przeprowadzonych analiz czasowo-częstotliwościowych, wyznaczono skalogramy przy zastosowaniu ciągłej transformaty falkowej. Jej zastosowanie zwiększa rozdzielczość czasowo-

częstotliwościową, ponieważ daje możliwość użycia wąskich okien obserwacyjnych przy dużych częstotliwościach oraz odpowiednio szerokich dla niskich. Natomiast STFT wykorzystuje różne typy okien obserwacyjnych ale o stałej dla danego typu długości czasowej i w konsekwencji rozdzielczości czasowo-częstotliwościowej, która jest stała w całej płaszczyźnie czasowo-częstotliwościowej. Na rysunkach 18-21 przedstawiono skalogramy wyznaczone dla zarejestrowanych sygnałów w paśmie ograniczonym do 10 Hz, w celu wyeksponowania częstotliwości dominujących, przy wykorzystaniu jako falki bazowej falki Morleta, dla przedziału czasu równego 1 min. Skalogramy zostały uzupełnione o odpowiadające im przebiegi czasowe zmian ciśnienia akustycznego.



Rys.19. Skalogram CWT i zmiany ciśnienia akustycznego sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_1

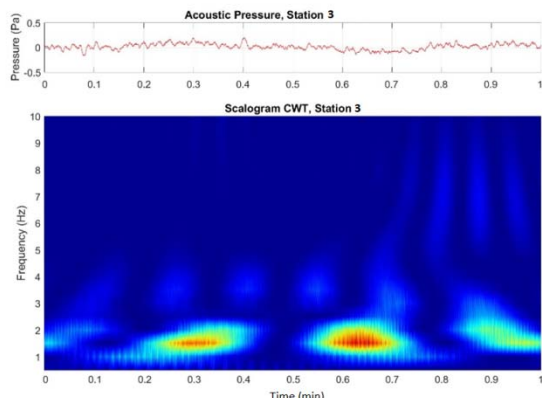


Rys.20. Skalogram CWT i zmiany ciśnienia akustycznego sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2

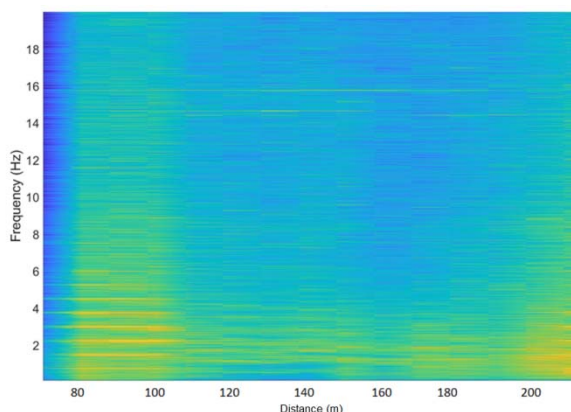
W ramach oceny wpływu odległości miejsca rejestracji sygnałów infradźwiękowych od turbiny wiatrowej obliczono wykresy ilustrujące zmiany częstotliwości w funkcji tej odległości, które obliczono dla każdego z toru pomiarowego oddzielnie i przedstawiono na rysunkach 21-22. Rejestracje wykonano dla tej samej prędkości wiatru równej 7,5 m/s i kierunku północno-wschodniego. Pomiary były wykonywane podczas jednego dnia, przy tym samym ustawieniu gondoli i kąta ustawienia łopatek badanej turbiny wiatrowej.

Należy zaznaczyć, że prędkość wiatru jest podstawowym czynnikiem wpływającym w sposób bezpośredni na poziom ciśnienia akustycznego emitowanych sygnałów przez pracującą turbinę wiatrową.

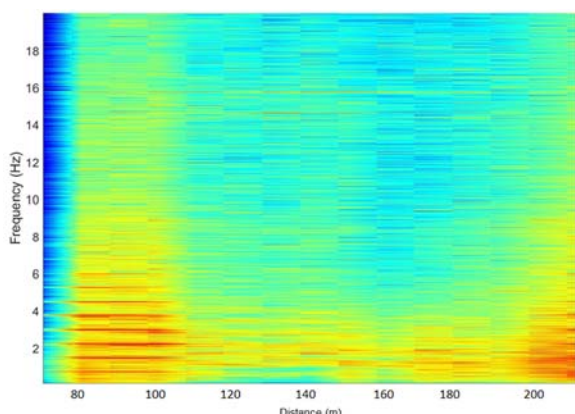
Od jej wartości zależy liczba obrotów wirnika i tym samym wielkość produkowanej przez generator energii elektrycznej. Dodatkowo, w zależności od siły i kierunku wiatru, układy sterujące pracą turbiny, ustawiają optymalny kąt nachylenia obracających się łopat, a także odpowiedni kąt ustawienia gondoli z wirnikiem.



Rys.21. Scalogram CWT i zmiany ciśnienia akustycznego sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_3



Rys.20. Zmiany częstotliwości sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_1 w funkcji odległości między miejscem ich rejestracji i emisji

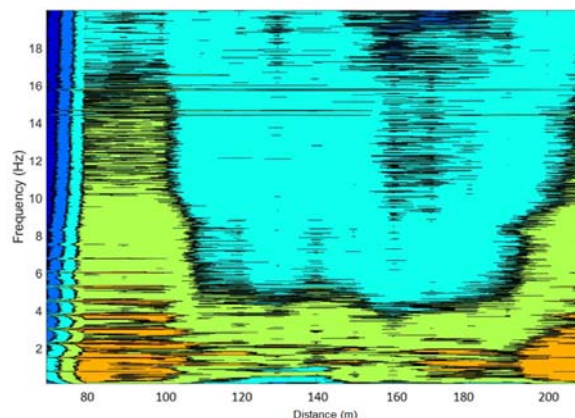


Rys.21. Zmiany częstotliwości sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2 w funkcji odległości między miejscem ich rejestracji i emisji

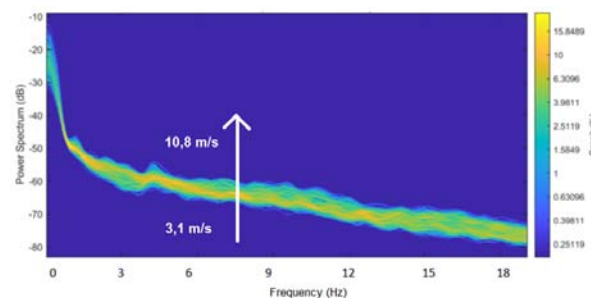
Należy przy tym zauważyć, że wszystkie wymienione wyżej czynniki mogą mieć potencjalny wpływ na poziom emitowanego hałasu, zarówno w paśmie słyszalnym, jak

również w zakresie niskich częstotliwości i może to również dotyczyć to charakterystyk częstotliwościowych.

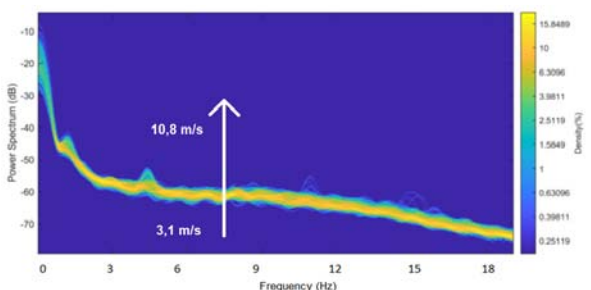
W celu określenia wpływu zmian prędkości wiatru na uzyskiwane wyniki analizy częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych na rysunkach 23-25 przedstawiono widma gęstości mocy obliczone dla prędkości wiatru w zakresie od 3,1 do 10,2 m/s. Zilustrowane charakterystyki zostały wyznaczone osobno dla każdego z trzech torów pomiarowych i dla jednej odległości między turbiną i miejscem pomiaru równej 120 m. Na rysunkach 23-25 zaznaczono sposób zilustrowania poszczególnych widm częstotliwościowych w zależności od prędkości wiatru.



Rys.22. Zmiany częstotliwości sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2 w funkcji odległości między miejscem ich rejestracji i emisji

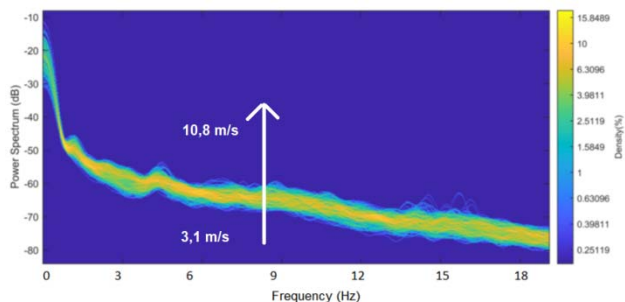


Rys.23. Widma gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_1, przy zmianach prędkości wiatru



Rys.24. Widma gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową REpower typ MM92 zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_2, przy zmianach prędkości wiatru





Rys.25. Widma gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową zarejestrowanych przez stację pomiarową ST\_3, przy zmianach prędkości wiatru

## Podsumowanie

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 przewodową. Należy zaznaczyć, że wykonane badania w sposób jednoznaczny potwierdziły jego praktyczną przydatność do pomiarów przeprowadzanych podczas normalnej eksploatacji instalacji wiatrowych, w często bardzo wymagających warunkach terenowych.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można sformułować następujące wnioski:

- na wyznaczonych widmach gęstości mocy, spektrogramach i skalogramach widoczne są dominujące pasma częstotliwości od 2 do 4 Hz. Zauważalny jest również wzrost mocy dla częstotliwości w zakresie ok. (6 - 8)Hz oraz od ok. 12 do 16 Hz. Należy zauważyć, że największe wartości w widmach występują dla częstotliwości infradźwiękowych. Powyżej częstotliwości 20 Hz następuje gwałtowny spadek wartości gęstości mocy o ponad 6 dB.

- W 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 identyfikowane przy zastosowaniu opracowanych skryptów obliczeniowych w środowisku programistycznym Matlab.

- Uzyskano znaczące wartości współczynnika determinacji  $R^2$  w przedziale od 0,902 do 0,945, które świadczą o dużym stopniu dopasowania wyznaczonych modeli regresyjnych do obliczonych na podstawie zmierzonych sygnałów niskoczęstotliwościowych widm gęstości mocy. Przy czym, analogiczne rezultaty otrzymano dla wyników uzyskanych przy innych prędkościach wiatru oraz dla innych odległości. Dotyczy to zarówno wyznaczonych przebiegów linii trendu, jak również obliczonych wartości  $R^2$ .

- Zmiany prędkości wiatru w zakresie od 3,1 do 10,8 m/s, które zostały zarejestrowane na wysokości 4 m, nie miały wpływu na kształt przebiegów wyznaczonych widm gęstości mocy (rys. 23-25). Analizowany przedział prędkości wiatru dotyczył praktycznie całej krzywej mocy badanej turbiny, począwszy od jej uruchomienia przy prędkości startowej równej 3 m/s, aż do osiągnięcia parametrów znamionowych przy prędkości 12,5 m/s (prędkość na wysokości piasty wirnika czyli na wysokości 100 m). Zwiększenie prędkości wiatru powodowało jedynie wzrost wartości wyznaczonych widm amplitudowych, nie

więcej niż 15 dB. Przy czym, zależności te są tożsame dla danych zarejestrowanych w każdym z trzech torów pomiarowych i są niezależne od kierunku ustawienia wirnika oraz kąta nachylenia łopatek badanej turbiny. Uzyskane zależności zostały również potwierdzone na podstawie wyznaczonego równania krzywej trendu, które ma taką samą postać matematyczną niezależną od prędkości wiatru, dla której wykonywane były rejestracje. Różnica dotyczyła jedynie wartości liczbowych dla poszczególnych parametrów obliczonego równania. Natomiast wartości współczynnika  $R^2$ , obliczone dla kolejnych prędkości wiatru, były większe od poziomu 0,89.

- Zmiana odległości między miejscem rejestracji sygnałów infradźwiękowych, a turbiną wiatrową, w zakresie od 20 do 210 m, nie miała wpływu na wyznaczone zależności częstotliwościowe. Przy czym, największe wartości dla dominujących częstotliwości w widmie uzyskano dla odległości od 80 do 110 m oraz powyżej 160 m, dla każdego z trzech torów pomiarowych.

Prace były współfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki (NCS) w ramach programu OPUS, projekt nr: 2015/17/B/ST8/03371

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Tomasz Boczar; prof. dr hab. inż. Dariusz Zmarzły; dr inż. Michał Koziol; dr inż. Daria Wotzka, Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: t.boczar@edu.po.opole.pl, d.zmarzly@edu.po.opole.pl, m.kozioł@edu.po.opole.pl, d.wotzka@edu.po.opole.pl.

## LITERATURA

- [1] Vincent P., Larssonier, F. Rodrigues D., Durand S., Analytical Modelling and Characterisation of an Infrasound Generator in the Air, *Appl. Acoust.*, 148, (2019), 476–483
- [2] Thorsson P., Persson W. K., Smith M., Ögren M., Pedersen E., Forssén J., Low-frequency Outdoor–Indoor Noise Level Difference for Wind Turbine Assessment, *The J. of the Acoust. Soc. of America*, 143 (2018), n. 3
- [3] Van Kamp I., Van den Berg F., Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-Frequency Sound and Infrasound, *Acous. Australia*, 46 (2018), n. 1, 31–57
- [4] Sedaghatzadeh N., Arjomandi M., Kelso R., Cazzolato B., Ghayesh M. H., Modelling of Wind Turbine Wake Using Large Eddy Simulation, *Renew. Energ.*, 115 (2018), 1166–1176
- [5] Sugimoto, T., Koyama, K., Kurihara, Y., Watanabe, K., Measurement of Infrasound Generated by Wind Turbine Generator, *SICE Annual Conference, The University of Electrocommunications, Japan* (2018)
- [6] Zajamsek B., Hansen K. L., Doolan C. J., Hansen C. H. (2016) Characterisation of Wind Farm Infrasound and Low-Frequency Noise, *J. of Sound and Vibration*, 370(2016), 176–190
- [7] Zagubień A., Wolniewicz K., "Home Sources of Low Frequency Noise, *Annu. Set Environ.*, 19 (2017), 682–693.
- [8] Boczar T., Malec T., Wotzka D., Studies on Infrasound Noise Emitted by Wind Turbines of Large Power, *Acta Phys. Pol. A*, 122, (2012), n. 5, 850-853.
- [9] Pierzga R., Boczar T., Wotzka D., Zmarzły D., Studies on Infrasound Noise Generated by Operation of Low-Power Wind Turbine, *Acta Phys. Pol. A*, 124, (2013), n. 3, 542-545
- [10] Malec T., Boczar T., Wotzka D., Frańcz P., Comparison of Low Frequency Signals Emitted by Wind Turbines of Two Different Generator, *E3S Web Conf. Inter. Conf. Eneq., Envi. and Mat. Sys.*, 19 (2017)
- [11] Repower MM92 Product Description, [http://www.windparkferrum.nl/files/dec2016/Bijlage\\_2-2\\_Specificaties\\_Turbines\\_4.pdf](http://www.windparkferrum.nl/files/dec2016/Bijlage_2-2_Specificaties_Turbines_4.pdf)
- [12] Kłaczyński M., Wszolek T., Acoustic Study of REpower MM92 Wind Turbines During Exploitation, *Arch. of Acou.*, 39 (2014), n.1, 3-10.
- [13] Repower MM92 Power Curve & Sound Power Level [http://ventderaison.eu/estaimpuis/estaimpuis\\_eie\\_windvision\\_2\\_012/Annexes/Annexe\\_S1\\_Courbes\\_acoustique\\_MM92\\_E-82\\_E2,\\_V100.pdf](http://ventderaison.eu/estaimpuis/estaimpuis_eie_windvision_2_012/Annexes/Annexe_S1_Courbes_acoustique_MM92_E-82_E2,_V100.pdf)