

Tomasz MALEC, Tomasz BOCZAR, Daria WOTZKA

POLITECHNIKA OPOLSKA, WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI AUTOMATYKI I INFORMATYKI, INSTYTUT ELEKTROENERGETYKI,
Prószkowska 76, 45-758 Opole

Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe różnych mocy

Mgr inż. Tomasz MALEC

Absolwent Politechniki Wrocławskiej na specjalizacji akustyka. Pracujący w firmie zajmującej się ochroną środowiska przed hałasem, gdzie zajmuje się pomiarami hałasu oraz opracowywaniem ocen, sprawozdań i raportów w dziedzinie akustyki środowiska. Autor wielu ocen i raportów oddziaływania na środowisko projektowanych i istniejących farm wiatrowych. W chwili obecnej także uczestnik studiów doktoranckich na Politechnice Opolskiej.



e-mail: tmalec@autograf.pl

Prof. dr hab. inż. Tomasz BOCZAR

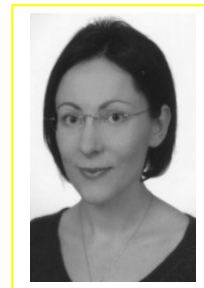
Kierownik Katedry Wysokich Napięć na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Autor lub współautor około 300 publikacji z zakresu szeroko pojętej elektrotechniki, elektroenergetyki, odnawialnych źródeł energii i metod diagnostycznych układów izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych, w tym ponad 40 artykułów z tzw. listy filadelfijskiej, 4 monografii autorskich, 2 monografii współautorskich, 3 książek i 1 skryptu. Ponad 120 cytowań w literaturze krajowej i światowej, indeks Hirscha: 6.



e-mail: tboczar@gmail.com

Dr inż. Daria WOTZKA

W 2008 roku ukończyła studia na kierunku informatyka na Technische Universität Berlin. W 2011 roku uzyskała stopień doktora nauk technicznych w dyscyplinie elektrotechnika na Wydziale Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w Opolu. Jej zainteresowania badawcze związane są głównie z modelowaniem i symulacją sygnałów emisji akustycznej generowanych przez wyładowania elektryczne w układach izolacyjnych urządzeń elektroenergetycznych.



e-mail: daria.wotzka@gmail.com

Keywords: wind turbines, noise, infrasound.

1. Wprowadzenie

Problem hałasu infradźwiękowego generowanego przez zarówno nowe, jak również o długim czasie eksploatacji turbiny wiatrowe, sposoby jego pomiaru i ocena uciążliwości, są zagadnieniami, które wymagają prowadzenia nadal szczegółowych badań oraz określenia w sposób jednoznaczny referencyjnej metodyki ich analiz. Poziom wiedzy, na każdym z wymienionych wyżej aspektów, jest dość zróżnicowany [1-5]. Ponadto brak jest ogólnego i obejmującego wszystkie szczegółowe zagadnienie spojrzenia na problematykę oddziaływania hałasu infradźwiękowego na szeroko pojęte środowisko naturalne. Istnieją teoretyczne opracowania opisujące sposoby generowania fali akustycznej przez łopaty i gondolę turbiny oraz jej propagację w przestrzeni otwartej [6]. Istnieją także metody badań hałasu w paśmie słyszalnym, które dopuszczają rozszerzenie pomiarów o zakres infradźwięków [7, 8]. Natomiast ocenę uciążliwości hałasu infradźwiękowego przeprowadza się jedynie na stanowiskach pracy [9]. W ramach badań podjęto próbę określenia poziomu hałasu infradźwiękowego generowanego pracą nowoczesnych turbin wiatrowych, w oparciu o założenia normy PN-EN 61400-11. Norma ta pozwala w sposób powtarzalny określić poziom mocy akustycznej turbiny wiatrowej dla różnych prędkości wiatru (w praktyce od 5 do 10 m/s). Wykonanie pomiarów zgodnie z normą umożliwia wyznaczenie poziomu mocy akustycznej w zakresie częstotliwości słyszalnych (od 50 Hz do 10 000 Hz) z uwzględnieniem tonalności i kierunkowości (opcjonalnie). Norma w sposób szczegółowy definiuje wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, procedur pomiarowych, sposobów analizy wyników pomiarów, oceny niepewności uzyskiwanych rezultatów oraz rejestrowanych danych. Norma dopuszcza także rozszerzenie zakresu badań o infradźwięki (Annex A.2) ale nie definiuje dokładnie sposobu jego pomiaru. W przeprowadzonych badaniach skupiono się jedynie na pomiarze poziomu ciśnienia akustycznego, nie przeliczając go na poziom mocy akustycznej. Podejście takie pozwala określić zakres potencjalnego oddziaływania infradźwięków bezpośrednio w miejscu uytuowania punktu pomiarowego. Równocześnie z pomiarem poziomu ciśnienia akustycznego prowadzono, zgodnie z założeniami norm [7, 8], pomiary prędkości i kierunku wiatru, a także innych podstawowych parametrów meteorologicznych. Zakres wykonanych analiz objął wyznaczenie przebiegów obrazujących zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości (widma amplitudowe) i w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej (spektrogramy). W celach porównawczych charakterystyki wyznaczono oddzielnie dla dwóch badanych turbin i dla wybranych trzech wartości prędkości wiatru.

Streszczenie

W ramach artykułu przedstawiono wyniki analizy porównawczej poziomu ciśnienia akustycznego hałasu infradźwiękowego generowanego przez dwie turbiny wiatrowe dużych mocy tj. fabrycznie nowej REPOWER typ MM92 o mocy elektrycznej 2 MW i eksploatowanej od pięciu lat Vensys typ 62 o mocy elektrycznej 1,2 MW. W części wynikowej przedstawiono przebiegi widm częstotliwościowych i spektrogramów, które wyznaczono dla zarejestrowanych sygnałów niskoczęstotliwościowych. W celach porównawczych charakterystyki obliczono oddzielnie dla badanych turbin z uwzględnieniem m/s. Pozwoliło to określić wielkość oddziaływania infradźwiękowego badanych turbin i zbadać czy na kształt widm emitowanego hałasu wpływa prędkość wiatru oraz konstrukcja, typ i czas eksploatacji badanych turbin. Uzyskane z pomiarów wielkości zostały odniesione i porównane z wartościami granicznymi określonymi w obowiązujących w tym zakresie normami.

Słowa kluczowe: turbiny wiatrowe, hałas, infradźwięki.

Comparative analysis of infrasound noise emitted by wind turbines of various power

Abstract

The subject area of this paper is infrasound signals generated by work of modern wind turbines. Measurements of infrasound noise were taken in accordance with the PN-EN 61400-11:2002 [7] and PN-EN 61400-11:2004/A1 [8] standards. A comparative analysis of the measurement results of the infrasound noise generated by two types of high-power wind turbines i.e. REPOWER MM92 of electric power 2 MW and Vensys 62 of electric power of 1.2 MW is presented in the paper. The first studied turbine is brand new and the other has been in operation for five years. The aim of the analyzes was to determine the frequency spectra of the recorded infrasound signals (Figs. 6, 7, 10, 13, 16) and to calculate the corresponding spectrograms (Figs. 8, 9, 11, 12, 14, 15). For comparative purposes, the characteristics presented in this paper, were calculated separately for the analyzed turbines taking into account three selected values of wind speed: 5. m/s, 6.3 m/s and 7.6 m/s. On the basis of the obtained results the influence of wind speed changes on the generated levels of low-frequency acoustic signals was determined. Then, the dependencies obtained from measurements were referred and compared to the limits defined in the appropriate standards.

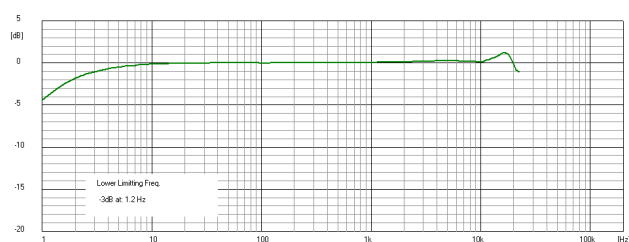
2. Charakterystyka badanych turbin i aparatury pomiarowej

Pierwszym badanym obiektem była fabrycznie nowa turbina wiatrowa REPOWER typ MM92 o mocy elektrycznej 2 MW (Turbina 1), wchodząca w skład nowo oddanej do eksploatacji farmy wiatrowej składającej się z 15 jednakowych jednostek prądowców, o sumarycznej mocy elektrycznej równej 30 MW. Średnica łopat turbiny wynosiła 92 m, a wysokość wieży 80 m. Do badań wybrano skrajnie stojącą turbinę, w ten sposób zminimalizowano wpływ hałasu niskoczęstotliwościowego emitowanego przez pozostałe generatory.

Drugim badanym obiektem była pojedyncza turbina wiatrowa firmy Vensys typ 62 o mocy elektrycznej 1,2 MW (Turbina 2), która była eksploatowana od 5 lat. Średnica łopat silnika wiatrowego wynosiła 62 m, a wysokość wieży 69 m.

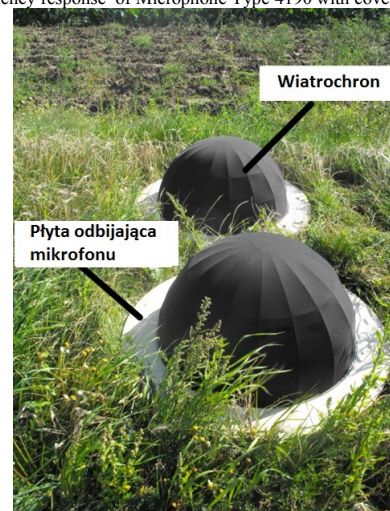
Pomiary przeprowadzono przy wykorzystaniu zestawu pomiarowego firmy Brüel & Kjær składającego się z mikrofonu typ 4190, zaprojektowanego do bardzo dokładnych pomiarów w polu swobodnym, który podłączono do miernika LAN-XI typ 3050-A-060 należącego do typoszeregu przyrządów PULSE. Jest to profesjonalne narzędzie wykorzystywane do pomiarów ciśnienia akustycznego, natężenia dźwięku, a także drgań. Jego możliwości implementacyjne są bardzo szerokie począwszy od typowych badań akustycznych, takich jak pomiary hałasu, wyznaczanie poziomu mocy akustycznej, wykonywanie map hałasu przy użyciu techniki beamformingu, badanie właściwości akustycznych materiałów i wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń, a skończywszy na specjalistycznych badaniach akustycznych, takich jak: diagnostyka maszyn, analiza modalna oraz badania elektroakustyczne przetworników akustycznych. W przypadku używanego zestawu, zakres mierzonych częstotliwości zawierał się w przedziale od 1,2 Hz do 20 kHz, dla których charakterystyka przenoszenia jest liniowa w zakresie ± 3 dB (rys. 1). Wykorzystane podczas pomiarów mikrofony były umieszczone na wykonanych zgodnie z założeniami norm [7, 8] drewnianych płyt odbijających i osłoniętych przed wiatrem specjalnymi kopułami (rys. 2). Warunki meteorologiczne mierzono za pomocą stacji pogodowej DAVIS Instrument – Vantage Pro2. Wyposażona jest ona w zespół zintegrowanych czujników, a transmisja rejestrowanych danych do komputera odbywa się bezprzewodowo na drodze radiowej. Zakres pomiarowy elektronicznego termometru był w przedziale od -40°C do $+65^{\circ}\text{C}$, przy dokładności równej $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Pomiar wartości ciśnienia atmosferycznego wykonywany był z dokładnością ± 1 hPa w zakresie (810-1080) hPa. Pomiary wilgotności przeprowadzono za pomocą zewnętrznego czujnika wilgotności względnej powietrza, umożliwiającego rejestrację w zakresie od 0 do 100%, z dokładnością 3%. Zastosowany anemometr umożliwiał pomiar prędkości przepływu powietrza w zakresie (0-68) m/s, z dokładnością $\pm 0,2$ m/s.

Miernik B&K LAN-XI umożliwia prowadzenie badań w szerokim zakresie częstotliwości i dla różnych konfiguracji układów pomiarowych. Dodatkowo wyposażony jest w specjalistyczne oprogramowanie PULSE LabShop, które było wykorzystywane do archiwizacji i wstępnego przetwarzania zarejestrowanych danych. Natomiast do analizy zmierzonych sygnałów zastosowano procedury numeryczne napisane w środowisku programistycznym MATLAB.



Rys. 1. Charakterystyka przenoszenia mikrofonu typ 4190 z osłoną dla kierunku 0°

Fig. 1. Frequency response of Microphone Type 4190 with cover for direction 0°



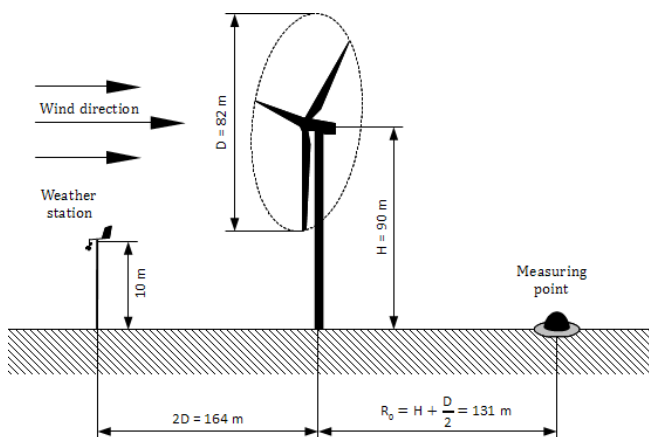
Rys. 2. Widok płyt odbijających i wiatrochronów dla zastosowanych mikrofonów
Fig. 2. View of the reflective boards and windscreens for the microphones used

Pomiary poziomu ciśnienia akustycznego hałasu niskoczęstotliwościowego generowanego przez badane turbiny wykonano w jednym punkcie referencyjnym, zgodnie z zaleceniami norm [7, 8]. Rozmieszczenie poszczególnych elementów układu pomiarowego względem badanej turbiny przedstawiono w sposób poglądowy na rys. 3, a ich rzeczywistą lokalizację zilustrowano na rys. 4, 5. Równocześnie z pomiarami poziomu akustycznych sygnałów niskoczęstotliwościowych wykonywano rejestrację parametrów meteorologicznych, a w szczególności prędkości i kierunku wiatru, w celu ich późniejszego skorelowania. Podczas pomiarów prędkość wiatru ulegała dużym zmianom w przedziale wartości od 1 m/s do 10 m/s, co umożliwiło przeprowadzenie, w stosunkowo szerokim zakresie, analizy jego wpływu na poziom infradźwięków generowanych przez badane turbiny. Pozostałe parametry meteorologiczne utrzymywały się na stałym poziomie i nie ulegały znaczącym zmianom podczas pomiarów. Ich wartości: maksymalne, minimalne, średnie i odchylenie standardowe (wyrażone w procentach) przedstawiono w tabeli 1. Największą wartość odchylenia standardowego uzyskano dla prędkości wiatru, ponieważ podczas pomiarów występowała duża zmienność tego parametru. W konsekwencji umożliwiło to przeprowadzenie analizy wpływu wartości prędkości wiatru na rejestrowane poziomy ciśnienia akustycznego generowanych sygnałów akustycznych.

Tab. 1. Zestawienie wartości parametrów meteorologicznych występujących podczas pomiarów (T1 – Turbina 1; T2 – Turbina 2)

Tab. 1. Meteorological parameters during the measurements (T1 – Turbine 1, T2 – Turbine 2)

Mierzony parametr	Wartość maksymalna		Wartość minimalna		Wartość średnia		Odchylenie standardowe [%]	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
Temperatura $^{\circ}\text{C}$	24,8	5,9	17,1	5,1	21,2	5,6	11,0	4,5
Wilgotność [%]	71	79	44	75	56,5	77,5	13,3	1,3
Punkt rosy $^{\circ}\text{C}$	13,2	2,3	11,2	1,6	12,0	2,0	3,3	9,8
Ciśnienie [hPa]	1001,6	1021,9	1000,2	1021,2	1000,8	1021,5	0,0	0,0
Prędkość wiatru [m/s]	7,6	9,8	1,3	3,6	4,8	6,2	28,1	19,1
Opady [mm]	0	0	0	0	0	0	-	-



Rys. 3. Schemat poglądowy rozmieszczenia elementów układu pomiarowego względem badanej turbiny wiatrowej

Fig. 3. Schematic diagram of the measuring system element arrangement in relation to the tested wind turbine



Rys. 4. Widok punktów pomiarowych sygnałów niskoczęstotliwościowych – Turbina 1

Fig. 4. View of the measurement points of the low frequency signals – Turbine 1



Rys. 5. Widok punktów pomiarowych sygnałów niskoczęstotliwościowych – Turbina 2

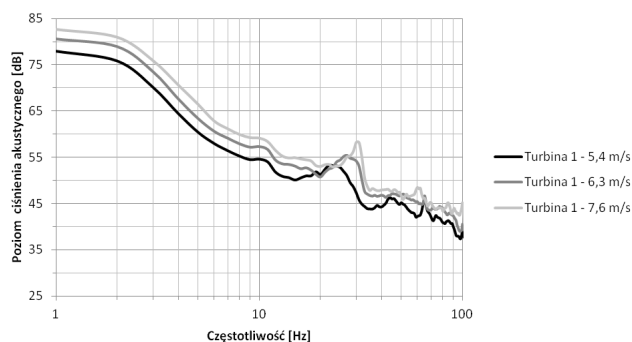
Fig. 5. View of the measurement points of the low frequency signals – Turbine 2

3. Analiza otrzymanych wyników

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej poziomu ciśnienia akustycznego generowanego przez badane turbiny hałasu infradźwiękowego dokonano wyboru trzech wartości charakterystycznych prędkości wiatru tj.: 5,4 m/s, 6,3 m/s i 7,6 m/s, które w sposób reprezentatywny obrazują zakres rejestrowanych zmian. Przebiegi uśrednionych widm częstotliwościowych wyznaczonych dla badanych turbin przedstawiono odpowiednio na rys. 6 (Turbina 1) i na rys. 7 (Turbina 2). Otrzymane zależności uzyskano poprzez obliczenie średniej arytmetycznej oddzielnie dla wszystkich wartości ciśnienia akustycznego, które zarejestrowano dla danej prędkości wiatru. Wyznaczone wartości wyrażono w decybelach odnosząc je względem progu słyszenia tj. $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

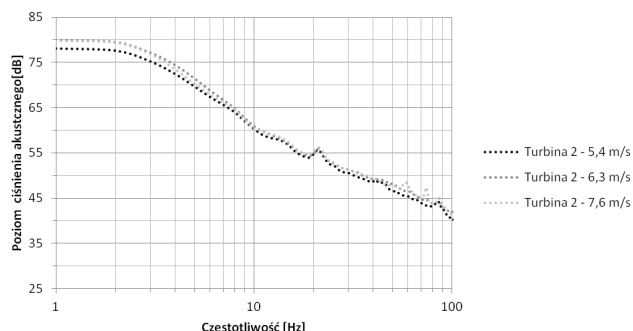
W przypadku Turbiny 1 zwiększenie prędkości wiatru powoduje widoczny wzrost poziomu ciśnienia akustycznego generowanego hałasu, dotyczy to całego badanego zakresu częstotliwości. Przy czym największa wartość mierzonych sygnałów występuje w paśmie infradźwiękowym (od 1 do 20 Hz). Wraz ze wzrostem częstotliwości wartość ciśnienia akustycznego zmniejsza się w sposób zbliżony do liniowego. W obliczonych widmach amplitudowych można wyróżnić kilka charakterystycznych składowych harmonicznych. Pierwsza z nich, której poziom był największy, znajduje się w paśmie od 20 do 30 Hz. Jej położenie skorelowane jest z prędkością wiatru. Dla mniejszych wartości maksimum poziomu ciśnienia akustycznego znajduje się przy częstotliwości 20 Hz. Natomiast wraz ze wzrostem prędkości wiatru maksimum to przesuwa się w kierunku wyższych częstotliwości i największą częstotliwość (ok. 30 Hz) osiąga dla prędkości wiatru równej 7,6 m/s.

W przypadku Turbiny 2 można stwierdzić znacznie mniejszy wpływ zmian prędkości wiatru na poziom rejestrowanego ciśnienia akustycznego generowanych sygnałów akustycznych w całym analizowanym paśmie częstotliwości. Obserwowane zmiany, dla przyjętych prędkości wiatru, są rzędu kilku decybeli i nie są tak wyraźne jak dla Turbiny 1. Jednakże, niezależnie od wartości prędkości wiatru, największy poziom rejestrowanego ciśnienia akustycznego występuje w paśmie infradźwiękowym (od 1 do 20 Hz). Uzyskano także podobny charakter zmian rejestrowanego poziomu hałasu wraz ze wzrostem częstotliwości. W wyznaczonym widmie wyróżnić można także kilka składowych harmonicznych, których wartości są mniejsze niż w przypadku turbiny 1. Podobnie jak dla turbiny 1, harmoniczna o największej wartości występuje przy częstotliwości ok. 20 Hz, a jej położenie jest niezależne od prędkości wiatru.



Rys. 6. Uśrednione widma amplitudowe sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową wyznaczone dla różnych prędkości wiatru - Turbina 1

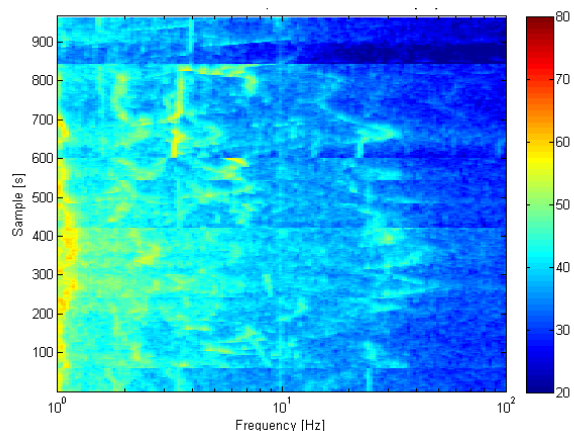
Fig. 6. Averaged amplitude spectra of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for different wind speed - Turbine 1



Rys. 7. Uśrednione widma amplitudowe sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, wyznaczone dla różnych prędkości wiatru - Turbina 2

Fig. 7. Averaged amplitude spectra of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for different wind speed - Turbine 2

W kolejnym kroku obliczono, osobno dla każdej z badanych turbin i oddzielnie dla trzech wybranych prędkości wiatru, dwuwymiarowe spektrogramy, które wyznaczono przy wykorzystaniu przekształcenia STFT. Przedstawiają one obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanego poziomu ciśnienia akustycznego, przy zastosowanym czasie próbkowania równym 1 sekunda. Przy czym kolejne próbki odpowiadają jednosekundowym przedziałom czasu, w których prędkość wiatru była stała. Dlatego czas przedstawiony na spektrogramach jest czasem dyskretnym i nieciągłym. Zilustrowane zależności zostały wyznaczone z zastosowaniem płaskiej krzywej ważenia. Zaprezentowane w dziedzinie czas-częstotliwość spektrogramy opisano stosując skalę w postaci palety kolorów, których poszczególne barwy odpowiadają odpowiednim wartościom, wyrażonego w skali decybelowej, poziomu ciśnienia akustycznego. Ponadto w celach porównawczych zestawiono na pojedynczych charakterystykach dwa uśrednione przebiegi widm częstotliwościowych dla badanych turbin, oddzielnie dla trzech wybranych prędkości wiatru (rys. 10, 13, 16).

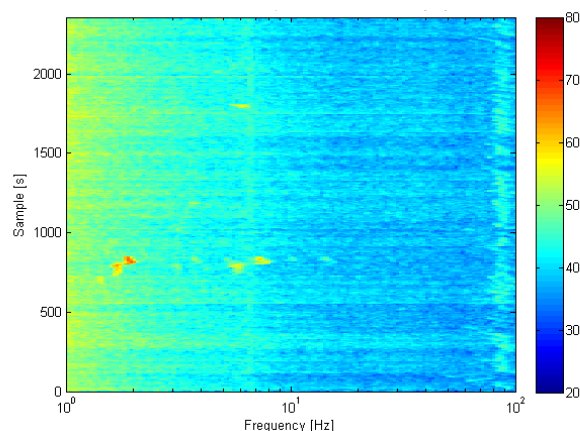


Rys. 8. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, dla prędkości wiatru równej 5,4 m/s - Turbina 1

Fig. 8. Two-dimensional spectrogram of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for wind speed of 5.4 m/s - Turbine 1

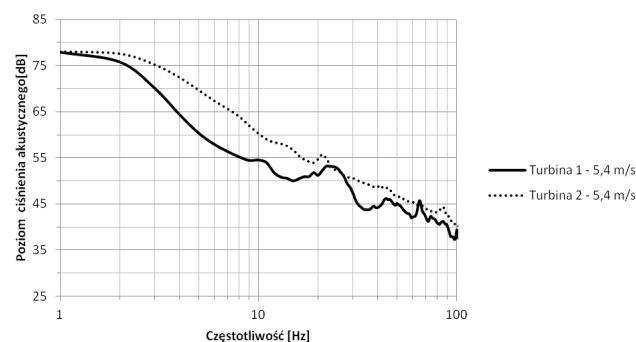
Analizując wyznaczone spektrogramy dla prędkości wiatru 5,4 m/s (rys. 9 i 10), można stwierdzić, że w przypadku Turbiny 1, charakterystyczne są prążki przedstawiające podwyższone poziomy ciśnienia akustycznego dla pasma częstotliwości infradźwiękowych (do ok. 10 Hz). W przypadku Turbiny 2, nie jest możliwe wyróżnienie tak wyraźnych i znaczących prążków o podwyższonych wartościach ciśnienia akustycznego. Natomiast obserwowane zmiany zachodzą w sposób liniowy, począwszy od największych wartości przy niskich częstotliwościach do najmniejszych wartości przy częstotliwościach największych. Porównanie uśrednionych widm amplitudowych obu turbin przy prędkości wiatru

5,4 m/s (rys. 10), wskazuje na większe oddziaływanie akustyczne Turbiny 2, których wartości w całym analizowanym paśmie częstotliwości są większe od poziomów emitowanych przez Turbinę 1. Wyjątek stanowią częstotliwości harmoniczne dla Turbiny 1, dla których mierzone poziomy ciśnienia akustycznego mają zbliżone wartości.



Rys. 9. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, dla prędkości wiatru równej 5,4 m/s - Turbina 2

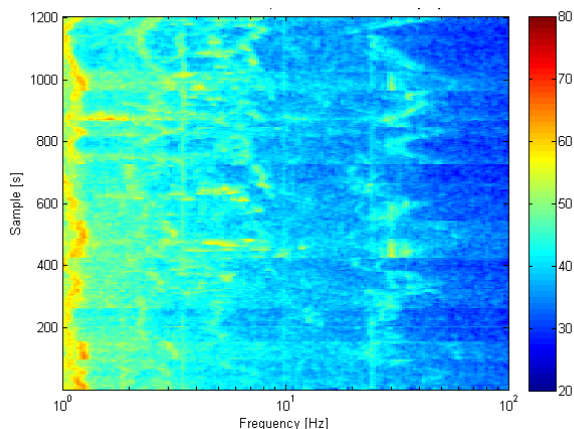
Fig. 9. Two-dimensional spectrogram of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for wind speed of 5.4 m/s - Turbine 2



Rys. 10. Porównanie uśrednionych widm amplitudowych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badane turbiny, dla prędkości wiatru równej 5,4 m/s

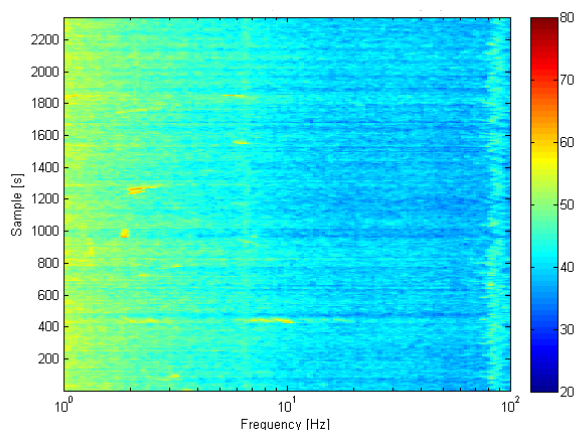
Fig. 10. Comparison of the averaged amplitude spectra of the low-frequency acoustic signals generated by the turbine tested at wind speed of 5.4 m/s

Dwuwymiarowe spektrogramy obrazujące wielkość ciśnienia akustycznego rejestrowanych sygnałów akustycznych, które wyznaczono dla prędkość wiatru 6,3 m/s, zostały przedstawione na rys. 11 i 12, odpowiednio dla Turbiny 1 i Turbiny 2. Natomiast porównanie uśrednionych widm amplitudowych zilustrowano na rys. 13. Analizując przedstawione zależności można stwierdzić, że w przypadku Turbiny 1, tak samo jak dla prędkości wiatru 5,4 m/s, charakterystyczne są prążki przedstawiające podwyższone poziomy ciśnienia akustycznego dla częstotliwości infradźwiękowych (do 10 Hz), przy czym uzyskane poziomy są większe. W przypadku Turbiny 2, taka samo jak dla mniejszej prędkości wiatru, nie jest możliwe wskazanie tak wyraźnych prążków z podwyższonymi wartościami ciśnienia akustycznego, a obserwowane zachodzą liniowo, począwszy od największych wartości przy niskich częstotliwościach do najmniejszych wartości przy częstotliwościach największych. Porównanie uśrednionych widm amplitudowych obu turbin przy prędkości wiatru 6,3 m/s, wskazuje na zbliżenie się otrzymanych przebiegów dla obu turbin, a dla częstotliwości harmonicznych Turbiny 1 uzyskiwane wartości przewyższają wyznaczone dla Turbiny 2.



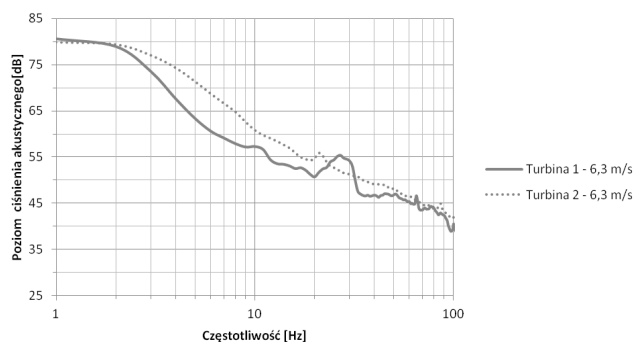
Rys. 11. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, dla prędkości wiatru równej 6,3 m/s - Turbina 1

Fig. 11. Two-dimensional spectrogram of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for wind speed of 6.3 m/s - Turbine 1



Rys. 12. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, dla prędkości wiatru równej 6,3 m/s - Turbina 2

Fig. 12. Two-dimensional spectrogram of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for wind speed of 6.3 m/s - Turbine 2

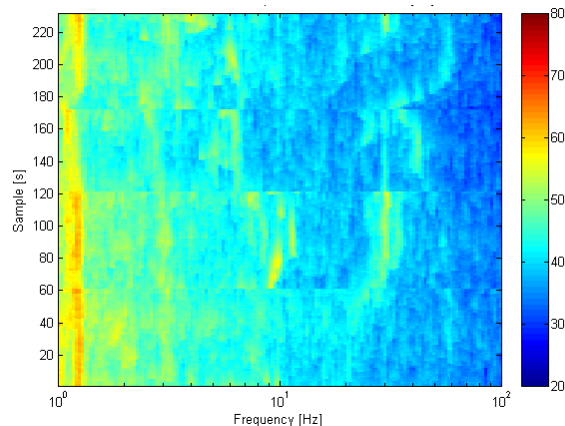


Rys. 13. Porównanie uśrednionych widm amplitudowych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badane turbiny, dla prędkości wiatru równej 6,3 m/s

Fig. 13. Comparison of the averaged amplitude spectra of the low-frequency acoustic signals generated by the turbines tested at wind speed of 6.3 m/s

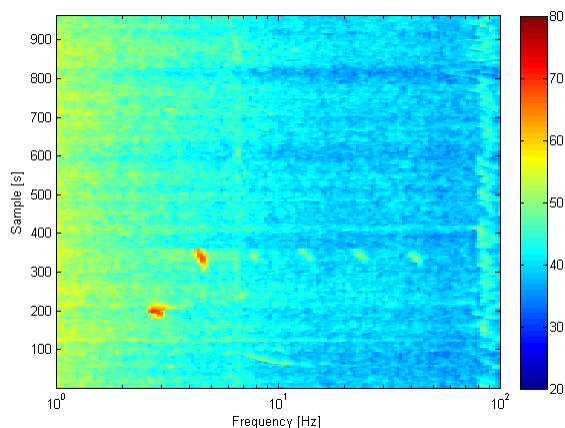
Podając analizie dwuwymiarowe spektrogramy poziomu ciśnienia akustycznego wyznaczone dla prędkości wiatru równej 7,6 m/s, które przedstawiono na rys. 14 (Turbina 1) i na rys. 15 (Turbina 2) oraz porównując uśrednione widma amplitudowe (rys. 16) można stwierdzić, że obliczone charakterystyki mają zarówno zbliżony kształt przebiegów jak również wartości zarejestrowanych sygnałów dla obu badanych turbin. Ponadto na cha-

rakterystykach otrzymanych dla Turbiny 1 można wyróżnić pik rezonansowy występujący przy częstotliwości ok. 30 Hz, którego wartość przewyższa o ponad 5 dB poziom ciśnienia akustycznego zarejestrowanego dla Turbiny 2. Natomiast dla turbiny 2 zauważalna jest harmoniczna rezonansowa dla częstotliwości ok. 22 dB, przy czym jej wartość jest o ok. 2 dB większa od poziomu ciśnienia akustycznego wyznaczonego dla Turbiny 1.



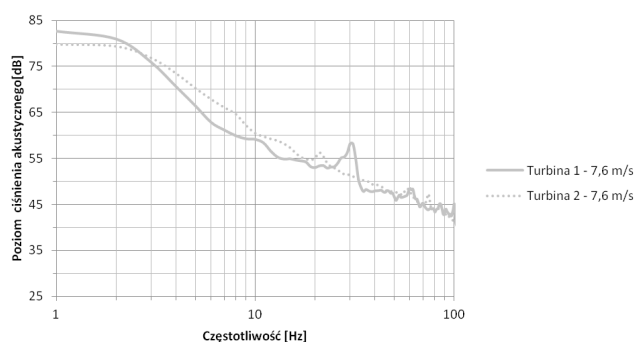
Rys. 14. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, dla prędkości wiatru równej - 7,6 m/s - Turbina 1

Fig. 14. Two-dimensional spectrogram of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for wind speed of 7.6 m/s - Turbine 1



Rys. 15. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, dla prędkości wiatru równej - 7,6 m/s - Turbina 2

Fig. 15. Two-dimensional spectrogram of the low-frequency acoustic signals generated by the wind turbine for wind speed of 7.6 m/s - Turbine 2



Rys. 16. Porównanie uśrednionych widm amplitudowych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badane turbiny, dla prędkości wiatru równej 7,6 m/s

Fig. 16. Comparison of the averaged amplitude spectra of the low-frequency acoustic signals generated by the turbines tested at wind speed of 7.6 m/s

Ponadto, porównując uzyskane charakterystyki z analogicznymi zależnościami wyznaczonymi dla dwóch mniejszych prędkości wiatru można stwierdzić, że w zakresie od 1 Hz do 2 Hz uzyskano średnio o ok. 2 dB większe wartości poziomu ciśnienia akustycznego dla turbiny 1 niż dla Turbiny 2. Natomiast, z wyłączeniem pików rezonansowych, można stwierdzić jeszcze bardziej znacząco, niż dla mniejszych prędkości wiatru, zbliżenie się wyznaczonych przebiegów uśrednionych widm amplitudowych dla obu badanych turbin.

4. Podsumowanie i wnioski

Dla obu badanych turbin wiatrowych uzyskano, niezależnie od prędkości wiatru, zbliżone pod względem kształtu przebiegi uśrednionych widm amplitudowych, a także podobny charakter struktur czasowo-częstotliwościowych. Charakterystyczne jest stosunkowo liniowe i dynamiczne zmniejszanie się zarejestrowanych wartości ciśnienia akustycznego (średnio o ok. 40 dB), które występuje wraz ze wzrostem częstotliwości w całym analizowanym przedziale od 1 Hz do 100 Hz. Przy czym, największy poziom ciśnienia akustycznego (średnio ok. 80 dB), występuje w zakresie od 1 Hz do 2 Hz. Ponadto w obu przypadkach można wyróżnić charakterystyczne składowe harmoniczne, dla których poziom ciśnienia akustycznego jest podwyższony. Są one bardziej widoczne dla widm obliczonych dla Turbiny 1.

Reasumując, na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że podczas pracy badanych turbin wiatrowych generowany jest hałas akustyczny zawierający składowe infradźwiękowe, przy czym mniejsze poziomy ciśnienia akustycznego występują dla fabrycznie nowej Turbiny 1. Jednakże należy podkreślić, że w obu analizowanych przypadkach, niezależnie od prędkości wiatru, zarejestrowane poziomy ciśnienia akustycznego są dużo mniejsze od wartości progowych określonych w obowiązujących przepisach prawnych [9, 10, 11].

Przedstawione wyniki stanowią pierwszy etap badań związanych z oceną wpływu hałasu niskiej częstotliwości emitowanego przez elektrownie wiatrowe na środowisko naturalne, w tym człowieka, które są realizowane w ramach rozprawy doktorskiej mgr inż. Tomasza Malca. Następnym etapem badań będzie wykonanie analogicznych pomiarów dla innych typów turbin wiatrowych, różniących się zarówno konstrukcją, wielkością mocy, jak również czasem eksploatacji. Przeprowadzenie tego typu analiz umożliwi dokonanie uogólnionej oceny stopnia oddziaływania środowiska infradźwiękowego powstającego wokół pracujących instalacji wiatrowych i w konsekwencji wykazanie czy i w jakim zakresie może ono wpływać na organizmy żywe oraz zagrażać zdrowiu ludzi.

5. Literatura

- [1] Bellhose G.: Low Frequency Noise and Infrasound from Wind Turbines Generators: A Literature Review Bel Acoustic Consulting, New Zeland, 2004.
- [2] Jakobsen J.: Infrasound Emission from Wind Turbines, Journal of low frequency noise, vibrations and active control, 2005.
- [3] Chen Yuan Huang Qibai, Hanmin Shi: An Investigation on the Physiological and Psychological Effects of Infrasound on Persons, Journal of low frequency noise, vibrations and active control, 2004.
- [4] Fernandez D. C.: Valencia, Infrasound and it Effects on Humans, Spatial Audio DESC9137, 2007.
- [5] Boczar T.: Wykorzystanie energii wiatru, Wydawnictwo Pomiaru Automatyka Kontrola PAK, Gliwice, 2010.
- [6] Wegner S., Bareiss R., Guidati G.: Wind Turbine Noise, Springer, Berlin, 1996.
- [7] PN-EN 61400-11:2002 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu.
- [8] PN-EN 61400-11:2004/A1 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu.
- [9] Malec T.: Hałas infradźwiękowy i sposoby oceny jego uciążliwości, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, nr 342, Elektryka z. 66, ss. 51-52, 2011.

[10] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29.11.2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy Dz. U. 02 nr 217, poz. 1833.

[11] Pedersen, C. S., Møller, H., and Waye, K. P.: A Detailed Study of Low-Frequency Noise Complaints. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 27 (3), pp. 1-33, 2008.

otrzymano / received: 18.06.2012

przyjęto do druku / accepted: 02.08.2012

artykuł recenzowany / revised paper

INFORMACJE**Nowa inicjatywa PAK**

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: [Niepewność wyników pomiarów](#) w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo–technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.

Tadeusz SKUBIS
Redaktor naczelny Wydawnictwa PAK