

Ryszard INGIELEWICZ, Adam ZAGUBIEŃPOLITECHNIKA KOSZALIŃSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I GEODEZJI,
ulica Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin**Pomiar hałasu infradźwiękowego wokół farmy wiatrowej****Dr inż. Ryszard INGIELEWICZ**

Wykładowca na Wydziale Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej. Biegły Wojewody Zachodniopomorskiego w zakresie sporządzania ocen oddziaływania na środowisko: hałas, wibracje. Autor lub współautor wielu publikacji i opracowań technicznych z dziedziny wibroakustyki, w tym ponad 50 ocen i raportów oddziaływania na środowisko farm wiatrowych. Wykonawca ponad 10 porealizacyjnych pomiarów hałasu wokół farm wiatrowych.

e-mail: wibrotest@wp.pl

**Dr inż. Adam ZAGUBIEŃ**

Wykładowca na Wydziale Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji Politechniki Koszalińskiej. Biegły Wojewody Zachodniopomorskiego w zakresie sporządzania ocen oddziaływania na środowisko: hałas, wibracje. Autor wielu publikacji i opracowań technicznych z dziedziny wibroakustyki. Konsultant akredytowanych laboratoriów pomiarowych. Wykonawca ponad 10 porealizacyjnych pomiarów hałasu wokół farm wiatrowych.

e-mail: adam.zagubien@tu.koszalin.pl

**Streszczenie**

W artykule omówiono pomiary własne hałasu infradźwiękowego wytwarzanego i emitowanego do środowiska podczas pracy turbin wiatrowych. Badania prowadzono na dwóch podobnych obiektach A i B, składających się z trzech turbin wiatrowych. Obiekt A składał się z nowoczesnych turbin produkowanych w technologii z końca ubiegłego wieku o mocy elektrycznej 2 MW każda, obiekt B składał się z najnowszych turbin produkowanych obecnie o mocy elektrycznej 2,5 MW każda. W obu przypadkach wieże turbin były rurowe w konstrukcji stalowej. Przedstawiono wyniki pomiarów i podjęto próbę oceny ich poziomów. Z przeprowadzonych analiz można wnioskować, że poziomy hałas infradźwiękowy emitowanego przez turbiny wiatrowe nie osiąga poziomów stwarzających zagrożenie dla ludzi, a ich wartość jest porównywalna z poziomami tła naturalnego powszechnego w środowisku.

Słowa kluczowe: pomiary hałasu, infradźwięki, turbiny wiatrowe.**Measurements of the infrasound noise emitted by a wind farm****Abstract**

In this paper we discuss own measurements of the infrasound noise made and emitted into the environment during wind turbine operation. The research has been performed on two similar farms „A” and „B”, consisting of 3 wind turbines. „A” turbines are modern turbines produced at the end of the last century and their electric power is 2 MW (each). „B” turbines are the latest ones produced nowadays and they are of 2.5 MW each. In both cases the towers of the turbines are pipe profile, steel constructions. There are shown the results of the measurements and also the assessment of their levels. To assess the results shown in the paper, one rule has been applied - the rule is that each result of equivalent acoustic pressure adjusted by the characteristics of frequency G includes not only the working farm but also the noise of the turbines, the acoustic background and the noise of other non-identified sources which can be predicted by wide descriptions of the areas near localization of the measurement points presented in the paper. After the analyses we may conclude that the infrasound noise levels emitted by wind turbines do not exceed or even reach the levels which could be of any danger to people. This infrasound noise reaches the levels comparable to infrasound levels of the natural background, typical of the environment.

Keywords: noise measurements, infrasound, wind turbines.**1. Wstęp**

Hałas infradźwiękowy występuje powszechnie w środowisku naturalnym. Istnieje wiele obiegowych opinii na temat jego szkodliwości, szczególnie w odniesieniu do jednego z głównych źródeł energii odnawialnej, jakimi są turbiny wiatrowe produkujące energię elektryczną wykorzystując siłę wiatru. Wyjaśnienia sposobów generowania fali akustycznej przez instalacje wiatrowe można znaleźć w wielu opracowaniach m.in. [1, 2]. Turbiny wiatrowe wytwarzają energię elektryczną, emitując równoległe do środowiska energię w postaci hałasu, wibracji i pól elektromagnetycznych. Emisja wymienionych czynników energii do środowiska

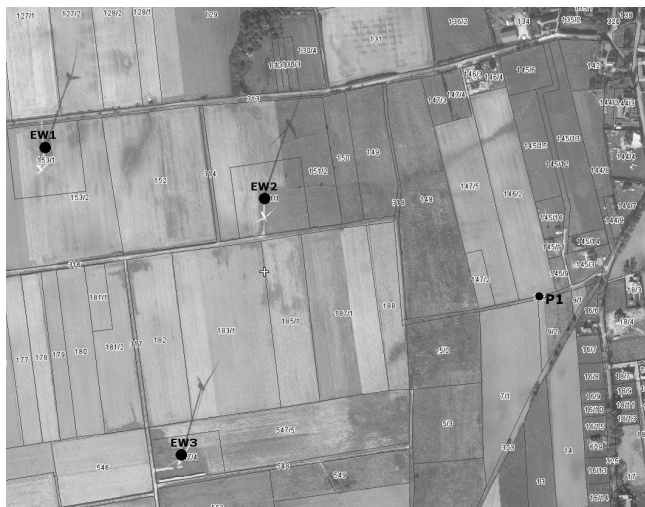
może stanowić potencjalne zagrożenie w przypadkach, kiedy osiągną one odpowiednio wysoki poziom, najczęściej określany, jako poziom dopuszczalny. Podkreślić należy, że turbiny wiatrowe nie są jakimś szczególnym źródłem emisji energii wymagającym wyjątkowych zasad oceny. Istnieje bowiem szereg innych maszyn, urządzeń i obiektów wytworzonych przez człowieka, stanowiących źródła o podobnym charakterze emisji energii do środowiska. Podczas pracy turbin wiatrowych emitowany jest hałas z zakresu częstotliwości słyszalnych od 20 do 20000 Hz, jak i hałas o charakterze infradźwięków, określany jako niesłyszalny w zakresie od 1 do 20 Hz [3]. W Polsce nie ma obowiązujących norm i przepisów prawnych określających poziomy dopuszczalne hałasu w środowisku naturalnym i ogólnie dostępnym w zakresie emisji infradźwięków. Podczas przeprowadzonych badań zmierzono poziom równoważny ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G [3]. Badaniu poddane zostały dwie wybrane farmy wiatrowe składające się z trzech turbin wiatrowych każda. Celowo porównano dwa obiekty, w których rozwiązania technologiczne różnią się o ponad 10 lat. Farma A składa się z turbin wyprodukowanych w roku 2000, a farma B z turbin wyprodukowanych w 2012 roku.

2. Charakterystyka pomiarów i obiektu badań

W Polsce nie ma obowiązujących metod referencyjnych opisujących sposób prowadzenia pomiarów hałasu infradźwiękowego w środowisku. Zatem podczas pomiarów starano się zachować wytyczne metod referencyjnych pomiarów hałasu środowiskowego w zakresie słyszalnym, aktualnych na dzień wykonywania pomiarów.

Pierwszym badanym obiektem (farma A) była elektrownia wiatrowa składająca się z trzech pracujących turbin Vestas V80 o mocy elektrycznej 2,0 MW, średnicy wirnika 80 m i wysokości wieży 80 m. Badania przeprowadzono w październiku 2001 roku. Punkt pomiarowy usytuowano w odległości 500 m od skrajnej turbiny wiatrowej, na wysokości 1,5 m nad poziomem terenu, teren otwarty, w odległości około 100 m przebiegała mało uczęszczana droga z dwoma szpalarami wysokich drzew (rys. 1).

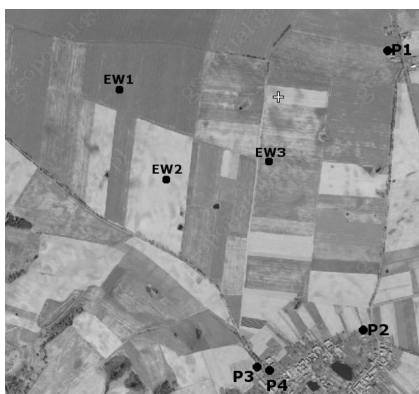
Warunki meteorologiczne podczas pomiarów spełniały wymagane w tym czasie kryteria: temperatura (5,1 – 5,3) °C, wilgotność (69 – 71)%, ciśnienie (1015 – 1017) hPa. Prędkość wiatru na wysokości osi turbiny wahała się w granicach od 8,0 do 9,7 m/s. Czas pojedynczego pomiaru ze względu na ustabilizowany poziom emitowanego hałasu i możliwość wykluczenia zauważalnych zakłóceń wynosił 1 minuta. W punkcie pomiarowym (P1) wykonano serię pomiarów hałasu w zakresie infradźwięków z wykorzystaniem krzywej korekcji G [3] (wówczas norma ISO 7196:1995), podczas pracy trzech elektrowni. Tło akustyczne (L_{Gt}), zmierzono z wykorzystaniem krzywej korekcji G [3] (wówczas norma ISO 7196:1995), po wyłączeniu i zatrzymaniu trzech turbin wiatrowych.



Rys. 1. Lokalizacja punktu pomiarowego
Fig. 1. View of the measurement point

Pomiary wykonano, z osłoną przeciwwietrzną przenośnym, analizatorem dźwięku i drgań SVAN 912 AE przeznaczonym do pomiaru i analizy sygnałów w paśmie 0,8 Hz - 25,6 kHz. Przyrząd może pracować w warunkach połowych wykorzystując wewnętrzne źródło zasilania. W zależności od wybranego trybu pracy, może on pełnić funkcję miernika poziomu dźwięku lub funkcję miernika drgań (klasa "1" wg norm obowiązujących dla pomiaru dźwięku i drgań) oraz wąskopasmowego lub tercjo-oktawowego analizatora sygnałów.

Drugim badanym obiektem (farma B) była elektrownia wiatrowa składająca się z trzech pracujących turbin GE 2,5 MW o mocy elektrycznej 2,5 MW, średnicy wirnika 100 m i wysokości wieży 100 m. Badania przeprowadzono w maju 2012 roku. Pomiary wykonano w czterech punktach zlokalizowanych na granicy działek najbliższej zabudowy chronionej akustycznie. Punkt P1 w odległości 710 m, punkt P2 w odległości 880 m, punkt P3 w odległości 845 m, punkt P4 w odległości 900 m od najbliższej skrajnej elektrowni (rys. 2).



Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych
Fig. 2. View of the measurement points

Mikrofon ustawiano na wysokości 4,0 m nad poziomem terenu. W otoczeniu wszystkich punktów pomiarowych występował rzadki wysoki drzewostan wpływający na wyniki pomiarów. Konfiguracja terenu oraz występujące w otoczeniu drzewa umożliwiły zachowanie kryterium średniej prędkości wiatru na wysokości mikrofonu do 5,0 m/s. W odległości 50 m od punktu P1 przebiegała droga powiatowa o średnim natężeniu ruchu. Ponadto w okolicy analizowanej farmy wiatrowej zlokalizowane są jeszcze dwie inne farmy wiatrowe: 4 turbiny w odległości około 6 km i 7 turbin w odległości około 10 km, które na czas pomiarów tła nie były wyłączane. Warunki meteorologiczne kontrolowano podczas pomiarów za pomocą stacji meteo. Spełnione zostały wymagane kryteria [4]: temperatura (10,9 – 11,8) °C, wilgotność (56 – 58) %,

ciśnienie (1000 – 1003) hPa. Średnia prędkość wiatru na wysokości osi turbiny podczas wszystkich pomiarów wahała się w granicach (6,8 – 8,8) m/s. W każdym punkcie pomiarowym (P1, P2, P3, P4) wykonano serię pomiarów hałasu w zakresie infradźwięków z wykorzystaniem krzywej korekcji G [3], podczas pracy trzech turbin. Następnie pomiary powtórzono, po ich zatrzymaniu, uzyskując wyniki dla tła akustycznego (L_{Gt}) z wykorzystaniem krzywej korekcji G [3]. Zastosowano metodykę bezpośrednich pomiarów hałasu z wykorzystaniem próbkowania [4] dobierając liczebność próbek i czas ich pomiaru w zależności od charakteru hałasu oraz różnicy między najwyższą i najniższą wartością zmierzonych poziomów. Czas pomiaru próbki wynosił 5 min. Pomiary wykonano z osłoną przeciwwietrzną przenośnym analizatorem dźwięku DSA-50. DSA - 50 to rozbudowany, wykonany w cyfrowej technologii miernik poziomu dźwięku. Urządzenie łączy w sobie funkcjonalność całkowitego miernika poziomu dźwięku, analizatora oktawowego oraz analizatora 1/3 - oktawowego. Dokładność odpowiadająca 1 klasie oraz, a zastosowanie cyfrowego przetwarzania mierzonego sygnału umożliwia jednocześnie pomiar większości parametrów charakteryzujących hałas. Miernik wyposażony jest fabrycznie w tryb filtra infra G i przystosowany do pomiarów hałasu infradźwiękowego zgodnie z normą [3].

3. Wyniki pomiarów

Wyznaczoną wartość równoważnego ciśnienia akustycznego skorygowaną charakterystyką częstotliwościową G ($L_{G_{eq}}$) dla farmy A, podano wraz z wyznaczoną wartością przedziałów niepewności rozszerzonej oszacowanej dla poziomu ufności 95% (U_{95}).

Tab. 1. Wyniki pomiarów
Tab. 1. The results of measurements

Nr Punktu	Pomiar podczas pracy turbin wiatrowych $L_{G_{eq}}$ [dB]	Niepewność rozszerzona dla poziomu ufności 95% (U_{95})	Pomiar tła po wyłączeniu turbin wiatrowych L_{Gt} [dB]	Niepewność rozszerzona dla poziomu ufności 95% (U_{95})
P1	80,1	±1,9	77,9	±1,9

Zatem w odległości 500 m odpowiadającej najczęściej odległości lokalizacji najbliższej zabudowy mieszkaniowej, poziom hałasu infradźwiękowego od pracy elektrowni i poziom tła akustycznego, były praktycznie porównywalne (80,1dB i 77,9dB).

Wyznaczone wartości równoważnego ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową G ($L_{G_{eq}}$) dla farmy B, podano również wraz z wyznaczoną wartością przedziałów niepewności rozszerzonej oszacowanej dla poziomu ufności 95% (U_{95}).

Tab. 2. Wyniki pomiarów
Tab. 2. The results of measurements

Nr Punktu	Pomiar podczas pracy turbin wiatrowych $L_{G_{eq}}$ [dB]	Niepewność rozszerzona dla poziomu ufności 95% (U_{95})	Pomiar tła po wyłączeniu turbin wiatrowych L_{Gt} [dB]	Niepewność rozszerzona dla poziomu ufności 95% (U_{95})
P1	77,7	±1,8	76,7	±1,8
P2	79,7		82,0	
P3	79,3		78,4	
P4	77,9		77,6	

Uzyskane wyniki pomiarów jednoznacznie wskazują, że hałas infradźwiękowy turbin jest porównywalny z poziomami tła akustycznego, a zmierzone wartości zależne są od chwilowych podmuchów wiatru, przykładowo w punkcie 2 poziom tła po wyłączeniu i zatrzymaniu turbin był wyższy niż podczas ich pracy.

W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiarów dla farmy wiatrowej A i B wraz z wynikami pomiarów własnych hałasu infradźwiękowego pochodzącego od źródeł naturalnych. Pomiary przy źródłach

naturalnych (szum lasu, falowanie morza) przeprowadzono w podobnych warunkach meteorologicznych jak badania wokół farmy wiatrowej B. Najbliższa pracująca farma wiatrowa znajdowała się w odległości ponad 15 km od punktu pomiarowego.

Tab. 3. Wyniki pomiarów
Tab. 3. The results of measurements

Lp.	Opis źródła	Pomiar podczas pracy turbin wiatrowych L_{Geq} [dB]	Pomiar tła L_{Gt} [dB]
1	W punkcie odległym o 500 m od skrajnej turbiny, farma A	80,1	77,9
2	W punktach odległych o 700 do 900 m od skrajnych turbin, farma B	77,7 do 79,7	76,7 do 82,0
3	Hałas powodowany szumem lasu dla różnych lokalizacji punktu pomiarowego, 100 m od skraju lasu	-	72,2 do 87,8
4	Hałas powodowany falowaniem morza. Punkty pomiarowe zlokalizowane 100 m od brzegu morza	-	76,1 do 89,1

4. Poziomy dopuszczalne

W Polsce nie ma obowiązujących norm i przepisów prawnych określających poziomy dopuszczalne hałasu w środowisku naturalnym i w środowisku pracy w zakresie emisji infradźwięków. Zgodnie z Rozporządzeniem ministra pracy i polityki społecznej, z dnia 16 czerwca 2009 r., zmieniającym rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, dopuszczalne poziomy hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy zostały wycofane. Pozostaje jedynie aktualna norma [5] określająca zasady pomiaru i tzw. kryterium uciążliwości hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy. Poziomy równoważne stanowiące kryterium uciążliwości wynoszą 102 dB (86 dB dla stanowisk wymagających szczególnej koncentracji uwagi), w odniesieniu do 8 godzin czasu pracy (tygodnia pracy), przy pomiarach zgodnie z krzywą korekcji G [3]. Wartości te, nie stanowią podstawy do oceny zagrożenia hałasem infradźwiękowym w środowisku. W nielicznych krajach podjęto próbę ograniczenia ekspozycji na hałas infradźwiękowy w środowisku, czyli w pomieszczeniach i budynkach mieszkalnych, od dźwięków pochodzących ze źródeł zewnętrznych. Przykładowo Duńska Agencja Ochrony Środowiska (Danish Environmental Protection Agency, DEPA) zaleca, aby poziomy ekspozycji na infradźwięki środowiskowe były niższe o 10 dB od progów słyszenia infradźwięków. Według *Jakobsena* [6] skorygowany charakterystyką G próg słyszenia dla osób o szczególnej wrażliwości wynosi 95 dB. DEPA zaleca więc, aby średni całkowity poziom skorygowany charakterystyką częstotliwościową G w zakresie częstotliwości do 20 Hz nie przekraczał 95 dB.

5. Wnioski

Prowadząc pomiary i analizując wyniki badań w przypadku turbin wiatrowych i wszystkich innych źródeł, którym nieodłącznie towarzyszy silny wiatr należy mieć na uwadze następujące czynniki:

- wynik pomiaru jest zawsze wypadkową hałasu badanego źródła i tła akustycznego wynikającego ze zjawisk towarzyszącym podmuchom wiatru, którego udział zależy od lokalizacji punktu pomiarowego i jego otoczenia,
- ze względu na właściwości hałasu infradźwiękowego (długa fala, rozchodzenie się na większe odległości, inne tłumienie na przeszkodach), wynik pomiaru w wielu przypadkach uwzględ-

nia również wpływ innych niezidentyfikowanych źródeł hałasu infradźwiękowego,

- w przypadku pomiarów hałasu infradźwiękowego w środowisku naturalnym, w Polsce nie zostały określone metody referencyjne wykonywania pomiarów, mimo to prowadząc pomiary hałasu infradźwiękowego należy w miarę możliwości uwzględnić obowiązującą metodę referencyjną pomiarów hałasu słyszalnego, chociaż wydaje się być zasadne usytuowanie punktu pomiarowego na wysokości 1,5 m nad poziomem terenu, co w znacznym stopniu ułatwia zachowanie warunku średniej prędkości wiatru do 5 m/s na poziomie mikrofonu,
- oceniając wyniki pomiarów przedstawione w artykule przyjęto zasadę, że każdy uzyskany wynik równoważnego ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową G pracującej farmy obejmuje hałas turbin, tła akustyczne i hałas innych niezidentyfikowanych bliżej źródeł, o których można wnioskować z przedstawionych w artykule szerokich opisów terenów w otoczeniu lokalizacji punktów pomiarowych.

Wszystkie wyniki badań zestawione w tabeli 3 wykazują jednoznacznie, że hałas infradźwiękowy emitowany od turbin wiatrowych do środowiska, mierzony łącznie z tłem akustycznym oraz innymi niezidentyfikowanymi źródłami z otoczenia, jest porównywalny z poziomami tła akustycznego zależnego od prędkości wiatru, które towarzyszy nieodłącznie pracy turbin wiatrowych i jest niezależne od pracy turbin.

Ostatecznie mając na uwadze badania własne, analizy i badania innych zespołów na świecie szeroko omówione w publikacji [7] oraz kryteria oceny hałasu infradźwiękowego w środowisku naturalnym w innych krajach [6] można wnioskować, że poziomy hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe nie osiąga poziomów stwarzających zagrożenie dla ludzi [8], a hałas infradźwiękowy turbin wiatrowych osiąga poziomy porównywalny z poziomami tła naturalnego powszechnego w środowisku.

6. Literatura

- Wegner S., Bareiss R., Guidati G.: Wind Turbine Noise, Springer, Berlin, 1996.
- Szulczyk J., Cempel Cz.: Hałas turbin wiatrowych w zakresie infradźwięków, Międzynarodowa konferencja Monitoring Środowiska 2010, Kraków 2010 r.
- PN-ISO 7196:2002 Akustyka – Charakterystyka częstotliwościowa filtru do pomiarów infradźwięków.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska, z dnia 4 listopada 2008 r. w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody, Dz. U. Nr 206 poz. 1291.
- PN-Z 01338:2010 Akustyka – Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.
- Jacobsen J.: Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration, Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, 2001.
- Massachusetts Department of Environmental Protection, Massachusetts Department of Public Health, Wind Turbine Health Impact Study: Report of Independent Expert Panel, Massachusetts, January 2012.
- Malec T., Boczar T., Wotzka D.: Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe różnych mocy, Pomiar Automatyka Kontrola, vol. 58, nr 9, str. 773 – 778, 2012.

otrzymano / received: 07.04.2013

przyjęto do druku / accepted: 03.06.2013

artykuł recenzowany / revised paper