

**Jacek SZULCZYK, Zdzisław GOLEC**

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej  
Zakład Wibroakustyki i Bio-Dynamiki Systemów  
tel. +48 61 665 2390, fax: +48 61 665 2307  
e-mail: [jacek.szulczyk@doctorate.put.poznan.pl](mailto:jacek.szulczyk@doctorate.put.poznan.pl)  
e-mail: [zdzislaw.golec@put.poznan.pl](mailto:zdzislaw.golec@put.poznan.pl)

## **Badania symulacyjne propagacji dźwięku farm wiatrowych – przykład analiz**

### **STRESZCZENIE**

W referacie omówiono zakres czynności podejmowanych w celu prognozowania i obserwacji zmian właściwości akustycznych środowiska zachodzących na skutek powstawania i eksploatacji farm wiatrowych. Przedstawione badania symulacyjne i pomiary propagacji hałasu prowadzone są w skali lokalnej tzn. obejmują strefę bezpośredniego oddziaływania farm wiatrowych na środowisko.

Pokazano jedną z procedur stosowanych w celu tworzenia mapy hałasu, przedstawiającej izolację jednakowych poziomów dźwięku przy turbinach wiatrowych, jak i w pobliżu obszarów prawnie chronionych akustycznie.

Omówiono ogólnie i na przykładzie zagadnienie związane z oceną oddziaływania akustycznego inwestycji na środowisko, gdzie wyróżniono:

- zdefiniowanie parametrów akustycznych turbin wiatrowych,
- określenie warunków mających wpływ na propagację fal akustycznych: np. odległość turbiny od zabudowy mieszkaniowej, rodzaj gruntu, kierunek i prędkość wiatru,
- wykonanie obliczeń akustycznych i przeprowadzenie analiz symulacyjnych propagacji dźwięku,
- porównanie wyników badań emisji hałasu z wartościami dopuszczalnymi poziomów hałasu w obszarach środowiska chronionych akustycznie,
- weryfikację lokalizacji turbin w przypadku stwierdzenia przekroczeń dopuszczalnych wartości hałasu.

We wnioskach końcowych wskazano problemy badawcze, które pojawiają się przy wykonywaniu projektów akustycznych parków, podczas przeprowadzania analiz symulacyjnych jak i badań po realizacyjnych.

#### **Słowa kluczowe:**

hałas turbin wiatrowych, projektowanie akustyczne, analizy symulacyjne

## 1. WSTĘP

Narzędziami wykorzystywanymi do realizacji analiz akustycznych wokół turbin wiatrowych są programy symulacyjne. W swym algorytmie obliczeniowym powinny one uwzględniać zjawiska związane m.in. z warunkami propagacji fali akustycznej, np. właściwości pochłaniające dźwięk przez grunt i powietrze, wpływ wilgotności i temperatury powietrza, odbicia i załamania fal dźwiękowych i inne.

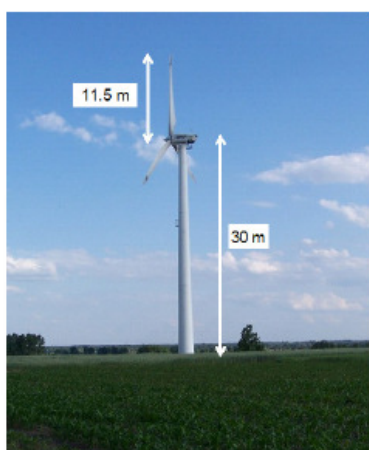
Analizy symulacyjne propagacji dźwięku wokół farm wiatrowych wykonane na etapie projektowym powinny obejmować:

- Zdefiniowanie parametrów akustycznych turbin wiatrowych. Najczęściej są to dane Producenta lub określone na podstawie pomiarów terenowych wykonanych, np. według normy PN-EN 61400-11, Turbozespoły wiatrowe, Część 11: Procedury pomiaru hałasu.
- Określenie warunków propagacji m.in. odległość turbiny od zabudowy mieszkaniowej, rodzaj gruntu, kierunek i prędkość wiatru)
- Po wykonaniu obliczeń symulacyjnych, przyrównanie uzyskanych poziomów hałasu do wartości dopuszczalnych zgodnie z [Rozporządzenie1], różnych ze względu na rodzaj zabudowy mieszkaniowej
- Weryfikację lokalizacji turbin w sytuacji stwierdzenia przekroczeń wartości dopuszczalnych poziomów hałasu w terenach chronionych akustycznie.

Wynikiem analiz emisji hałasu farm wiatrowych staje się mapa akustyczna przedstawiająca izolnie jednakowych poziomów dźwięku w pobliżu turbin, jak i przy obszarach prawnie chronionych akustycznie, dla różnych warunków eksploatacji turbin, która to powinna zostać zweryfikowana przez badania terenowe po wykonaniu Inwestycji.

## 2. INWENTARYZACJA I PARAMETRY AKUSTYCZNE ŹRÓDEŁ HAŁASU

Parametry fizyczne rozważanych turbin wiatrowych [Golec2009] pokazano poniżej, a parametry akustyczne zostały wyznaczone na podstawie badań zrealizowanych w 2008 roku<sup>1</sup>.

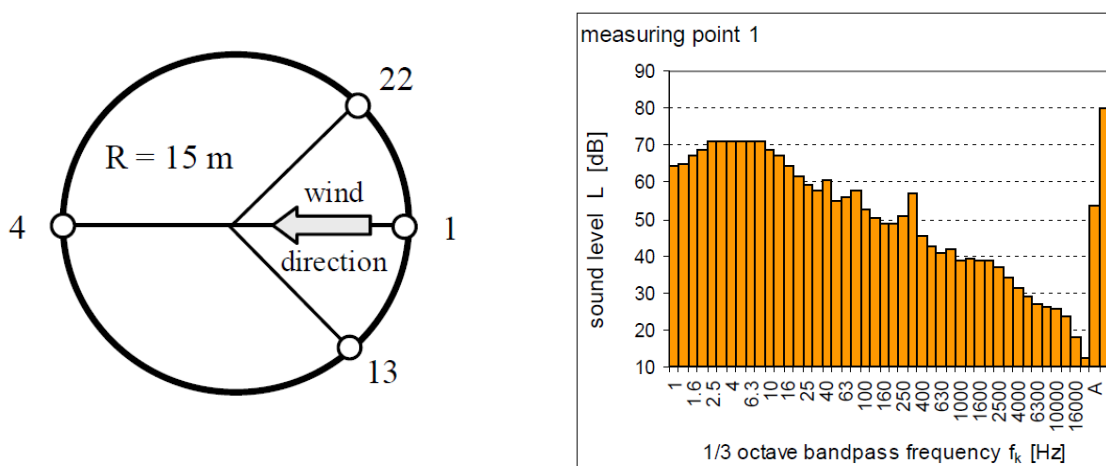


	Bonus MK ii 150	Nordtank NTK 150/25
Generator power	150 kW	150 kW
Rotor diameter	23.8 m	24.6 m
Number of the rotor blades	3	3
Area of the rotor profile surface	415 m <sup>2</sup>	475 m <sup>2</sup>
Rotor rotational speed at rated power	40.4 r.p.m.	38 r.p.m.
Tower shape	Cylindrical	Cylindrical
Tower height	30 m	31 m
Tower mass	15 000 kg	11 000 kg
Nacelle mass	6000 kg	6000 kg
Rotor mass	2500 kg	3900 kg
Blade mass	740 kg	830 kg
Total mass	23500 kg	21000 kg
Total mass per 1sq.m of the rotor	52.81 kg/m <sup>2</sup>	44.21 kg/m <sup>2</sup>
Thickness of the tower wall	0.015 m	0.015 m

Rys. 1. Parametry fizyczne turbin wiatrowych Bonus i Nordtank

<sup>1</sup> Szczególne podziękowania dla dr Marii GOLEC za merytoryczne wsparcie przy realizacji badań terenowych i analizie wyników.

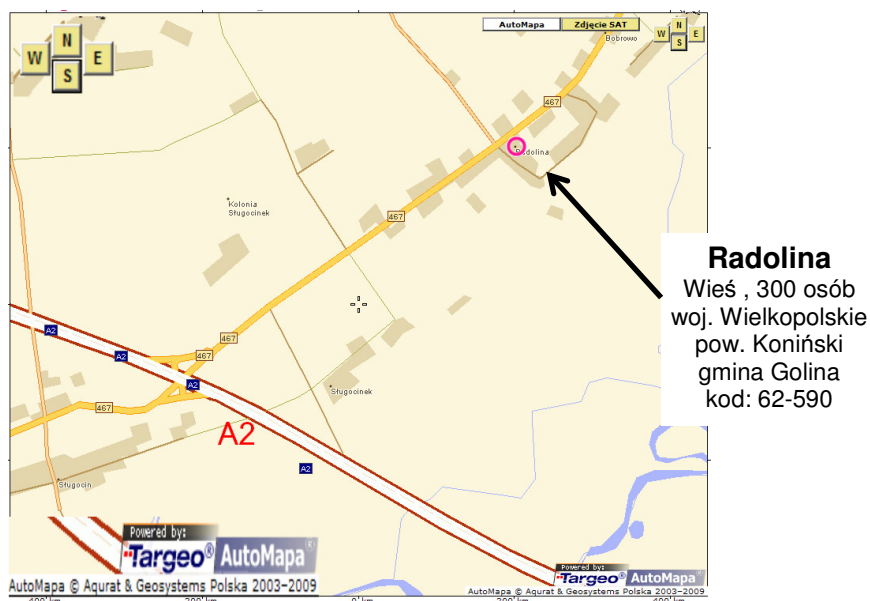
Wynikiem badań akustycznych z 2008 roku stały się poziomy ciśnienia akustycznego dla charakterystyki częstotliwościowej A i liniowego poziomu dźwięku, które dalej stały się podstawą do określenia poziomu mocy akustycznej  $L_{WA}$ . Podczas realizacji pomiarów środowiskowych zgodnie z Polską Normą PN-EN 61400-11/2001, Turbozespoły wiatrowe. Cz. 11 Procedury pomiaru hałasu, poziom ciśnienia akustycznego został wyznaczony dla odległości 15 metrów od wieży każdej z turbin, przy wykorzystaniu aparatury pomiarowej 1 klasy. Przykładowy obraz widmowy pracy turbin wiatrowych pokazano poniżej [Golec2009]:



Rys. 2. Parametry akustyczne turbin wiatrowych Bonus i Nordtank

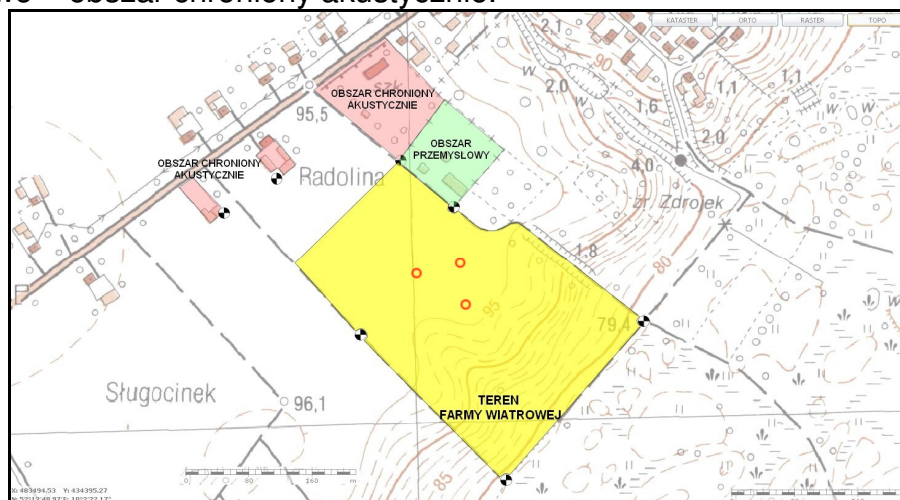
### 3. CHARAKTERYSTYKA TERENU POD WZGLĘDEM AKUSTYCZNYM

Poniżej przedstawiono orientacyjną lokalizację obszaru Inwestycji oraz charakterystykę terenu pod względem akustycznym.



Rys. 3. Orientacyjna lokalizacja obszaru Inwestycji [źródło mapy Automapa2009]

Obszar lokalizacji turbin wiatrowych charakteryzuje się płaskim terenem. Od północnej znajdują się obszar przemysłowy (zakład produkcyjny Właściciela turbin wiatrowych), a od strony północno – zachodniej znajdują się zabudowy mieszkaniowe – obszar chroniony akustycznie.



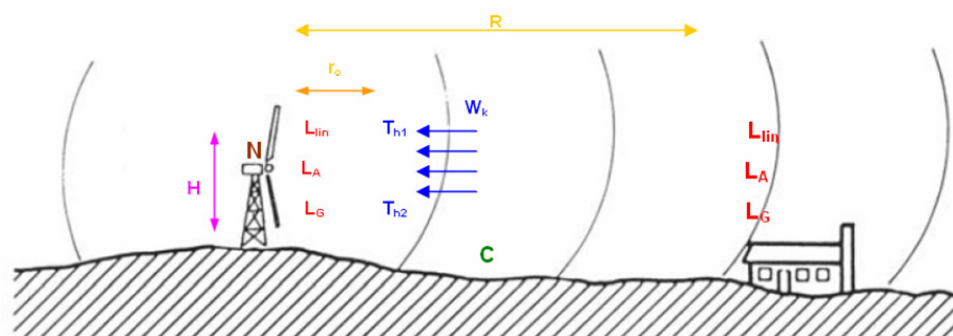
Rys. 4. Charakterystyka terenu pod względem akustycznym [źródło mapy Geoportal2009]

#### 4. METODYKA OBLICZENIOWA

Parametrem charakteryzującym źródło hałasu jest jego poziom mocy akustycznej  $L_{WA}$ , który wyznacza z pomiarów poziomu dźwięku  $L_{pA}$  w przypadku źródeł punktowych dla źródeł stacjonarnych. Kształt klimatu akustycznego w punktach odbiorczych (emisja) uzależniony jest od szeregu zmiennych do których należą m.in.

- poprawka uwzględniająca wpływ kąta przestrzennego
- poprawka uwzględniająca wpływ odległości
- poprawka uwzględniająca wpływ ekranowania
- poprawka uwzględniająca pochłanianie przez grunt.

W sposób uproszczony w/w zależność można przedstawić w sposób następujący:



$N$  – moc źródła dźwięku w dB  
 $R$  – odległość od Ob. Chron. Akust. (OCA)  
 $r_0$  – odległość pomiarowa przy źródle  
 $H$  – wysokość wieży  
 $C$  – szorstkość terenu  
 $T_{h1}$ ,  $T_{h2}$  – gradient temperatury w st. C

$W_k$  – kierunek wiatru  
 $L_{lin}$  – liniowy poziom dźwięku  
 $L_A$  – poziom dźwięku A  
 $L_G$  – poziom dźwięku skorygowany charakterystyką częstotliwościową G (infradźwięki)

[Opracowanie własne]

Rys. 5. Składowe pola akustycznego turbin wiatrowych [Szulczyk2008]

Gdzie średni poziom ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką A, wyznaczony z 4 punktów pomiarowych wokół turbiny wiatrowej wyniósł  $L_{pA \text{ eqT}}=52\text{dB}$ .

$$L_{pA} = 10 \log \left[ \sum_j 10^{0,1(L_{pj}+A_j)} \right] , [dB] \quad (1)$$

Kolejnym krokiem obliczeniowym stało się wyznaczenie poziomu mocy akustycznej  $L_{WA}$ , jako parametru charakteryzującego źródło dźwięku. Do tego celu wykorzystano zależność nr 7 z Polskiej Normy PN-EN 61400-11/2001, Turbozespoły wiatrowe. Cz. 11 Procedury pomiaru hałasu:

$$L_{WA} = L_{Aeq,c} - 6 + 10 \log \left( \frac{4\pi R_1^2}{S_0} \right) \quad (2)$$

gdzie:

$L_{Aeq,c}$  – poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową A przy akustycznie referencyjnej prędkości wiatru i w warunkach referencyjnych

$R_1$  – mierzona w kierunku ukośnym i wyrażona w metrach odległość środka wirnika od mikrofonu

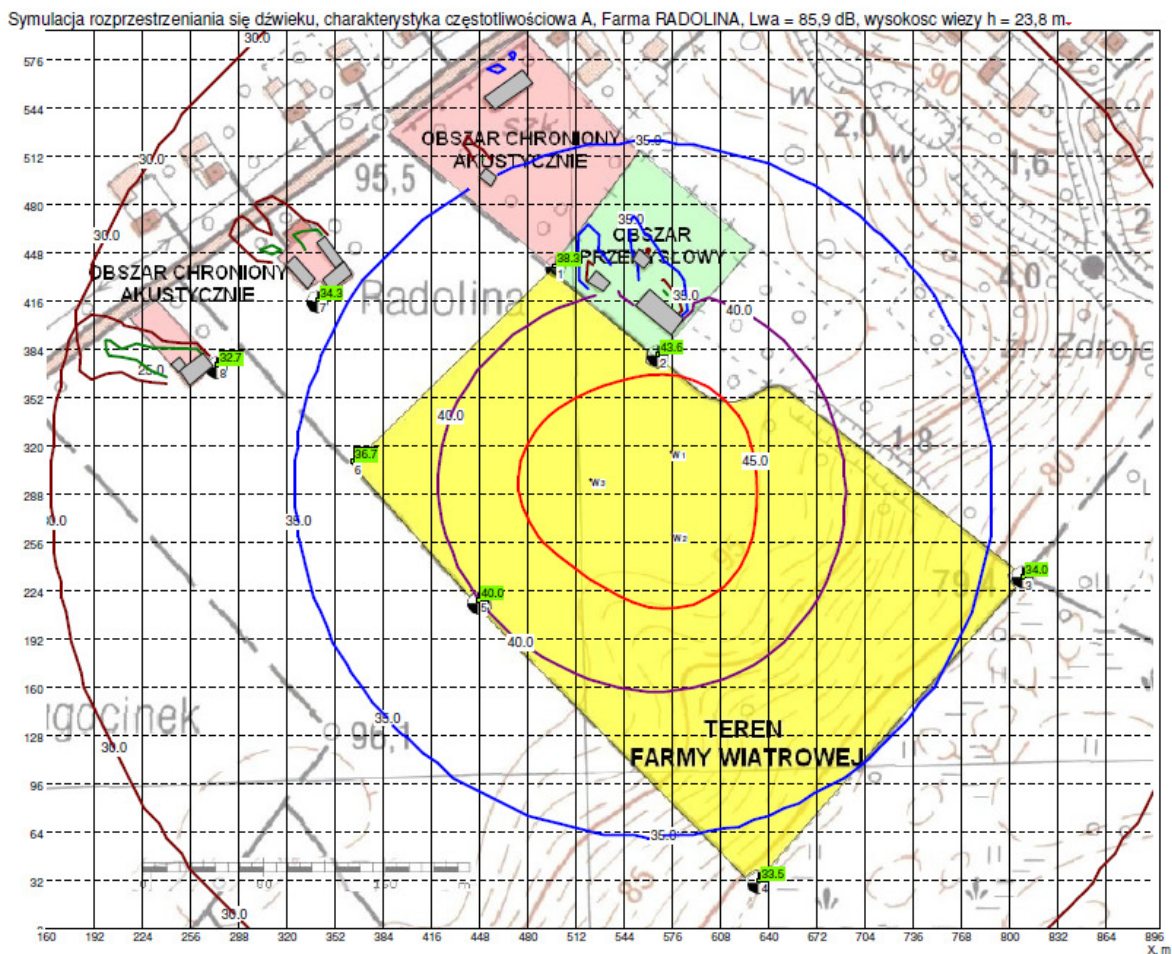
$S_0$  – powierzchnia odniesienia,  $S_0 = 1 \text{ m}^2$

Wykorzystując powyższą zależność otrzymano wartość poziomu mocy akustycznej  $L_{Aeq,c} = 82,9 \text{ dB}$  (należy zaznaczyć, że ze względu na brak technicznych możliwości wyłączenia turbin wiatrowych podczas realizacji badań w październiku 2009 roku nie dokonano pomiarów tła akustycznego, co spowodowało brak możliwości korekty poziomu ciśnienia akustycznego  $L_{pA \text{ eqT}} = 52 \text{ dB}$  o hałas tła).

Przedstawiona metodyka obliczania wartości  $L_{pA}$  została szczegółowo przedstawiona w monografii R. Makarewicza HAŁAS W ŚRODOWISKU, Wyd. OWN Poznań, 1996, która jest zgodna z Instrukcją ITB nr 338, a wyznaczone w ten sposób wartości równoważnego poziomu dźwięku A, przy pomocy programu LEQ Professional ver. 6.x autorstwa Biura Studiów i Projektów Ekologicznych oraz Technik Informatycznych „SOFT-P” zgodnego z PN-ISO 9613-2, stały się podstawą do oceny klimatu akustycznego obszarów wymagających ochrony akustycznej.

## 5. WNIOSKI Z BADAŃ TERENOWYCH I ANALIZ SYMULACYJNYCH

Celem opracowania stało się określenie kształtu klimatu akustycznego powodowanego pracą 3 szt. turbin wiatrowych o mocach nominalnych 150 kW. Parametrem wejściowym do wykonania analiz akustycznych stał się poziom mocy akustycznej  $L_{Aeq,c} = 85,9 \text{ dB}$ . Symulację rozprzestrzeniania się dźwięku wykonano przy pomocy programu LEQ Professional ver. 6.x autorstwa Biura Studiów i Projektów Ekologicznych oraz Technik Informatycznych „SOFT-P” zgodnym z PN-ISO 9613-2.



Rys. 6. Mapa hałasu badanej farmy wiatrowej

Oceną stanu klimatu akustycznego dokonano na podstawie wyznaczonych 8 punktów referencyjnych, na granicy terenu Inwestycji i obszarów chronionych akustycznie. Dokładne rozmieszczenie punktów kontrolnych zaznaczono na mapie w Załączniku 1. Poziomy równoważne dźwięku A ( $L_{Aeq,T}$ ), obliczone za pomocą programu LEQ Professional w poszczególnych punktach referencyjnych zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Równoważne poziomu dźwięku w poszczególnych punktach referencyjnych

Nr punktu kontrolnego	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{Aeq,T}$ [dB A]	38,3	43,6	34,0	33,5	40,0	36,7	34,3	32,7

Na podstawie symulacji rozprzestrzeniania się dźwięku można stwierdzić, że hałas emitowany z rozpatrywanej Inwestycji w stosunku do obszarów wymagających ochrony akustycznej **kształtować się będzie w zakresie od 32,7 dB A (punkt kontrolny nr 8) do 43,6 dB A (punkt kontrolny nr 2).**

## 6. WNIOSKI KOŃCOWE

Temat oddziaływania akustycznego turbin wiatrowych w ostatnich latach jest aktualny, a dla niektórych nawet kontrowersyjny. Obecny stan wiedzy na temat generacji fal dźwiękowych od turbin wiatrowych jest dość wysoki, jednak nie wystarczający, ze względu na różniące się opracowania pod względem próby określenia wpływu ich pracy na komfort życia ludzi mieszkających w bezpośrednim sąsiedztwie parków wiatrowych.

Wydaje się, że do podstawowych problemów w analizach symulacyjnych mających na celu określenia kształtu klimatu akustycznego można zaliczyć:

- a) Stworzenie modelu akustycznego, który powinien uwzględniać kierunkowość źródła, wpływ gradientu temperatury na proces propagacji fali dźwiękowej, impulsowość pracy turbiny, kwalifikację źródła ze względu na jego gabaryty (źródło punktowe czy źródło powierzchniowe).
- b) Identyfikację obszarów chronionych akustycznie, która w wielu przypadkach jest bardzo kłopotliwa, ze względu na częsty brak informacji z Miejscowego Planu Zagospodarowania przestrzennego lub innego dokumentu potwierdzającego bieżącą funkcję zabudowy mieszkaniowej.
- c) Weryfikacja pomiarowa po uruchomieniu turbin, która w głównej mierze zawiera się w ograniczeniach pomiarowych przez negatywny wpływ wiatru na mikrofon pomiarowy.
- d) Uwzględnienie oddziaływania innych źródeł hałasu znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie turbin wiatrowych, w ramach tzw. efektu skumulowanego.

Należy również podkreślić, że znaczącym problemem w prognozowaniu hałasu turbin wiatrowych jest wybór odpowiedniej charakterystyki częstotliwościowej, przy pomocy której można dokonać właściwego wniosku.

Dominujące częstotliwości w analizach widmowych pracy turbin wiatrowych zawierają się głównie w niskich częstotliwościach czy nawet w zakresie infradźwiękowym. Jest to spowodowane charakterem pracy turbin wiatrowych, która jest bezpośrednio powiązana z wiejącym wiatrem, napędzającym turbiny. Wykorzystywanie charakterystyki częstotliwościowej A, zarówno w analizach symulacyjnych jak i badaniach po realizacyjnych jest spowodowane brakiem wartości dopuszczalnych w środowisku poza krzywą korekcyjną A.

## 7. LITERATURA

1. Boczar T. *Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*. Wyd. Pomiar Automatyka kontrola, Gliwice, 2007.
2. Burton T, Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E., *Wind Energy Handbook*, British Library Cataloguing in Publication Data, 2004.
3. Cempel Cz. *Wibroakustyka stosowana*, Wyd. PWN Warszawa, 1989
4. Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wyd. PWN, Warszawa 2001.
5. Flaga A., *Inżynieria wiatrowa. Podstawy i zastosowania*, Wyd. Arkady, Warszawa 2008.
6. Golec M., Golec Z., *Vibration and noise of a horizontal axis wind turbine*, III Międzynarodowa konferencja hałasu turbin wiatrowych Wind Turbine Noise Aalborg, Dania, 2009.

7. Golec M., Golec Z., Cempel C., *Hałas Turbiny Wiatrowej VESTAS V80 podczas eksploatacji*, Wind Turbine Noise 2005, Berlin Niemcy, 2005.
8. Makarewicz R., *Hałas w środowisku*, Wyd. OWN Poznań, 1996.
9. Sadowski J., *Ochrona środowiska przed hałasem i wibracjami*, ITB Warszawa, 1992.
10. Szulczyk J., Cempel Cz., *Vertical Axis Wind Turbine Vibroacoustics*, XXIII SYMPOSIUM – VIBRATIONS IN PHYSICAL SYSTEMS – Poznań – Będlewo 2008.
11. Wegner S., Bareiss R., Guidati G., *Wind Turbine Noise*, Springer, Berlin, 1996.
12. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 4 listopada 2008 roku w sprawie wymagań w zakresie prowadzenia pomiarów wielkości emisji oraz pomiarów ilości pobieranej wody Dz. U. Nr 206, poz. 1991, Załącznik nr 6, Metodyka referencyjna wykonywania okresowych pomiarów hałasu w środowisku, pochodzącego od instalacji lub urządzeń, z wyjątkiem hałasu impulsowego.
13. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku Dz. U. Nr 120, poz. 826.
14. Polska norma PN-EN-01341, Hałas Środowiskowy. Metody pomiaru i oceny hałasu przemysłowego.
15. Polska norma PN-EN 61400-11/2001, Turbozespoły wiatrowe. Cz. 11 Procedury pomiaru hałasu.
16. Polska norma PN-ISO 9613-02/2002, Akustyka. Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metodyka obliczeniowa.
17. Instrukcja Instytutu Technik Budowlanych Nr 338, Metoda określania emisji i imisji hałasu przemysłowego w środowisku.