

Jacek SZULCZYK
Czesław CEMPEL

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
e-mail: czeslaw.cempel@put.poznan.pl

Hałas turbin wiatrowych w zakresie infradźwięków

STRESZCZENIE

Podczas obliczeń, analiz i symulacji rozprzestrzeniania się dźwięku parków farm wiatrowych, wszystkie założenia, analizy i wnioskowanie realizowane jest dla charakterystyki częstotliwościowej A, czyli dla tzw. zakresu słyszalnego. Jednak charakter pracy turbin wiatrowych może powodować w punkcie emisji oddziaływanie akustyczne, również w zakresie fal dźwiękowych poniżej 20 Hz.

Chcąc poddać głębszej dyskusji powyższy problem autorzy przedstawili podstawowe definicje z zakresu infradźwięków turbin wiatrowych, aktualny stan wiedzy dotyczący omawianego zagadnienia oraz podstawowe problemy przy ocenie hałasu turbin wiatrowych metodami symulacyjnymi. Obejmują one m.in.: dostępność modeli propagacji dźwięku dla fal dźwiękowych w zakresie infradźwiękowym, wartości dopuszczalne hałasu środowiskowego określające wielkość ekspozycji na człowieka, sposoby weryfikacji pomiarowej po uruchomieniu inwestycji.

Słowa kluczowe:

infradźwięki, turbiny wiatrowe, projektowanie akustyczne, choroba wibroakustyczna

1. WSTĘP

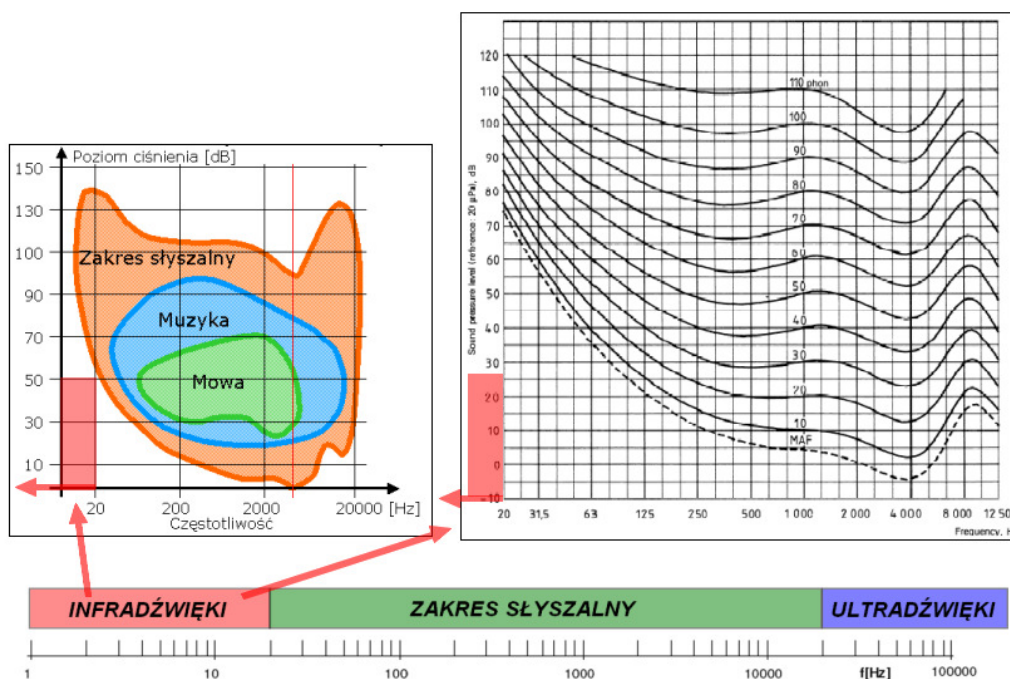
Stan wiedzy o hałasie turbin wiatrowych jest dość wysoki [Hubbard1990], [Barton2004], [Golec2005]. Istnieją teoretyczne opracowania prezentujące identyfikację źródeł hałasu turbin wiatrowych [Wegner1996], zasady propagacji fali dźwiękowej oraz definicję podstawowych parametrów wpływających na poziom hałasu w punktach imisyjnych, np. przy obszarach chronionych akustycznie [Rogers2002]. Jednak wydaje się, że pod względem uciążliwości akustycznej typowej pracy turbin wiatrowych, największym problemem może być oddziaływanie infradźwięków, czyli fal dźwiękowych poniżej 20 Hz. Ich generacja spowodowana jest charakterystycznymi przejściami łopat obok wieży turbiny i powiązana jest bezpośrednio z prędkością obrotową wiatraka.

2. HAŁAS TURBIN WIATROWYCH W ZAKRESIE INFRADŹWIĘKÓW – PODSTAWY TEORII

Infradźwięki są definiowane jako dźwięki lub hałas, którego widmo częstotliwości zawiera się głównie w zakresie 1 Hz – 20 Hz. Jednocześnie fale te kojarzone są bezpośrednio z tonalnością dźwięku (krzywe jednakowej głośności) oraz długością fali. Zasięg fali akustycznej również dla zakresu częstotliwości poniżej 20 Hz można określić na podstawie wzoru nr 1, wyznaczając długość 1 okresu fali dźwiękowej:

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad \left[\frac{m/s}{1/s} = m \right] \quad (1)$$

Wynika stąd, że minimalna długość fali akustycznej dla infradźwięków wynosi około 17 metrów. Na rysunku 2 pokazano właściwości akustyczno – tonalno – częstotliwościowe fal dźwiękowych dla 1 Hz do 20 Hz.



Rys. 1. Właściwości infradźwięków w ujęciu graficznym [Opracowanie własne na podstawie źródeł nieznanymi]

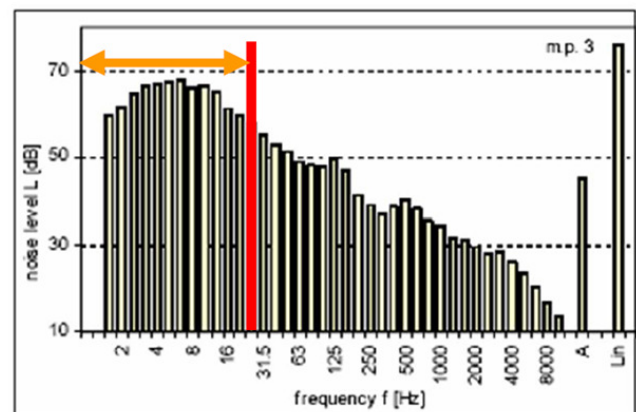
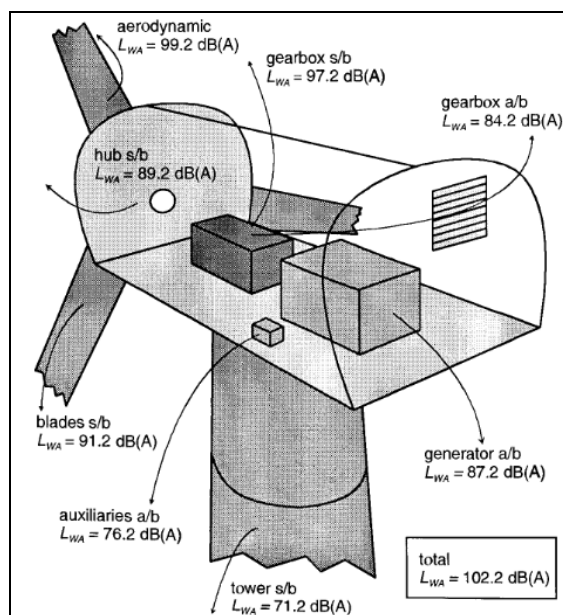
Pod względem źródeł generacji, infradźwięki można podzielić na dwie grupy [Wikipedia2010]:

- a) **naturalne** - bolidy (meteoryty), duże wodospady, fale morskie, lawiny, silny wiatr, pioruny, tornada, trzęsienia ziemi (fale sejsmiczne), wulkany
- b) **sztuczne** - ciężkie pojazdy samochodowe, drgania mostów, eksplozje, głośniki, odrzutowce i śmigłowce, przemysł ciężki (sprężarki tłokowe, pompy próżniowe i gazowe, wieże wiertnicze, turbodmuchawy, *elektrownie wiatrowe*), rurociągi, urządzenia chłodzące i ogrzewające powietrze.

W wielu przypadkach obok turbin wiatrowych jako sztucznego źródła infradźwięków mamy do czynienia z naturalnymi źródłami, np. wiejącym wiatrem.

3. AKTUALNY STAN WIEDZY

Hałas turbin wiatrowych pod względem źródeł emisji akustycznej podzielony został na hałas mechaniczny – pochodzący z gondoli (generator, przekładnia, skrzynia biegów) i hałas aerodynamiczny – pochodzący od ruchu obracających się łopat (zaburzenia ośrodka sprężystego na końcówkach łopat, turbulencje, kawitacja powietrzna, zmiany ciśnienia ośrodka sprężystego podczas przejścia łopaty obok wieży) [Rogers2002].



Rys. 3. Obraz widmowy turbiny wiatrowej V80 [Gołec2005]

Rys. 2. Poziom mocy akustycznej [Wegner1996]

Hałas aerodynamiczny jest wynikiem pracy łopat, które powodują emisję akustyczną zarówno w zakresie infradźwięków oraz w zakresie słyszalnym, jako charakterystyczny dźwięk przejścia łopaty przez wieżę, czyli tzw. „...szszyy, szszyy, szszyy”.

Hałas mechaniczny generuje dominujące składowe widma amplitudowo – częstotliwościowego w zakresie słyszalnym, tzn. w paśmie powyżej 100 Hz. Częstotliwości te nie stanowią większego zagrożenia dla środowiska w dalszych odległościach od źródła, np. przy obszarach chronionych akustycznie, ze względu na wystarczające tłumienie fali dźwiękowej przez powietrze, czy pochłanianie przez grunt. Dodatkowo większość turbin wiatrowych posiada wygłuszenie samej gondoli,

co dodatkowo wpływa na redukcję hałasu pochodzącego od elementów mechanicznych turbin.

Aktualny stan wiedzy o procesach generacji fal akustycznych w zakresie infradźwiękowym jest dość szeroki, np. [Delta2008], [COLBY2009– AWEA]. Pokazuje on źródła powstawania infradźwięków, które podobnie jak charakterystyczne dźwięki „...szszy, szszy, szszy...” w zakresie słyszalnym, powstają wskutek przejść łopat przez wieżę turbiny. Infradźwięki powstają na skutek zmiany ciśnienia ośrodka sprężystego bezpośrednio powiązanego z prędkością obrotową turbiny.

Jednocześnie w opracowaniach tych brak zgodności odnośnie wpływu hałasu w zakresie 1 Hz – 20 Hz na człowieka. Istnieją stanowiska twierdzące o braku bezpośredniego wpływu pracy turbin wiatrowych na komfort i zdrowie człowieka [Delta2008], [COLBY2009 – AWEA], a jednocześnie zupełnie przeciwne wnioski wyciągnięto z badań [Pedersen2009] i [Perpoint2008].

Z polskich autorów Z. Engel z AGH w Krakowie, we współpracy z Centralnym Instytutem Ochrony Pracy (CIOP) z Warszawy podjął się próby oceny wpływu hałasu infradźwiękowego na stanowisku pracy na zdrowie ludzkie. Prace wyżej wymienionych autorów obejmowały również badania nad tzw. chorobą wibroakustyczną, czyli ogólnoustrojowej patologii charakteryzującej się nieprawidłową proliferacją o specjalnych komórkowych formach, która jest spowodowana nadmierną ekspozycją niskoczęstotliwościowych dźwięków oraz hałasu infradźwiękowego. Jednak prace te nie odnoszą się bezpośrednio do oceny szkodliwości pracy turbin wiatrowych.

4. OCENA HAŁASU TURBIN WIATROWYCH METODAMI SYMULACYJNYMI

4.1. MODELE PROPAGACJI DŹWIĘKU FAL AKUSTYCZNYCH

Podstawowy model propagacji dźwięku został zawarty w Polskiej Normie PN – EN ISO 9613-02 *Akustyka, Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metoda obliczania*, która składa się z algorytmów służących do obliczania tłumienia dźwięków w pasmach oktaowych (o środkowych częstotliwościach pasm od 63 Hz do 8 kHz), pochodzącego od punktowego źródła dźwięku, zespołu źródeł punktowych lub źródeł ruchomych.

W algorytmach uwzględniono wpływy następujących zjawisk fizycznych:

- a) rodzaju źródła hałasu – punktowe, powierzchniowe lub liniowe,
- b) kierunkowość źródła,
- c) pochłaniania przez atmosferę,
- d) wpływu gruntu,
- e) odbicia od powierzchni
- f) ekranowania przez przeszkody,

W polskich warunkach programy wykorzystywane do analiz symulacyjnych propagacji dźwięku od turbin wiatrowych można podzielić na dwie grupy:

- a) programy uniwersalne – wykorzystywane do analiz symulacyjnych hałasu przemysłowego, np. ZEWHALAS'92, LEG Professional 5.x i 6.x, SuondPLAN, IMMI, CadnaA
- b) programy dedykowane – stanowiące jeden z modułów programów wykorzystywanych w celach projektowych farm wiatrowych, np. WindPRO.

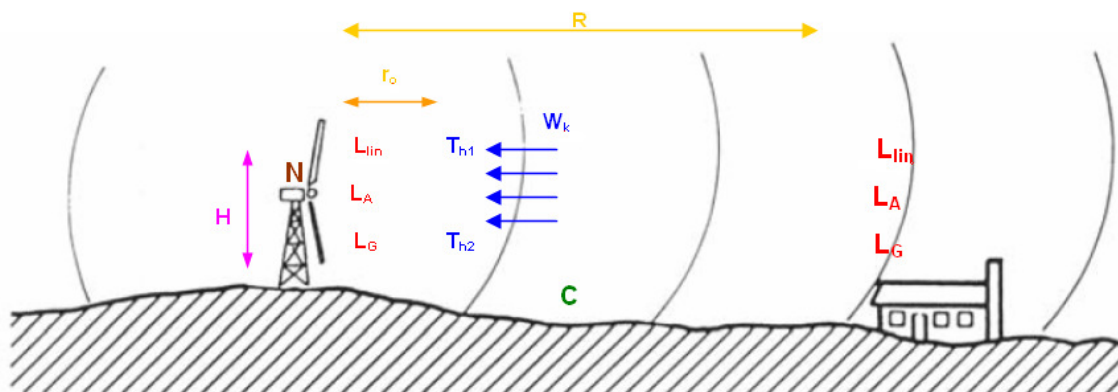
Poszczególne grupy cechują się zarówno wieloma zaletami, jak ogólna dostępność, łatwość programowania i jasność interpretacji wyników jak i wadami obejmującymi głównie brak rozbudowanych algorytmów propagacji dźwięku w przypadku programów dedykowanych. Jednak wszystkie programy opierają się głównie na założeniach normy ISO 9613-02, co przy próbie oceny źródeł o gabarytach rzędu 130 metrów i niskoczęstotliwościowym charakterze pracy może okazać się niewystarczające.

Wydaje się właśnie, że największym problemem może być brak możliwości określenia hałasu turbin wiatrowych w paśmie częstotliwości od 1 Hz – 20 Hz, czyli poniżej zakresu słyszalnego ucha ludzkiego. W algorytmach obliczeniowych komercyjnych programów symulacyjnych brak jest takich modułów, ponieważ od strony legislacyjnej nie są one wymagane, np. przez brak wartości kryterialnych hałasu niskoczęstotliwościowego w środowisku.

Należy zwrócić uwagę, że w większości przypadków wykonywania analiz symulacyjnych źródło hałasu jakim jest turbina wiatrowa modelowana jest przy pomocy źródła punktowego, o określonym poziomie mocy akustycznej, kierunkowości o wysokości na której znajduje się gondola wiatraka. Może to z jednej strony powodować pewne nieścisłości w modelowaniu polegające tylko na odwzorowaniu hałasu mechanicznego, który generuje się głównie z gondoli urządzenia, bez uwzględnienia hałasu aerodynamicznego powodowanego przez łopaty turbiny. Z drugiej strony poziom mocy akustycznej wyznaczony zgodnie z Polską Normą PN-EN 61400-11, Turbozespoły wiatrowe, Część 11: Procedury pomiaru hałasu, zostaje określony względem punktu pomiarowego zlokalizowanego na podłożu, co powoduje, że wartość poziomu mocy akustycznej odnosi się zarówno do hałasu mechanicznego jak i aerodynamicznego.

Dlatego wydaje się, że modele akustyczne wykorzystywane do analiz akustycznych klasycznych turbin wiatrowych powinny zawierać w swoich algorytmach dodatkowe składowe uwzględniające charakterystykę samego źródła, np. jej moc akustyczną w watach lub wyraźny podział na hałasu pochodzący od gondoli i od obracających się łopat, gabaryty źródła (możliwość modelowania jako źródło powierzchniowe) oraz dodatkowe miary akustyczne zawierające informację również o niższych niż zakres słyszalnych częstotliwości dźwięku.

Poniżej pokazano graficzne zestawienie składowych pola akustycznego turbin HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine), które według wiedzy autorów powinny być uwzględnione podczas określania wielkości zagrożenia hałasem infradźwiękowym pochodzącym od parków wiatrowych.



Rys. 3. Składowe pola akustycznego turbin HAWT [Opracowanie własne na podstawie Wegner1996]

gdzie:

N – moc źródła dźwięku w [W], poziom
mocy akustycznej 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

4.2. WARTOŚCI DOPUSZCZALNE HAŁASU ŚRODOWISKOWEGO

Obecnie standardy jakości klimatu akustycznego w środowisku są uregulowane w stosunku do charakterystyki częstotliwościowej A, czyli dla tzw. zakresu słyszalnego. Dokument regulujący [Rozporządzenie2007] dopuszczalne poziomy hałas w środowisku określa wartości kryterialne dla poszczególnych rodzajów terenu (np. zabudowa mieszkaniowa czy usługowa) oraz kategorię źródła hałasu (hałas przemysłowy czy hałas komunikacyjny), które kształtują się w przedziale 65 – 50 dB w porze dnia i 55 – 40 dB w porze nocy.

Dla hałasu infradźwiękowego w kraju nie istnieją, żadne kryteria określające poziomy dopuszczalne hałasu infradźwiękowego w środowisku. Jedyną wartością ujmującą dopuszczalne poziomy hałasu w zakresie infradźwięków jest Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej [Rozporządzenie2005] w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, gdzie równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy lub tygodnia pracy nie powinien przekraczać wartości **102 dB**, a szczytowy nieskorygowany poziom ciśnienia akustycznego nie może przekraczać wartości **145 dB**.

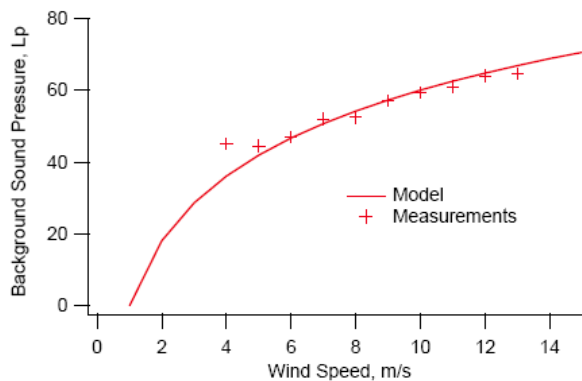
Należy zwrócić uwagę, że wartości dopuszczalne podane w Dz. U. nr 157, poz. 1318 odnoszą się do hałasu na stanowisku pracy i do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu. Wartość 102 dB nie należy stosować do określania hałasu w środowisku.

4.3. WERYFIKACJA POMIAROWA MODELU OBLICZENIOWEGO

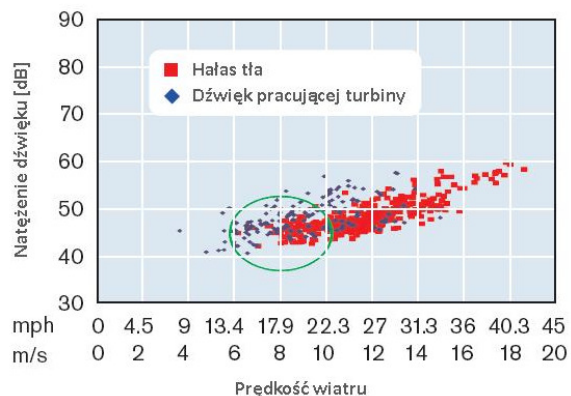
Wykonując analizy obliczeniowe przy pomocy programów symulacyjnych należy również założyć pewien poziom niepewności modelu akustycznego. Dlatego w wielu przypadkach po zakończeniu realizacji inwestycji powinno się dokonać oceny weryfikacyjnej, która powinna stać się podstawą do ostatecznych wniosków z obliczeń akustycznych.

Sam proces weryfikacji pomiarowej turbin wiatrowych po ich uruchomieniu może okazać się dość kłopotliwy, ze względu ograniczenia procedur pomiarowych określających metodykę pomiarową przemysłowych źródeł hałasu. 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, stanowiące podstawę do określenia poziomu dźwięku w punktach emisji, ogranicza zakres prędkości wiatru dla którego można wykonywać pomiary dźwięku. Jest oczywiste, że mimo stosowania osłon przeciwwietrznych na mikrofony, prędkość wiatru powyżej 5 m/s w sposób znaczący wpływa na wynik badań. Dlatego czy nie należałoby sprecyzować innej metodyki pomiarowej, która to umożliwiłaby określenie poziomu dźwięku od turbin wiatrowych

dla prędkości wiatru powyżej 5 m/s. Według danych literaturowych prędkość wiatru powyżej 10 m/s, podczas realizacji pomiarów terenowych powoduje występowanie zjawiska tzw. maskowania źródła dźwięku, czyli przypadek pokrywania się (wyrównywania się) poziomów dźwięku źródła hałasu i tła akustycznego. Sytuację tę przedstawiają poniższe wykresy:



Rys. 5. Wpływ wiatru na poziom dźwięku turbin wiatrowych, źródło: [Wagner1996]



Rys. 6. Wpływ wiatru na poziom dźwięku turbin wiatrowych, źródło:

[www.sunnylifetechnologies.com 2010]

Należy również dodać, że sam wiatr stanowi naturalne źródło hałasu infradźwiękowego, a w zestawieniu z pracą turbin wiatrowych, jako nieodzownego medium napędzającego silniki wiatrowe, stanowi zjawisko fizyczne, które należy zawsze uwzględniać przy analizach akustycznych turbin wiatrowych.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W referacie zarysowano podstawowe czynności związane oceną akustyczną turbin wiatrowych na etapie projektowania, pokazano podział źródeł generacji dźwięku w klasycznych turbinach wiatrowych, przedstawiono aktualny stan wiedzy dotyczący infradźwięków towarzyszących pracy silników wiatrowych, opisano podstawowe modele akustyczne wykorzystywane przy prognozowaniu klimatu akustycznego farm wiatrowych, zwrócono uwagę na ograniczenia analizy częstotliwościowej w zakresie słyszalnym oraz problemy weryfikacji poziomów dźwięku w punktach emisji po realizacji inwestycji.

Dalszymi kierunkami badań powinny stać się rozważania dotyczące wyboru odpowiedniej charakterystyki częstotliwościowej na etapie określenia poziomu mocy akustycznej źródła i dalszych analiz symulacyjnych, odpowiedniej kwalifikacji jako źródło dźwięku oraz propozycja metod pomiarowych przy weryfikacji poziomów dźwięku już po zainstalowaniu elektrowni wiatrowych.

LITERATURA:

1. Boczar T. *Energetyka wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*. Wyd. Pomiary 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, Poznań – Warszawa, 1978.
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., Cempel C., *Hałas Turbiny Wiatrowej VESTAS V80 podczas eksploatacji*, Wind Turbine Noise 2005, Berlin Niemcy, 2005.
7. Hodgson E., *Residential Wind Turbine and Noise Emission*, 2005.
8. Hubbard H., Shepherd K., *Wind Turbine Acoustic*, NASA 1990.
9. Makarewicz R. *Hałas w środowisku*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań, 1996.
10. Pedersen E., *Human response to wind turbine noise – perception, annoyance and moderating factors*, Gegetorg 2007.
11. Rogers A., Manwell J., Wright S., *Wind Turbine Acoustics Noise*, Miami, USA, 2006.
12. Wegner S., Bareiss R., Guidati G., *Wind Turbine Noise*, Springer, Berlin, 1996.
13. Strona poświęcona energii odnawialnej, <http://www.renewableenergyfocus.com>, grudzień 2008.
14. [Szulczyk2008]: Szulczyk J., Cempel Cz., “*Vertical Axis Wind Turbine Vibroacoustics*”, XXIII SYMPOSIUM – VIBRATIONS IN PHYSICAL SYSTEMS – Poznań – Będlewo 2008.
15. [Szulczyk2009]: Szulczyk J., Cempel Cz., “Zjawiska akustyczne turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu” Otwarte Seminarium Zakładu Wibroakustyki I Biodynamiki Systemów, Poznań 1.06.2009.
16. Strona Europejskiego Towarzystwa Energetyki Wiatrowej, <http://www.ewea.org/>, styczeń 2009.
17. Strona Polskiego Towarzystwa Energetyki Wiatrowej <http://www.psew.pl/>, styczeń 2009.
18. Strona Producenta turbin wiatrowych <http://www.windandpower.com/>, styczeń 2009.
19. 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.
20. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku Dz. U. Nr 120, poz. 826.
21. Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 5 sierpnia 2005 roku Dz. U. nr 157, poz. 1318 w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy
22. Polska Norma PN-EN 61400-11, Turbozespoły wiatrowe, Część 11: Procedury pomiaru hałasu.
23. Polska Norma PN-ISO 9613-02, Akustyka, Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej. Ogólna metoda obliczania.
24. Instrukcja Instytutu Technik Budowlanych Nr 338, Metoda określania emisji i imisji hałasu przemysłowego w środowisku.

25. Burton T, Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E., *Wind Energy Handbook*, British Library Cataloguing in Publication Data, 2004.
26. Hubbard H., Shepherd K., *Wind Turbine Acoustic*, NASA 1990.
27. Golec M., Golec Z., Cempel C., *Hałas Turbiny Wiatrowej VESTAS V80 podczas eksploatacji*, Wind Turbine Noise 2005, Berlin Niemcy, 2005.