

## HAŁAS TURBINY WIATROWEJ VESTAS V80 PODCZAS EKSPLOATACJI

Maria GOLEC\*, Zdzisław GOLEC\*, Czesław CEMPEL\*

Politechnika Poznańska, Instytut Mechaniki Stosowanej  
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, fax. 061 665 23 07  
Maria.Golec@put.poznan.pl, Zdzisław.Golec@put.poznan.pl  
Czeslaw.Cempel@put.poznan.pl

### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań hałasu turbiny wiatrowej VESTAS V80 o mocy 2 MW. Hałas turbiny mierzono w pojedynczej sesji pomiarowej na farmie Zagórze położonej niedaleko wsi Zagórze na południowy wschód od wyspy Wolin. Farma wiatrowa Zagórze składa się z 15 turbin VESTAS V80. W dniu pomiarów hałasu na farmie z przyczyn technicznych pracowało 12 turbin. Podczas badań analizowano hałas turbiny położonej na skraju farmy od strony nawietrznej, gdyż nie uzyskano zgody na pracę tylko jednej turbiny. Na drodze symulacji numerycznej oszacowano hałas pojedynczej turbiny w terenie a po uwzględnieniu pracy wszystkich turbin rozkład pola akustycznego wokół elektrowni.

Słowa kluczowe: hałas, turbiny wiatrowe, odnawialne źródła energii.

### NOISE OF WIND POWER TURBINE VESTAS V80 IN A FARM OPERATION

#### Summary

The paper presents the results of noise investigation of a V80 wind turbine of 2 MW power. The turbine noise was measured in a single measurement session at the Zagórze wind farm located near the Zagórze village, to south-east from the Wolin Island. The farm is composed of 15 VESTAS V80 turbines. Some technical reasons caused that on the measurement day 12 of the turbines were operative. The noise was analyzed for a turbine located at the farm border at the windward side, while no consent was given for operation of only a single turbine. Numerical simulation allowed to assess the noise of a single turbine located in the plant and, considering operation of all the turbines, to assess distribution of the acoustic field in the proximity of the wind power plant.

Keywords: noise, wind turbine, renewable energy sources.

## 1. WPROWADZENIE

Obserwowane w wielu krajach zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii (OZE) np. energią wody, słońca, wiatru, biomasy, energią geotermalną jest wynikiem analizy możliwości wyczerpania się zasobów paliw kopalnych. Z drugiej strony ma na celu działania ukierunkowane na ochronę środowiska naturalnego człowieka. Rozwój elektrowni wykorzystujących odnawialne źródła energii w tym energii wiatru jest jednym z ważniejszych zadań wysoko rozwiniętych społeczeństw. Parlament Europejski w 2001 roku przyjął Dyrektywę 2001/77/WE w sprawie wspierania na rynku wewnętrznym produkcji energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych (Dz. Urz. WE L 283 z 27.10.2001). W Polsce, od dnia 3 maja 2005 roku, obowiązuje ustawa z dnia 4 marca 2005 roku zmieniająca ustawę – Prawo Energetyczne, oraz ustawę – Prawo Ochrony Środowiska (Dz.U. z 2005 r, Nr 62, poz. 552), która reguluje wdrożenie Dyrektywy Wspólnot Europejskich 2001/77/WE. W myśl tej dyrektywy

w państwach Unii Europejskiej planuje się do 2010 roku zwiększyć produkcję energii z OZE do 22%.

Najpowszechniej wykorzystywanym odnawialnym źródłem energii na świecie jest wiatr będący źródłem energii elektrycznej produkowanej przez turbiny w elektrowniach wiatrowych. Na podstawie wieloletnich badań prowadzonych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie [1] stwierdzono, że na powierzchni obejmującej prawie 2/3 terytorium Polski występują warunki dla rozwoju i lokalizacji farm wiatrowych. Na wymienionym obszarze Polski średnioroczna prędkość wiatru wynosi 4 m/s, czyli jest wystarczająca dla eksploatacji turbin. Większość turbin wiatrowych może bowiem pracować przy prędkości wiatru z zakresu (4÷25) m/s. Najbardziej wietrzne obszary położone są na północy Polski – na wybrzeżu Bałtyku. Średnioroczna prędkość wiatru, na wysokości ponad 50 m, wynosi tam (5.5÷7.5) m/s. Polska jest uważana za kraj średnio zasobny w wiatr, mimo to rozwój elektrowni wiatrowych jest jeszcze bardzo wolny. W styczniu 2003 roku do użytku oddana została największa na terenach Polski

elektrownia wiatrowa zlokalizowana w Zagórze koło Wolina. W skład farmy wchodzi 15 turbin VESTAS V80 o mocy 2 MW każda. Według informacji podanych w [2], w Polsce w końcu 2003 roku łączna moc elektrowni wiatrowych wynosiła 63 MW i w 2004 roku nie uległa zmianie.

Wprowadzenie do środowiska farm wiatrowych, zajmujących znaczne obszary (często kilka ha) wiąże się z pewnymi uciążliwościami dla środowiska. Najważniejsze z nich to hałas oraz bezpośrednie zagrożenie życia ptaków w przypadku ich kolizji z wirującymi łopatkami turbin. Źródłem hałasu są przede wszystkim obracające się łopaty i w mniejszym stopniu wirnik generatora i przekładnia.

## 2. MINIMALIZACJA HAŁASU TURBIN WIATROWYCH – KIERUNKI DZIAŁAŃ

Szeroki zakres prac badawczo – rozwojowych turbin wiatrowych prowadzonych przez Narodowe Laboratorium Odnawialnej Energii (National Renewable Energy Laboratory – NREL) [3] obejmuje również badania i działania w celu minimalizacji hałasu eksploatowanych turbin. Problem, który nie został do końca rozwiązany to minimalizacja hałasu aerodynamicznego generowanego przez obracające się łopaty. Zmniejszenie uciążliwości hałasu towarzyszącego eksploatacji turbin jest możliwe poprzez działania w źródle zakłóceń akustycznych lub na drodze propagacji dźwięku. W pierwszym przypadku poprawę właściwości akustycznych turbiny można uzyskać poprzez optymalizację aerodynamicznych rozwiązań konstrukcyjnych podzespołów turbin np. geometrii i układu łopatek wirnika lub ostatecznie poprzez zmianę prędkości obrotowej wirników. Moc akustyczna jest bowiem proporcjonalna do piątej potęgi względnej prędkości liniowej łopaty [4, 5]:

$$N \sim \left( \frac{v_r}{v_w} \right)^5, \quad (1)$$

gdzie  $v_r$  – prędkość liniowa końca łopaty,  
 $v_w$  – prędkość wiatru.

Wartością krytyczną jest uzyskiwana moc turbiny przy danej prędkości wiatru  $v_w$ , gdyż minimalizacja mocy akustycznej turbiny poprzez zmniejszenie prędkości obrotowej wirników (zmniejszenie prędkości liniowej  $v_r$  końców łopatek) powoduje równocześnie zmniejszenie mocy energetycznej turbiny. Im mniejsza jest prędkość  $v_r$  tym ciszej w środowisku, ale mniejsza moc turbiny. Zmniejszenie uciążliwości hałasu turbin wiatrowych w środowisku można także uzyskać na drodze propagacji dźwięku np. poprzez:

- odpowiednie usytuowanie farmy wiatrowej względem potencjalnie zagrożonych obiektów np. lokalizując farmę w odległości (500÷600) m od zabudowy mieszkaniowej z uwzględnieniem średniorocznego rozkładu kierunków i prędkości wiatru,

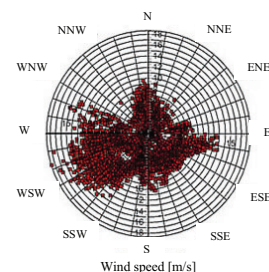
- właściwe wzajemne usytuowanie turbozespołów wiatrowych,
- uwzględnienie właściwości generowanego dźwięku.

W celu weryfikacji obliczeniowych modeli mocy akustycznej i dla racjonalnej oceny emitowanego hałasu przez turbiny i ich elementy, prowadzone są badania hałasu podczas eksploatacji elektrowni wiatrowych. Wyniki badań wykorzystywane są do poprawnego doboru stref ochronnych, jak również w dalszych pracach konstrukcyjnych. Warunki prowadzenia badań hałasu turbin wiatrowych określają zapisy normowe [6, 7] podając między innymi: wymaganą liczbę punktów pomiarowych, ilość jednocześnie rejestrowanych wielkości i akustycznych i nieakustycznych i wymagane wartości tych wielkości, z których wynika czas prowadzenia badań i liczba sesji pomiarowych.

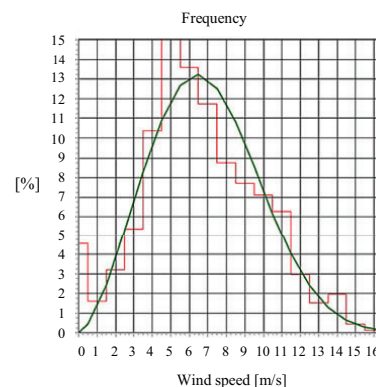
## 3. CHARAKTERYSTYKA FARMY WIATROWEJ ZAGÓRZE

Farma wiatrowa Zagórze duńskiej firmy VESTAS usytuowana jest niedaleko wsi Zagórze, na południowy wschód od wyspy Wolin. Jej lokalizacja została wybrana z uwagi na brak przeszkód terenowych, brak przeciwwskazań związanych z ochroną środowiska, sąsiedztwo od zachodu z Zalewem Szczecińskim, dobrą jakością podłoża (szorstkość terenu  $z_0 = 0.05m$ ) oraz na podstawie badań wietrzności (wyniki badań wietrzności według [8] przedstawia rysunek 1).

a)



b)



Rys. 1. Wyniki badań wietrzności na terenie farmy wiatrowej Zagórze [8]; a) róża wiatrów, b) rozkład prędkości wiatrów

Położenie farmy na kierunku przeciwnym do kierunku najczęściej wiejących wiatrów w odległości około 800 m od najbliższych zabudowań mieszkalnych (mierzonej od granicy farmy – w kierunku północno wschodnim) zmniejsza prawdopodobieństwo zagrożenia tych terenów hałasem turbin. Zatem warunek odpowiedniego usytuowania elektrowni wiatrowej względem potencjalnie zagrożonych obiektów z uwzględnieniem średniorocznego rozkładu kierunków i prędkości wiatru (rys. 1a) został spełniony.

W skład farmy wchodzi 15 turbin VESTAS V80 o mocy 2 MW każda – widok kilku turbozespołów wiatrowych pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Turbiny V80 na farmie Zagórze

Turbina VESTAS V80 jest modelem trójłapatowym z wirnikiem o średnicy 80 m wyposażonym w łopaty o zmiennym kącie nachylenia. Dane techniczne turbiny V80 zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczne turbiny V80

Średnica wirnika	80 m
Powierzchnia łopat	5.027 m <sup>2</sup>
Obroty wirnika	(9.0 – 19.0) obr/min
Liczba łopat	3
Wysokość wieży	78 m
Prędkość początkowa wiatru	4 m/s
Prędkość nominalna wiatru	15 m/s
Krytyczna prędkość wiatru	25 m/s
Masa elektrowni wiatrowej	265 T
Masa wieży	170 T
Masa gondoli	61 T
Masa wirnika	34 T

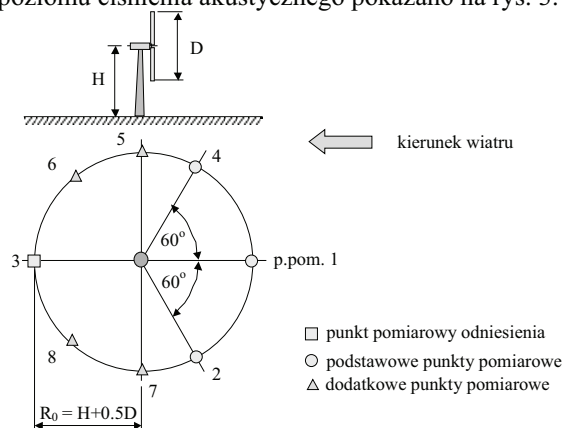
W sąsiedztwie farmy wiatrowej położonej na płaskim, otwartym terenie rolniczym brak przeszkód terenowych. Odległości między turbinami wynoszą około 240 m.

#### 4. WARUNKI BADAŃ HAŁASU TURBINY V80

Pomiary hałasu turbiny Vestas V80 przeprowadzono w czasie jednej sesji pomiarowej podczas eksploatacji farmy. Nie istniała możliwość pomiaru hałasu, (zgodnie z normą [7]), w czasie pracy tylko jednej turbiny, ani możliwość pomiaru tła akustycznego, ponieważ nie uzyskano zgody na wyłączenie elektrowni. Podczas badań, z przyczyn technicznych, pracowało 12 turbin. W celu minimalizacji wpływu ich pracy na wyniki pomiarów hałasu jednej turbiny, do badań wybrano turbinę położoną na skraju parku od strony nawiętrznej.

W dniu pomiarów warunki atmosferyczne były następujące: temperatura powietrza 15°C, ciśnienie atmosferyczne 1013 hPa, kierunek wiatru północno – wschodni, prędkość wiatru zmienna od 5m/s do 7.3 m/s (zgodnie z [7] referencyjna prędkość wiatru stosowana do obliczeń poziomu mocy akustycznej pojedynczej turbiny wynosi 8 m/s). Prędkość wiatru odpowiadała najbardziej prawdopodobnej wartości dla danego terenu (patrz rysunek 1b). Wiatr wiał w kierunku najbliższych zabudowań (wieś Zagórze) co na tym terenie występuje sporadycznie (patrz róża wiatrów – rysunek 1a). W czasie pomiarów hałasu moc turbiny wynosiła około 0.6 MW.

Do badań hałasu i akwizycji danych akustycznych (widma tercjowe poziomu hałasu w pasmach o częstotliwościach środkowych (1.6 ÷ 10000) Hz wykorzystano zestaw: Analizator Drgań i Hałasu SVAN 912AE, mikrofon ½' SVO2-C4 z osłoną przeciwwietrzną, kalibrator KA10. W celu zminimalizowania wpływu rodzaju gruntu występującego w poszczególnych punktach pomiarowych wokół turbiny, statyw mikrofonu zawsze był usytuowany na płycie odbijającej dźwięk. Punkty pomiarowe znajdowały się w odległościach  $R_0 \approx 120$  m od środka turbiny ( $R_0 = H + 0.5 D$ , gdzie H – wysokość wieży, D – średnica wirnika). Lokalizację punktów pomiarowych poziomu ciśnienia akustycznego pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Położenie punktów pomiarów hałasu turbiny V80

Hałas mierzono w dwóch seriach. Po pierwsze, w celu oszacowania mocy akustycznej turbiny wykonano po pięć pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w trzech pozycjach mikrofonu (pozycje zewnętrzne – punkty pomiarowe 1, 2, 4) i w pozycji odniesienia – punkt 3 (położenie zewnętrzne mikrofonu). W drugiej serii, w celu oceny kierunkowości źródła i zebrania danych do obliczeń modelowych rozprzestrzeniania się hałasu w środowisku, wykonano dodatkowo po pięć pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego w punktach 5, 6, 7 i 8.

## 5. WYNIKI BADAŃ HAŁASU TURBINY V80

Uśrednione energetycznie tercjowe widma poziomu ciśnienia dźwięku w każdej z czterech pozycji mikrofonu (rysunek 4) obrazują częstotliwościowy rozkład hałasu wokół turbiny. Na widmach hałasu można wyróżnić dwa charakterystyczne pasma częstotliwości: (1.6 ÷ 100) Hz i (125 ÷ 10000) Hz (tabela 2).

Tabela 2.

Charakterystyczne pasma częstotliwości hałasu turbiny V80

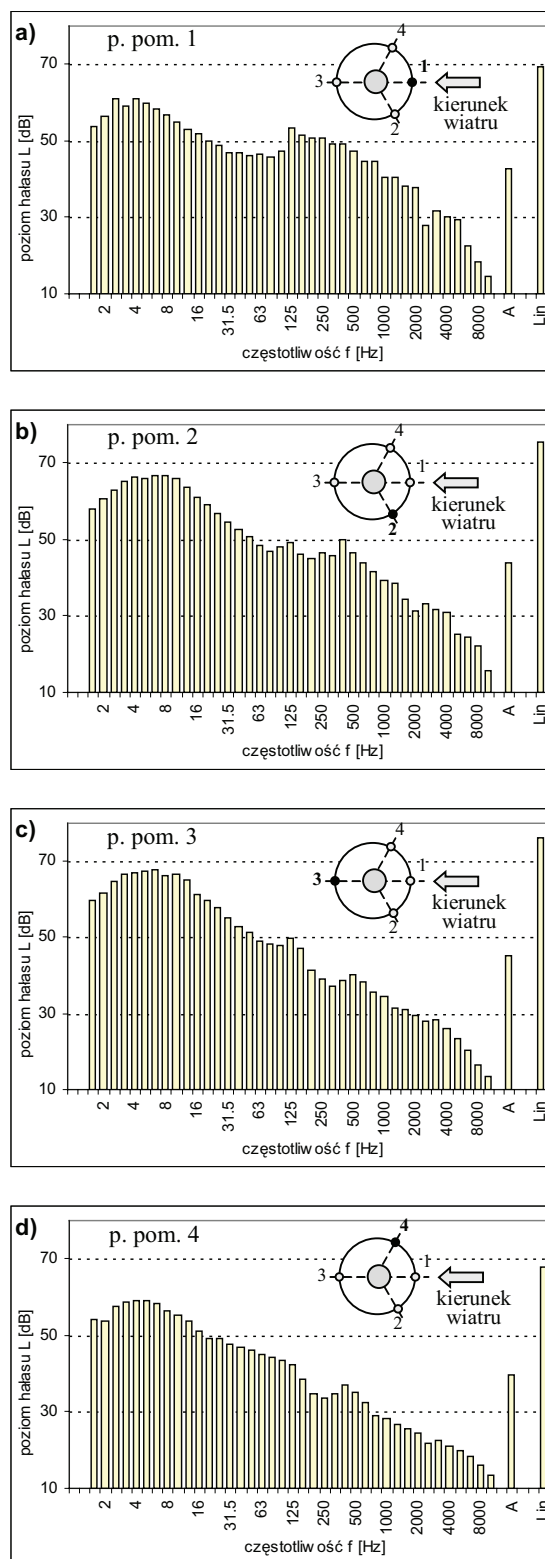
Przedział częstotliwości [Hz]	Poziom hałasu $L_{Lin}$ [dB]			
	Punkt pomiarowy			
	1	2	3	4
1.6 – 100	68.6	75.3	76.3	67.5
125 – 10000	59.6	56.5	53.2	46.6

Pierwsze obejmujące infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy (1.6÷100) Hz, w którym liniowy poziom ciśnienia dźwięku  $L_{p, Lin} \approx 76$  dB jest znacznie wyższy, niż w drugim (125÷10000) Hz:  $L_{p, Lin} \approx 60$  dB. Poziom hałasu infradźwiękowego i niskoczęstotliwościowego jest najwyższy w dwóch punktach. W referencyjnym punkcie pomiarowym – tzn. w punkcie 3, gdy płaty wirnika turbiny mijają maszt wieży od strony zawietrznej i w punkcie 2 po wyjściu płatów wirnika ze strefy masztu wieży (płaty wirnika obracały się zgodnie z ruchem wskazówek zegara).

W paśmie wyższych częstotliwości z zakresu słyszalnego poziomu hałasu jest znacznie niższy tzn. o (9÷23) dB. Największą wartość poziomu hałasu w zakresie słyszalnym obserwuje się w punkcie 1 tzn. w miejscu, w którym płaty wirnika mijają maszt turbiny od strony nawietrznej.

Z analizy danych pomiarowych wynika, że w hałasie generowanym przez turbinę V80 dominują niskie częstotliwości. Maksymalną wartość poziomu dźwięku zaobserwowano w punkcie 3 będącym punktem referencyjnym, a minimalną w punkcie 4:  $L_{p, Amax} \approx 45$  dB;  $L_{p, Amin} \approx 40$  dB.

Istotny hałas, zarówno niskoczęstotliwościowy jak i w paśmie słyszalnym jest więc generowany w momencie, gdy płaty wirnika mijają maszt turbiny.

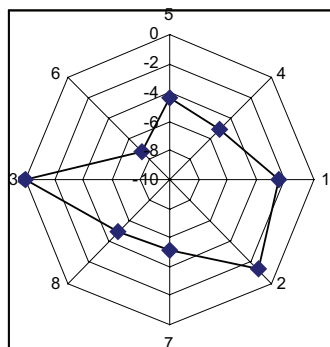


Rys. 4. Uśrednione widma poziomu hałasu turbiny V80

Potwierdzeniem powyższego jest pokazana na rysunku 5 kierunkowość źródła dźwięku turbiny. Współczynnik kierunkowości zdefiniowano jako różnicę między uśrednionymi poziomami dźwięku A w określonych pozycjach pomiarowych, a uśrednionym poziomem dźwięku A w pozycji odniesienia (punkt pomiarowy 3). Obserwowany wzrost wartości współczynnika kierunkowości



w punktach pomiarowych 2 i 1 jest skutkiem zawirowań powietrza powstających między masztem turbiny a poruszającymi się płatami wirnika.



Rys. 5. Kierunkowość promieniowania hałasu przez turbinę V80 w Zagórze

Na podstawie uśrednionego energetycznie poziomu ciśnienia dźwięku w punkcie odniesienia – punkt 3 wyznaczono moc i sprawność akustyczną turbiny V80 zdefiniowaną jako stosunek mocy akustycznej A do chwilowej mocy turbiny – mocy turbiny w czasie pomiarów. Dane wyjściowe i wyniki obliczeń mocy akustycznej turbiny [4, 5] zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3.

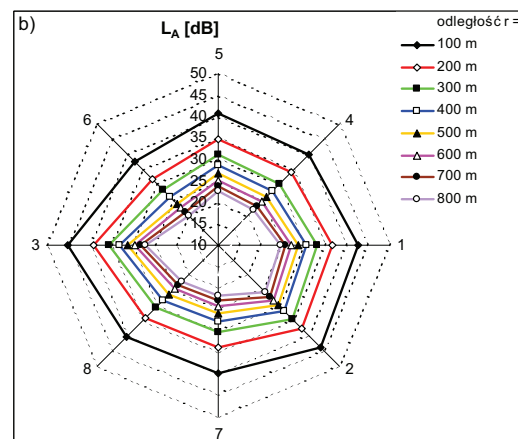
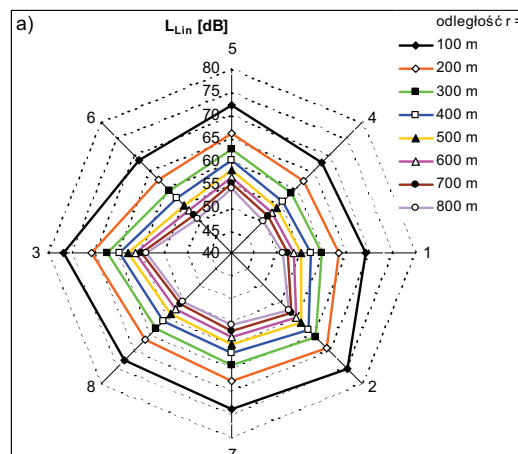
Moc i sprawność akustyczna turbiny V80 w Zagórze (punkt pomiarowy 3)

Poziom dźwięku	$L_{Lin}$ [dB]	76.5
Poziom mocy akustycznej	$L_{N, Lin}$ [dB]	127.5
Moc akustyczna	$N_{Lin}$ [W]	5.61
Poziom dźwięku A	$L_A$ [dB]	45.1
Poziom mocy A	$L_{N, A}$ [dB]	96.1
Moc akustyczna	$N_A$ [W]	0.0041
Moc turbiny Podczas pomiarów	$N_t$ [MW]	0.6
Sprawność akustyczna	$\eta_A = N_A/N_t$	$6.8 \cdot 10^{-9}$

Obliczona wartość poziomu mocy A turbiny jest zgodna z danymi podanymi w [9], z których wynika, że dla prędkości wiatru (5 – 8) m/s poziom mocy akustycznej A jest zawarty w przedziale od 97 dB do 106.5 dB.

Obliczona moc akustyczna turbiny stanowiła podstawę symulacji propagacji hałasu wokół jednej turbiny na odległość do 800 m tzn. do najbliższych zabudowań (dla poziomu liniowego jak i dla poziomu dźwięku A). W obliczeniach przyjęto, że poziom hałasu maleje z kwadratem odległości. Wyniki symulacji (przedstawione na rysunku 6) wskazują, że w danych warunkach pogodowych hałas pojedynczej turbiny w pobliżu zabudowań wynosiłby odpowiednio:

$$L_{Lin\ 800} \leq 55\text{ dB}, \quad L_{A\ 800} \leq 25\text{ dB}.$$



Rys. 6. Rozkład poziomu hałasu wokół turbiny V80 o mocy chwilowej około 0.6 MW

a) liniowych poziomów dźwięku,  
b) poziomów dźwięku A

Wartość poziomu mocy akustycznej wyznaczoną dla pojedynczej turbiny wykorzystano w obliczeniach symulacyjnych rozkładu poziomu dźwięku A (obliczenia wykonano w programie LEQ Professional 5x) w terenie otaczającym farmę wiatrową Zagórze podczas pracy wszystkich turbin. W obliczeniach przyjęto, że każda z turbin jest punktowym źródłem dźwięku o poziomie mocy akustycznej  $L_{N, A} = 96.1$  dB usytuowanym na wysokości  $H = 78$  m odpowiadającej wysokości wieży turbiny. W obliczeniach nie uwzględniono wpływu kierunku wiatru na rozkład poziomu dźwięku jak również poziomu tła akustycznego. Na mapie najbliższej okolicy farmy przedstawiono izoliny poziomu dźwięku A podczas pracy wszystkich turbin V80 (rys. 7).

Z analizy propagacji hałasu wokół elektrowni wiatrowej w Zagórze (patrz rys. 7), przeprowadzonej dla omówionych wcześniej warunków atmosferycznych wynika, że w tym przypadku hałas generowany przez turbiny nie jest uciążliwy dla środowiska (dla terenów zabudowy mieszkalnej – w odległości 800 m od turbiny).



Rys. 7. Izolinie poziomów hałasu wokół farmy wiatrowej Zagórze podczas pracy wszystkich turbin

## 6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania hałasu stanowią studium przypadku hałasu turbiny V80 dla określonych warunków atmosferycznych i wynikającej z nich mocy turbiny (mniejszej niż moc nominalna). Niemniej uzyskane wyniki badań hałasu dają pogląd na rozkład pola akustycznego wokół farmy Zagórze.

Na podstawie badań stwierdzono, że turbiny wiatrowe w Zagórze, w danych warunkach

pogodowych, nie stanowiły zagrożenia hałasowego dla środowiska, gdyż poziom dźwięku A nie przekraczał dopuszczalnej wartości dla pory nocnej czyli poziomu 40 dB.

## LITERATURA

- [1] [www.elektrownie-wiatrowe.org.pl](http://www.elektrownie-wiatrowe.org.pl)
- [2] [www.gigawat.net.pl](http://www.gigawat.net.pl)
- [3] *Hałas turbin a środowisko*; Bruel&Kjaer magazine Nr 2, 2003, str. 24-25
- [4] Cempel C., *Wibroakustyka stosowana*, PWN, Warszawa 1989, str. 72-76
- [5] Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, str. 84-86
- [6] Norma IEC61400 *Wind Turbine Generator Systems*
- [7] Norma PN – EN 61400 – 11: 2001, *Wind Turbine Generator Systems*, (in polish)
- [8] [http://elektrowniewiatrowe.org.pl/zagorze/-i\\_wietrzosc.htm](http://elektrowniewiatrowe.org.pl/zagorze/-i_wietrzosc.htm)
- [9] General Specification V80-2MW offshore OptiSpeed™ – Wind Turbine Item no.: 944407.R6



Prof. dr hab. Czesław CEMPEL jest kierownikiem Zakładu Wibroakustyki Bio-Dynamiki Systemów w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Poznańskiej. Specjalność: wibroakustyka maszyn, redukcja drgań i hałasu maszyn i środowiska, diagnostyka maszyn, inżynieria systemów. Członek komitetów redakcyjnych: Bull. PAN, Mechanical Systems and Signal Processing. Redaktor Diagnostyki, członek Komitetu Redakcyjnego Maintenance Management International (COMMADEM).



Dr Maria GOLEC jest adiunktem w Instytucie Mechaniki Stosowanej PP. Specjalizacja: akustyka środowiska, wibroakustyka maszyn. Ostatnio zajmowała się badaniami materiałów z zastosowaniem metod emisji akustycznej do badań procesów krzepnięcia stopów metali oraz analizą rozptyłu energii w bliskim polu wibroakustycznym struktur mechanicznych. Członek Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej oraz Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP.



Dr Zdzisław GOLEC jest adiunktem w Instytucie Mechaniki Stosowanej PP. Zajmuje się dynamiką maszyn, a w szczególności minimalizacją drgań mechanicznych. Specjalizuje się w zagadnieniach eliminacji drgań (badania w sferze analitycznej i symulacyjnej). Członek Polskiego Towarzystwa Mechaniki Teoretycznej i Stosowanej, Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej oraz Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej SIMP.