

DOI: 10.5604/20830157.1201320

## POMIARY HAŁASU GENEROWANEGO PRZEZ ELEKTROWNIE WIATROWE I OCENA ICH WPŁYWU NA ŚRODOWISKO

**Hanna Pamuła, Maciej Klaczyński**

Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki Katedra Mechaniki i Wibroakustyki

**Streszczenie.** W ostatnich latach obserwowany jest ciągły wzrost popularności odnawialnych źródeł energii, w tym turbin wiatrowych. Zwiększające się zainteresowanie tematem skłoniło autorów do zaprezentowania w niniejszym artykule różnych rodzajów oddziaływań turbin na człowieka i przyrodę, bazując na przeglądzie literaturowym, obserwacjach terenowych i pomiarach. Przeprowadzone pomiary hałasu generowanego przez pracujące turbiny wiatrowe REPowerMM92 na farmie w Łękach Dukielskich (woj. Podkarpackie) wykazały, że poziomy dźwięku ustalone w rozporządzeniach nie zostały przekroczone w pobliżu zabudowań oddalonych o 400 m od najbliższej turbiny. Ponadto, pomiary nie wykazały, by infradźwięki generowane przez przedmiotową farmę mogły osiągnąć poziomy, które według dzisiejszej wiedzy są uważane za szkodliwe dla człowieka.

**Słowa kluczowe:** energia wiatrowa, farmy wiatrowe, zrównoważony rozwój, monitoring środowiskowy, hałas

### NOISE MEASUREMENTS AND ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF WIND TURBINES

**Abstract.** In the last decades increasing popularity of renewable energy sources, including wind energy, has been observed. Growing interest in that topic convinced authors to present different types of impact of wind turbines on humans and nature, on the basis of literature, field observations and measurements. The results of sound level measurements showed that levels of acceptable environmental noise were not exceeded in the proximity to the residential area (400 m from the closest turbine). In addition, our study showed that the infrasonic levels were below perception and acceptable levels, so according to current knowledge they should not be harmful for humans.

**Keywords:** wind energy, wind farms, sustainable development, environmental monitoring, noise

#### Wstęp

Wraz ze zwiększaniem się świadomości ekologicznej, coraz częściej kierowaniem się zasadami zrównoważonego rozwoju i wprowadzanymi regulacjami emisji CO<sub>2</sub>, wzrasta popularność odnawialnych źródeł energii. Uzupełnianie tradycyjnych źródeł energii „zieloną energią” jest wskazane ze względu na wyczerpujące się zasoby paliw, ochronę środowiska a przede wszystkim przez konieczność wdrażania polityki energetyczno-klimatycznej Unii Europejskiej (UE). Jednym z popularniejszych odnawialnych źródeł energii są turbiny wiatrowe.

Polityka klimatyczna i postanowienia UE stawiają Polsce niezwykle ambitne cele dotyczące zredukowania emisji CO<sub>2</sub> w atmosferze. Przyjęty pakiet klimatyczny niejako narzuca tworzenie elektrowni odnawialnych źródeł energii m.in. wielu farm wiatrowych. Mimo że jednorazowe nakłady inwestycyjne w odniesieniu do innych technologii produkcji energii elektrycznej są najniższe dla lądowej energetyki wiatrowej [22], to trudno nie zauważyć ich wielu wad. Istotnym problemem jest cena energii elektrycznej wytworzonej przez elektrownie wiatrowe, która jest jedną z najwyższych [14], a także wpływ turbin wiatrowych na środowisko i człowieka.

#### 1. Wpływ turbin wiatrowych na środowisko

W niniejszej pracy przeanalizowano dwa aspekty – wpływ farm wiatrowych na przyrodę i środowisko naturalne oraz wpływ na człowieka. Opisano dwa najważniejsze sposoby oddziaływania farm na środowisko naturalne – wpływ na ptaki i nietoperze. Pominęto wspomniane w niektórych opracowaniach zmiany mikroklimatu, wpływ na krajobraz, wpływ na zwierzęta wodne w przypadku farm usytuowanych na zbiornikach wodnych czy niszczenie naturalnych siedlisk związane z budową i eksploatacją siłowni wiatrowych.

##### 1.1. Wpływ na ptaki

Jednym z często poruszanych tematów jest wpływ farm wiatrowych na ptaki. Autorzy publikacji są zgodni co do negatywnego wpływu turbin, jednak występują znaczne różnice jeśli chodzi o rodzaje oddziaływań i skalę tych zjawisk. Jest to bardzo trudne do oszacowania, gdyż ocena zazwyczaj zależy od kombinacji wielu zmiennych o nie zawsze znanym stopniu

istotności. Krytyczne jest umiejscowienie farmy wiatrowej, ale także inne czynniki takie jak: skład gatunkowy i zagęszczenie ptaków, atrakcyjność żerowiskowa terenu, przestrzenne rozmieszczenie turbin czy lokalna specyfika warunków pogodowych [16]. Farmy wiatrowe oddziałują na populacje ptaków na wiele różnych sposobów, powodując obniżenie sukcesu lęgowego lub przeżywalności ptaków i prowadząc do spadku liczebności lokalnych populacji. Podstawowe rodzaje negatywnych oddziaływań obejmują [4]:

- 1) Śmiertelność bezpośrednią, która ma różne przyczyny w zależności od pory doby. Kolizje nocne spowodowane są niezauważeniem przeszkody a także przyciąganiem i dezorientowaniem ptaków przez oświetlenie turbin. Natomiast większość kolizji dziennych jest najprawdopodobniej spowodowana niezauważaniem łopaty turbiny przez zjawisko zamazywania ruchu (ang. *motion smear*). Polega ono na zatrąceniu przez siatkówkę oka zdolności do rejestrowania szybko poruszających się obiektów (jak np. zamazujące się szprychy jadących rowerów). Dodając do tego ograniczoną manewrowość niektórych dużych ptaków drapieżnych czy ograniczone pole widzenia, może to skutkować dużą dzienną śmiertelnością ptaków [4, 24].
- 2) Odstraszenie, czyli efektywną utratę lęgowisk lub żerowisk wywołaną wypieraniem ptaków. Skutkuje to znaczącym zmniejszeniem zagęszczenia ptaków w okolicy turbin, nawet 500–800 metrów od niej. Oddziaływanie to zależne jest od pory roku i gatunków ptaków [4].
- 3) Efekt bariery, czyli zmiany tras przelotów wymuszone unikaniem siłowni, zarówno w czasie migracji jak i w okresie lęgowym.
- 4) Utratę siedlisk i narażenie na bezpośrednią utratę lęgowisk lub żerowisk wskutek przekształceń terenu wywoływanych budową farmy [4, 24].

Każda farma wiatrowa wywiera inny wpływ na ptaki, dlatego przed niemal każdą inwestycją przygotowywany jest raport z oceny oddziaływania na środowisko. Poprawnie przeprowadzony monitoring znacznie zwiększa szansę na wybór lokalizacji, która w niewielkim stopniu oddziałuje na ptaki. Badana farma w Łękach jest usytuowana w pobliżu przełęczy Dukielskiej, na jednym z ważniejszych wschodnich szlaków ptasiej migracji, co może powodować zwiększoną kolizyjność ptaków z wiatrakami.

## 1.2. Wpływ na nietoperze

Elektrownie wiatrowe stanowią istotne zagrożenie również dla nietoperzy. Ich śmiertelność przewyższa śmiertelność ptaków nawet dwu – trzykrotnie. Turbiny wiatrowe wywierają negatywny wpływ na te ssaki zarówno pośrednio – redukując i fragmentując powierzchnię żerowisk, tras przelotu czy miejsc rozrodu, jak i bezpośrednio przyczyniając się do ich śmierci. Za najważniejszy typ oddziaływania między farmami wiatrowymi a nietoperzami uważa się właśnie śmiertelność bezpośrednią [8, 11].

Śmiertelność nietoperzy jest pochodną dwóch zjawisk. Jednym z nich jest bezpośrednie zderzenie z turbiną wiatrową, drugim – uraz ciśnieniowy (barotrauma), będący główną przyczyną śmiertelności. Barotrauma jest spowodowana szybką redukcją ciśnienia za poruszającą się łopata turbin. Pociąga to za sobą niszczenie tkanki zawierającej powietrze poprzez szybką lub nadmierną zmianę ciśnienia. Dochodzi wówczas do niszczenia płuc za sprawą ekspansji powietrza, która prowadzi do pęknięcia pęcherzyków płucnych [3, 8]. Dużym problemem jest fakt, iż turbiny wiatrowe przyciągają nietoperze. Jest to spowodowane gromadzeniem się w ich pobliżu owadów – pożywienia większości gatunków nietoperzy. Owady wabione są światłem, ciepłem emitowanym przez gondolę turbiny czy jasnym kolorem, jakim najczęściej są pomalowane wiatraki. Ponadto wiele gatunków owadów gromadzi się wokół najwyższych punktów w krajobrazie (ang. *hill-topping effect*) a warstwy atmosfery powyżej 100 m nad poziomem gruntu są wykorzystywane przez niektóre owady do długodystansowych migracji [8, 11].

Są obszary, w których nietoperze giną masowo a także okresy, w których są one szczególnie narażone na negatywny wpływ turbin (koniec lipca – koniec września). Newralgicznymi miejscami są zalesione grzbiety gór, lasy nizinne, skraje lasów czy śródleśne polany. Stwierdzono istotną, dodatnią korelację między procentem pokrycia powierzchni drzewami a śmiertelnością nietoperzy. Dlatego wytyczne zalecają sytuowanie farm w odległości co najmniej 200 m od skraju lasu i większych zadrzewień [8], a w przypadku trzech z pięciu badanych turbin w Łękach jest to tylko około 50 m. Negatywny wpływ mają także elektrownie zlokalizowane na wybrzeżach, przełęczach górskich czy w dolinach rzek, gdyż pokrywają się z trasami migracji niektórych gatunków nietoperzy. Ponadto śmiertelność nietoperzy jest pozytywnie skorelowana z wielkością wiatraków: wysokością, rozmiarami rotora i mocą turbin. Według badań największej nietoperzy ginie przy turbinach 140–160 metrowych (turbiny w Łękach: 146 m), a pod wiatrakami o wysokości 50 m nie znajdowano praktycznie żadnych ofiar [8].

## 2. Wpływ turbin wiatrowych na człowieka

Turbiny wiatrowe wywierają także wpływ na ludzi. W poniższym rozdziale omówiono wybrane efekty: migotanie cienia, osadzanie się lodu, awarie turbin wiatrowych i zagrożenia akustyczne. Z uwagi na ograniczoną pojemność pracy pominięto niektóre aspekty związane z oddziaływaniem farm na człowieka: problemy związane z budową farmy wiatrowej (drogi dojazdowe, infrastruktura), trudnością utylizacji starych turbin wiatrowych, nieopłacalności farm, problemu pogorszenia jakości życia mieszkańców, spadku cen nieruchomości czy problemy z interferencją elektromagnetyczną.

### 2.1. Efekt migotania cienia

W niektórych warunkach pogodowych praca turbin powoduje niekorzystne zjawiska optyczne. Jedną z często wymienianych uciążliwości jest migotanie cienia rzuconego na powierzchnię terenu przez obracające się łopaty rotora, zwane efektem migotania cienia (ang. *shadow flicker*) [2, 10]. Zakłada się, że zjawisko to mogące powodować zdenerwowanie, irytację czy zmęczenie, występuje w odległości równej dziesięciokrotności średnicy rotora, a powyżej tej odległości nie jest już znaczące dla

ludzi [20]. Dotychczas nie potwierdzono medycznie i naukowo niekorzystnego wpływu migotania cienia, jednak potencjalne zagrożenie dostrzega się w przypadku osób chorych na epilepsję o podłożu światłoczułym. Duże turbiny wiatrowe nie są w stanie obracać się tak szybko, by stworzyć zagrożenie wystąpienia napadu epileptycznego [16]. Inaczej ma się sprawa z małymi i przydomowymi turbinami, które mogą się obracać 30–300 razy na minutę i mieć więcej łopat, co znacznie zwiększa częstotliwość błysków generowanych przez wiatraki. Problemem może być też skumulowane działanie turbin stojących w jednym ciągu – efekty migotania mogą się nakładać powodując zwiększenie częstotliwości błysków. W wielu krajach przyjmuje się, że efekt migotania cienia w pobliskich budynkach nie powinien występować przez więcej niż 30 godzin w ciągu roku, a maksymalnie 30 minut w ciągu dnia (np. Irlandia, Niemcy, Belgia). Przed postawieniem turbiny powinno się zasymulować ten efekt i dzięki temu odpowiednio wybrać miejsce postawienia farmy tak, by nie przeszkadzała ona okolicznym mieszkańcom [2, 16, 20].

### 2.2. Osadzający się lód i awarie

W strefie klimatycznej, w której leży Polska problem oblodzenia turbin pojawia się w kilku zimowych miesiącach, a w górach także w innych porach roku. Lód może powstawać na śmigłach turbiny kiedy pojawią się odpowiednie warunki atmosferyczne: optymalna temperatura i wilgotność. Jeśli turbina wiatrowa jest wyłączona, to problem nie różni się od tego występującego przy oblodzeniu innych wysokich obiektów – szacuje się, że odłamki lodu mogą wtedy spaść do 50 m od podstawy turbiny [12]. Znacznie bardziej problematyczne jest osadzanie się lodu podczas pracy turbiny lub gdy ponownie zostaje włączona po dłuższym okresie przestoju i ma oblodzone łopaty. Fragmenty lodu które zgromadzą się na łopatach mogą być oderwane i odrzucone na duże odległości, co może skutkować obrażeniami znajdujących się w pobliżu osób czy uszkodzeniem mienia. Według wielu źródeł [12, 19], odległość bezpieczna (taka, która będzie poza zasięgiem odrzutu odłamków lodu z łopat turbiny) nie przekracza sumy wysokości masztu i średnicy rotora przemnożonej przez współczynnik wynoszący 1,5–2. Jednak według symulacji komputerowych przeprowadzonych przez Pojmańskiego [17], biorąc pod uwagę wiele współczynników np. prędkości początkowe elementu, punkt oderwania elementu od łopaty, prędkość wiatru, kształt elementu, siłę nośną i grawitacji czy współczynniki oporu dla poszczególnych brył, odległości te są dużo większe. Oznacza to więc, że istnieje realne zagrożenie spowodowane największymi odłamkami – mogą one spaść nawet w odległościach 500–700 m. To samo się tyczy uszkodzonych części, które czasem z różnych powodów ulegają oderwaniu. Trzy podstawowe rodzaje awarii związanych z turbinami wiatrowymi to: urwanie się łopaty, obudowy wirnika czy innego elementu ze względu na zużycie materiału, awarie systemu hamowania lub sterowania oraz możliwość pożaru. Bardzo istotną sprawą wydaje się wyznaczenie odległości bezpiecznej od farmy, która powinna wynosić około kilometra, a realnie rzecz biorąc (duże rozproszenie zabudowy w Polsce) minimum 500 metrów od najbliższych zabudowań (największa udokumentowana odległość na jaką został odrzucony fragment łopaty wiatraka [12]).

### 2.3. Hałas

Często poruszonym problemem jest wpływ hałasu słyszalnego i infradźwięków na zdrowie człowieka.

Rozchodzenie się hałasu zależy od samych turbin wiatrowych: zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego, wielkości turbin i ich liczby. Również lokalizacja farmy i uwarunkowania atmosferyczne – czyli kierunek wiatru, jego prędkość i charakter, gradient wiatru, gradient temperatur, ukształtowanie terenu, możliwość odbić i przeszkód na drodze rozchodzenia

oraz posycie terenu – mają wpływ na propagację hałasu [16]. Hałas pochodzący od turbiny można podzielić na dwa główne rodzaje – hałas aerodynamiczny i hałas mechaniczny. Hałas mechaniczny jest emitowany przez przekładnie, skrzynie biegów, napędy zmiany kąta, wentylatory chłodzące, systemy sterowania czy generator. Hałas aerodynamiczny, który jest o wiele bardziej uciążliwy dla człowieka, można podzielić na cztery podstawowe rodzaje: hałas tonalny, szerokopasmowy, niskoczęstotliwościowy oraz impulsowy. Hałas tonalny spowodowany jest m.in. przepływem powietrza przez otwory i szpary masztu, pracą przekładni i generatora, szerokopasmowy powstaje przez interakcje łopat turbiny z zawirowaniami atmosferycznymi, niskoczęstotliwościowy jest powodowany przejściem łopaty obok wieży w zaburzoną przepływem powietrza, a impulsowy jest związany z interakcją łopaty z przecinaniem strugi powietrza wokół wieży [6]. Najbardziej uciążliwym efektem są modulacje – fluktuacje dźwięku. Mogą powstawać przez hałas krawędzi spływu i zmiany atmosferyczne oraz zawirowania związane z przejściem łopaty w pobliżu wieży. Fluktuacje mogą być także pochodną defektów występujących na łopacie. W efekcie powstaje świszczący dźwięk o modulacji typu cicho-głośno-cicho, szczególnie uporczywy i dokuczliwy dla ludzi. Zmiany modulacji zależą od częstotliwości przechodzenia łopat koło wieży i wynoszą najczęściej 1 Hz (przy ok. 20 obrotów na minutę). Modulacje w hałasie turbin stają się uciążliwe, gdy poziom dźwięku zmienia się w krótkim czasie o 4–5 dB. Również istotne są zmiany dla konkretnych częstotliwości w paśmie słyszalnym, które decydują o charakterze i wysokości postrzeganego dźwięku. Dokuczliwe modulacje najczęściej powstają przy silniejszym wietrze i są bardziej zauważalne i uciążliwe w nocy [13, 21].

Szkodliwość hałasu zależy przede wszystkim od wartości poziomu ciśnienia akustycznego i jest modyfikowana przez jego następujące czynniki: charakter częstotliwościowy (widmo o składowych szerokopasmowych, niskoczęstotliwościowych w paśmie 20–200 Hz i infradźwiękowych w paśmie 1–20 Hz, gdzie bardziej szkodliwy dla człowieka jest hałas o wyższych częstotliwościach, lecz bardziej uciążliwy ten o częstotliwościach niższych), zmienność w czasie (reakcja receptorów na zmiany parametrów bodźca), charakter (większa uciążliwość hałasu modulowanego, impulsowego i ze składowymi tonalnymi) i czas trwania ekspozycji [16]. W przypadku turbin wiatrowych nie ma zagrożenia uszkodzenia słuchu, gdyż tylko poziom równoważny dźwięku A ( $L_{Aeq}$ ) powyżej 80 dB jest w stanie spowodować ubytki słuchu. Według norm obowiązujących na stanowiskach pracy, przy małych wartościach poziomu równoważnego dźwięku A (powyżej 55 dB) obserwuje się takie skutki hałasu jak: skargi na uciążliwość hałasu podczas procesów myślowych, trudności w koncentracji i skupieniu uwagi, wzmożoną pobudliwość nerwową, uczucie rozdrażnienia, a także trudności natury intelektualnej wyrażające się osłabieniem pamięci. Można więc sądzić, że życie w bliskim sąsiedztwie turbin może mieć znaczący negatywny wpływ na człowieka [1].

Drugim często poruszanym zagadnieniem jest wpływ infradźwięków na człowieka. W literaturze można znaleźć doniesienia o czasowych i stałych ubytkach słuchu [15], o wpływie na reakcję mechanoreceptorów [15] czy zaburzeniach równowagi, jednak pojawiają się one przy narażeniu na hałas o wysokich poziomach, 100 dB i wyższych. Skoro infradźwięki wytwarzane przez farmy wiatrowe nie przekraczają progu percepcji (a wynoszą ok. 50–70 dB [5], a nawet 90–100 dB dla częstotliwości 1–2 Hz [18]), to uważa się, że nie oddziałują negatywnie na zdrowie człowieka [5]. Zostało to dobitnie stwierdzone w wielu pracach, które negują występowanie jakichkolwiek niepożądanych efektów związanych z infradźwiękami [5, 7]. Stoi to jednak w sprzeczności do publikacji innych badaczy [18], którzy wskazują na możliwy wpływ na zewnętrzne komórki rzęsate. Są one bardziej wrażliwe na infradźwięki niż wewnętrzne komórki rzęsate pośredniczące w słyszeniu, przez co mogą być stymulowane przez infradźwięki na poziomach poniżej tych słyszalnych. Pojawia się zagrożenie, że jeśli infradźwięki o poziomach które nie mogą być słyszalne

wpływają na komórki i struktury, to mogą wpływać niekorzystnie na fizjologię ucha. Nasuwa się więc wniosek, iż wciąż powinny być przeprowadzane skrupulatne, metodyczne badania, dopóki nie pozna się dokładnie wszystkich mechanizmów i efektów spowodowanych infradźwiękami wytwarzanymi przez turbiny wiatrowe i nie przekonamy się o ich nieszkodliwości.

## 2.4. Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku

Dokumentem określającym dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku jest rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. wraz późniejszymi poprawkami [26]. Zgodnie z nimi ocena klimatu akustycznego jest regulowana tylko i wyłącznie dla zakresu częstotliwości dźwięków słyszalnych przez człowieka określonego charakterystyką częstotliwościową A. Elektrownie wiatrowe klasyfikowane są do kategorii „Pozostałe obiekty i działalność będąca hałasem”. Wartości dopuszczalne poziomu hałasu zależne są od typu zagospodarowania przestrzennego terenu i wynoszą odpowiednio 50 dB w porze dziennej i 40 dB w porze nocnej m.in. dla zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej, a 55 dB w porze dziennej i 45 dB w porze nocnej m.in. dla zabudowy zagrodowej. Są to typowe rodzaje terenów znajdujących się w bliskim sąsiedztwie farm wiatrowych.

Natomiast dopuszczalne poziomu hałasu w środowisku pracy [25] określone są poziomem ekspozycji na hałas odniesionym do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy w wartości 85 dB ( $L_{Aeq,8h}$ ) oraz maksymalny poziom dźwięku A nie może przekraczać wartości 115 dB i szczytowy poziom dźwięku C nie może przekraczać wartości 135 dB.

Dopuszczalne poziomy hałasu w zakresie infradźwięków są regulowane w Polsce tylko i wyłącznie w zakresie środowiska pracy [29]. 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 w przypadku wykonywania prac koncepcyjnych na stanowisku pracy, oraz osób młodocianych i kobiet w ciąży równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G nie może przekraczać wartości 86 dB. Brak jest dokumentów regulujących ocenę tego typu hałasu w środowisku naturalnym.

## 3. Materiały i metody

Pomiary zostały przeprowadzone na farmie wiatrowej w Łękach Dukielskich (woj. podkarpackie). Park wiatrowy Łęki Dukielskie składa się z 5 elektrowni wiatrowych o mocy elektrycznej 2 MW każda. Zainstalowane turbiny REPowerMM92 o średnicy wirnika 92 m i wysokości masztu 100 m zostały oddane do użytku w czerwcu 2009 roku. Roczna produkcja energii elektrycznej przez park wiatrowy szacowana jest na 20–24 GWh [10, 30]. Farma wiatrowa znajduje się na pagórkowatym terenie o przeznaczeniu rolniczym i góruje nad wsią. W pobliżu trzech północnych, niżej usytuowanych turbin (ok. 380 m n.p.m.) znajduje się las i niska roślinność. Pozostałe dwie turbiny położone są w otwartym terenie na wysokości ok. 410 m n.p.m.

Badania w Łękach Dukielskich przeprowadzono dwukrotnie: w miesiącach październik (1024 hPa, 10°C, brak opadów, wilgotność 50%, wiatr 4,5 m/s w porywach do 6 m/s) i grudzień 2013 r. (1020 hPa, 2°C, brak opadów, wilgotność 80%, wiatr 5,5 m/s w porywach do 9 m/s). Pierwszy pomiar wykonano przy użyciu miernika Sonopan DSA-50, drugie badania przeprowadzono przy użyciu miernika SVAN958, wykonując pomiary w osmiu miejscach (rys. 1). Wykonano pomiary poziomu dźwięku na różnych wysokościach nad poziomem terenu tj.: na 4 m (mikrofon miernika umieszczony na statywie), na 1,5 m oraz na poziomie gruntu (mikrofon miernika umieszczony na płaskiej okrągłej płycie o średnicy ok. 1 m). Wykonywano pomiary krótkookresowe, czas pomiaru wynosił od 1 do 5 minut, w zależności od stanu pracy turbin i rodzaju generowanego hałasu.

Dla hałasu nieustalonego starano się wykonywać dłuższe pomiary niż dla hałasu ustalonego. Nie używano dodatkowej osłony przeciwwietrznej [9, 23] ani nie wykonywano pomiarów na płycie, gdyż prędkość wiatru była mniejsza niż 10 m/s na wysokości 10 m. Wykonano pomiary poziomu dźwięku i analizę widma poziomu dźwięku w pasmach 1/3 oktaowych dla częstotliwości od 1 Hz do 20 kHz. Do opracowania wyników użyto programów SvanPC++ oraz Microsoft Office Excel 2007.



Rys. 1. Punkty, w których przeprowadzono pomiary

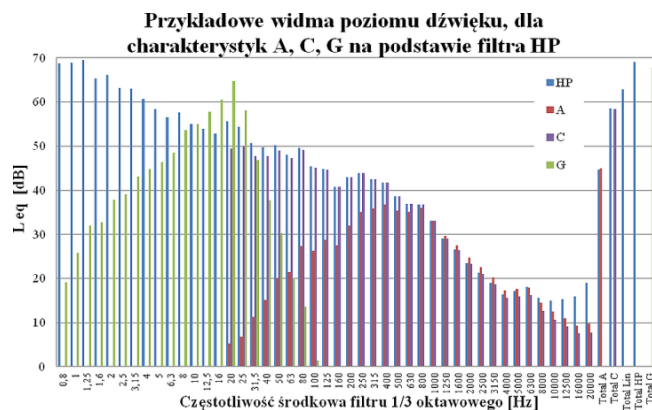
## 4. Wyniki i dyskusja

W niniejszym podrozdziale przedstawiono wyniki i analizę przeprowadzonych badań. Następnie wyciągnięto na tej podstawie wnioski dotyczące wpływu hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe na człowieka.

### 4.1. Wpływ doboru charakterystyki na wyniki pomiaru hałasu

Przeprowadzono analizę widma poziomu dźwięku w pasmach 1/3 oktaowych z filtrem HP wykonaną miernikiem SVAN958.

Na podstawie wykresu można wywnioskować, że odpowiedni dobór charakterystyki jest kluczowy przy pomiarach hałasu generowanego przez farmy wiatrowe. Łatwo jest manipulować wynikami poprzez wybór niewłaściwej charakterystyki – można spotkać badania hałasu turbin wiatrowych opartych tylko o charakterystykę korekcyjną A. Poziomy infradźwięków powinny być przedstawiane bez korekcji albo z filtrem G. Poziom równoważny infradźwięków produkowanych przez farmy znacznie się różni od poziomu równoważnego hałasu ważonego charakterystyką A. Fakt ten przykładowo ilustruje rysunek 2.

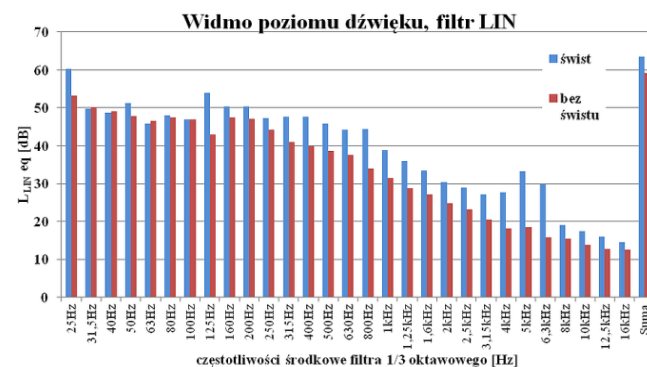


Rys. 2. Przykładowe widma poziomu dźwięku generowanego przez turbinę w punkcie P5 1,5 m n.p.t. dla charakterystyk korekcyjnych, A, C, G na podstawie norm ISO [27, 28], HP – nieskorygowany

## 4.2. Modulacje poziomu dźwięku

Najbardziej irytującą częścią hałasu turbin wiatrowych są modulacje amplitudy poziomu dźwięku. Podczas dwukrotnych badań to uciążliwe zjawiska również występowało. Zaistniałe warunki atmosferyczne, profil wiatru a także prawdopodobne defekty na łopacie sprawiły powstanie wysokoczęstotliwościowego, głośnego świstu. Nie występował on stale, tylko przy silniejszych podmuchach wiatru, a fluktuacje poziomu dźwięku o częstotliwościach 5 kHz i 6,3 kHz wynosiły nawet kilkanaście dB. Podczas pierwszych pomiarów zarejestrowano miernikiem Sonopan DSA-50 nieskorygowany równoważny poziom dźwięku (rys. 3). Dla porównania przedstawiono ten sam poziom zmierzony chwilę wcześniej w tym samym miejscu, podczas którego świsty nie były słyszalne.

Na rysunku 3 widoczne są składowe tonalne (5 i 6,3 kHz) związane z omawianym zjawiskiem.



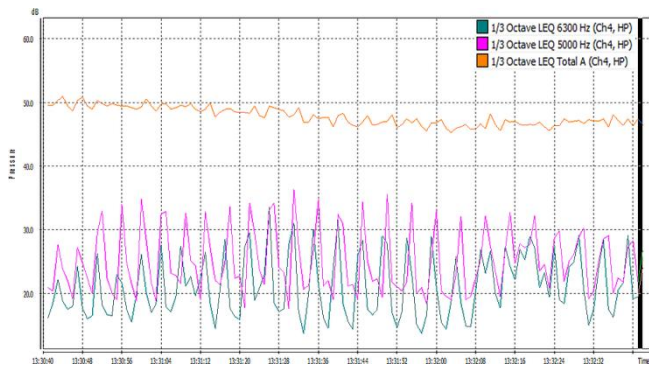
Rys. 3. Porównanie poziomów równoważnych dźwięku dla pomiaru, w którym występowały słyszalne świsty i pomiaru bez świstów, 100 m od turbiny, 1,5 m n.p.t., czas pomiaru 1 min

Modulacje amplitudy poziomu dźwięku najlepiej obserwować w funkcji czasu przy jak najczęstszym zapisie informacji o chwilowym poziomie dźwięku do bufora. Pomiar taki umożliwiają m.in. mierniki poziomu dźwięku firmy SVANTEK. Na rysunku 4 przedstawiono zmiany poziomu ciśnienia akustycznego dla częstotliwości 5 i 6,3 kHz i zmiany poziomu dźwięku ważonego charakterystyką A zarejestrowane miernikiem SVAN 958. Pomiar wykonano dla tej samej turbiny co poprzednio, 100 m od niej (punkt pomiarowy P6). Wymienione częstotliwości zostały wybrane po uprzednim przeanalizowaniu przebiegów dla wszystkich 45 częstotliwości środkowych filtra 1/3 oktaowego, jako te o największych zmianach amplitudy powiązanych z obrotami łopat turbiny.

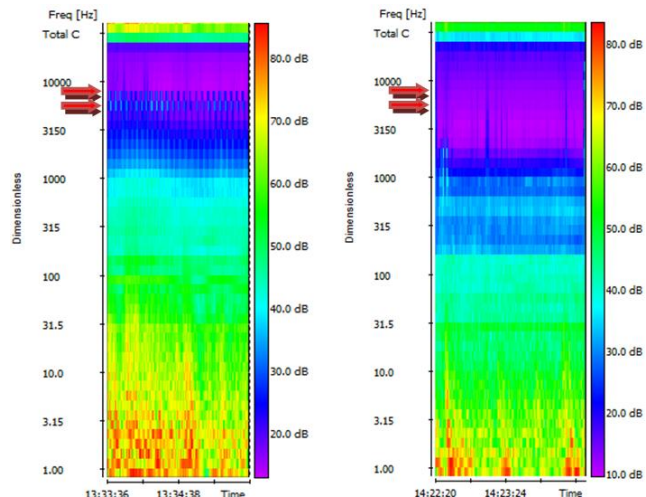
Rysunek 4 pokazuje, że mimo tak znaczących zmian poziomów ciśnienia akustycznego jakie występowały dla częstotliwości 5 i 6,3 kHz, w poziomie dźwięku A modulacje są praktycznie niezauważalne. Spowodowane jest to głównie energetycznym zsumowaniem wszystkich składowych częstotliwości. Dlatego tak istotne jest, by w pomiarach hałasu i wykrywaniu modulacji pochodzących od turbin wiatrowych rejestrować widmo poziomu ciśnienia akustycznego, najlepiej w pasmach 1/3 oktaowych [23].

Innym użytecznym narzędziem do obserwacji występujących modulacji mogą być spektrogramy przedstawiające widmo poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji czasu. Na rysunku 5 porównano dwa pomiary: pomiar podczas którego wyraźnie było słychać fluktuacje dźwięku (punkt pomiarowy P6) oraz pomiar w odległości 650 m od najbliższej turbiny w którym farma nie była praktycznie słyszalna (punkt pomiarowy P8).





Rys. 4. Zmiany poziomu dźwięku A i składowych tonalnych o częstotliwości 5 i 6,3 kHz podczas występowania modulacji, punkt P6 1,5 m n.p.t.



Rys. 5. Spektrogramy dla pomiaru przy turbinie w punkcie P6 (lewy) i dla pomiaru w odległości 650 m od turbiny w punkcie P8 (prawy), 1,5 m n.p.t.

Na spektrogramie przedstawiającym pomiar przy turbinie można zaobserwować wyraźne modulacje. Na zaznaczonych strzałkami liniach widać regularne zmiany poziomu dźwięku i są to właśnie składowe tonalne 5 kHz i 6,3 kHz. Dla porównania zaznaczono też obie te częstotliwości na pomiarze tła, jednak nie da się na nich zaobserwować zmian koloru charakterystycznych dla występującej modulacji poziomu ciśnienia akustycznego.

Modulacje mogą być zjawiskiem bardzo uprzykrzającym życie. Poprzez swój zmienny charakter powodują, że człowiek mimowolnie skupia na nich uwagę i przez to staje się rozkojarzony i zdenerwowany. Ciągłe narażenie na takie zmiany dźwięku może powodować zmęczenie, irytację czy obniżoną sprawność w wykonywaniu czynności wymagających skupienia.

### 4.3. Wpływ odległości od turbiny na wyniki pomiaru hałasu

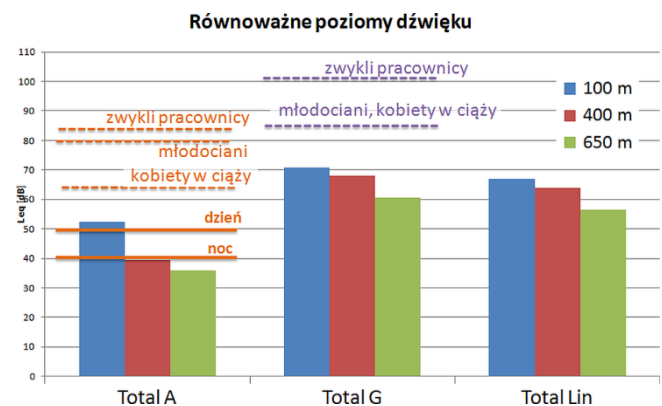
Na rysunku 6 przedstawiono porównanie poziomów równoważnych korygowanych trzema charakterystykami (A, G i LIN) zarejestrowanych w różnych odległościach od turbiny. Z przeprowadzonych pomiarów wybrano trzy: w odległości 100 metrów (P7), 400 metrów (P1) i w odległości 650 metrów od najbliższej turbiny (P8). Wszystkie zostały wykonane w podobnych warunkach atmosferycznych (częstotliwość obrotu turbin ok. 12 razy na minutę). Zgodnie z oczekiwaniami z przedstawionego wykresu wynika, że wraz z odległością hałas od turbin znacznie maleje. W bliskiej odległości średnie częstotliwości mają bardzo istotny wpływ na generowany hałas – równoważny poziom dźwięku A w odległości 100 m od turbiny był aż o 13 dB większy niż poziom zmierzony w odległości 400 m i 16 dB większy niż poziom 650 m od turbiny. Poziom infradźwięków między skrajnymi punktami różnił się o mniej niż 10 dB.

Istotny jest fakt, że punkty pomiarowe P1 i P8 znajdowały się przy zabudowaniach usytuowanych najbliżej farmy – punkt P1 od zachodu (400 metrów od najbliższej turbiny) a punkt P8 od wschodu (650 metrów od najbliższej turbiny). Dzięki tym pomiarom można wnioskować o występujących poziomach hałasu generowanych przez farmę i co za tym idzie – o akustycznym wpływie farmy w Łękach na mieszkańców. Według rozporządzenia dotyczącego , dopuszczalny równoważny poziom dźwięku A w środowisku [26], hałasu nie powinien przekraczać wartości 50 dB w dzień i 40 dB w nocy dla typu obszaru zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej. Pomiar przy zabudowaniach wykazały, że równoważny poziom dźwięku A wyniósł 39,5 dB w przypadku budynków położonych bliżej farmy (400 m, P1) oraz 35,9 dB w przypadku bardziej oddalonych domostw na wschód od terenu farmy (650 m, P8). Do pewnych przekroczeń ustalonego progu mogłoby dojść jedynie w porze nocnej, przy ustabilizowanej atmosferze i odpowiednim profilu wiatru. Jednak w większości przypadków hałas nie powinien wpływać negatywnie na samopoczucie mieszkańców.

Wartości poziomu hałasu nie zostały również przekroczone odnosząc się do rozporządzenia [29] określającego dopuszczalne poziomy hałasu w środowisku pracy. Szczytowe poziomy dźwięku nieskorygowane podczas pomiarów nie przekroczyły wartości 86 dB dla wszystkich lokalizacji punktów pomiarowych i różnych wysokości mikrofonu z miernikiem.

Następnym krokiem było sprawdzenie, czy w pobliżu turbin zostały przekroczone dopuszczalne poziomy hałasu infradźwiękowego. W Polsce nie obowiązują akty prawne, które określałyby ocenę narażenia na hałas infradźwiękowy w środowisku [9]. W związku z czym, uzyskane w niniejszych pomiarach wyniki porównano z dopuszczalnymi poziomami dotyczącymi środowiska pracy [25]. Przykładowo, dla pomiaru 2-minutowego w punkcie P6 wyniósł on 77,6 dB na 4 m i 69,7 dB na poziomie gruntu. W pozostałych punktach pomiarowych poziom dźwięku G były poniżej wartości dopuszczalnych w [29]

Co istotne, pomiary prowadzone były podczas wiatru powodującego obrót turbin 10–15 razy na minutę. Takie warunki wiatrowe nie powodowały generowania przez turbiny infradźwięków, które mogłyby być słyszalne dla człowieka. Jedynym występującym zagrożeniem jest nie do końca poznany wpływ infradźwięków poniżej progu słyszenia – według badań mogą one wpływać na fale mózgowie czy pobudzać zewnętrzne komórki rzęsaty w uchu [18]. Wydaje się jednak, że wymagane dość wysokie poziomy nie mogą zostać osiągnięte w odległościach 400 czy 650 m od turbiny, gdzie znajdowały się siedziby ludzkie, gdyż przekroczenia tych progów nie zaobserwowano nawet w odległości 100 m od niej.



Rys. 6. Poziomy równoważne korygowane charakterystyką A, G i LIN dla punktów pomiarowych w odległości 100 (P7), 400 (P1) i 650 m (P8) od najbliższej turbiny, 1,5 m n.p.t., przerywana linia – środowisko pracy, ciągła – środowisko [23, 24, 26]

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzone badania połączone z analizą literaturową pozwoliły stwierdzić, że każdorazowo decyzja o instalacji turbin wiatrowych powinna być poparta szeroką analizą ich wpływu na otaczające je środowisko. Analizując bezpieczeństwo i jakość życia człowieka, dobrą praktyką powinno być stawianie turbin w odległości ok. 1 km od zabudowy. Jest to konieczne, aby chronić ludzi przed zagrożeniami w bliskiej odległości od elektrowni tj.: odpadającymi kawałkami lodu czy odrzucanymi fragmentami turbiny w razie awarii oraz uciążliwościami związanymi z hałasem. Pomiar akustyczne przeprowadzone w niniejszej pracy wskazują, że dla badanego zespołu turbin w dwóch różnych porach roku, bezpieczną odległością z punktu widzenia zagrożenia hałasem jest już 400 m. Obecnie w Polsce nie istnieją akty prawne, które określałyby minimalny dystans turbiny w jednostkach długości od budynków, a jedynie dopuszczalny poziom hałasu pochodzący od urządzenia w miejscu zamieszkania. Zdarzają się przypadki lokalizacji siłowni nawet w odległości 100–200 m od siedzib ludzkich, gdzie w normalnych warunkach pracy turbiny i dogodnej propagacji hałasu, stanowią one uciążliwość i zagrożenie dla otoczenia. Zatem wydaje się, że kryterium odległości, ustalone po rozważnym przeanalizowaniu wszystkich możliwych zagrożeń, mogłoby być prawnie zapewnione po to, aby troska o środowisko i korzyści inwestorów nie zwyciężyły z bezpośrednim bezpieczeństwem człowieka.

## Literatura

- [1] Augustyńska D. i in.: Hałas. Hałas infradźwiękowy i hałas ultradźwiękowy, Centralny Instytut Ochrony Pracy.
- [2] Baranowski J.: Ekspertyza: Energetyka wiatrowa w kontekście ochrony krajobrazu przyrodniczego i kulturowego w województwie kujawsko-pomorskim Moduł B: Analiza zdolności przesyłowych i wpływ elektrowni wiatrowych na zdrowie człowieka oraz środowisko przyrodnicze, Warszawa 2012.
- [3] Baerwald E.F. et al.: Barotrauma is a significant cause of bat fatalities at wind turbines, *Current Biology* 18(16)/2008.
- [4] Chylarecki P. i in.: Wytyczne dotyczące oceny oddziaływania elektrowni wiatrowych na ptaki, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa 2011.
- [5] Colby D.W., et al.: Review: Wind Turbine Sound and Health Effects. An Expert Panel Review. Raport dla: American Wind Energy Association, Canadian Wind Energy Association, December 2009.
- [6] Ellenbogen J. et al.: Studium wpływu turbin wiatrowych na zdrowie: Sprawozdanie panelu niezależnych specjalistów Raport dla: Departamentu Ochrony Środowiska i Departamentu Zdrowia Publicznego Stanu Massachusetts, styczeń 2012.
- [7] Howe B.: Wind turbines and infrasound, Raport dla: Canadian Wind Energy Association, November 2006.
- [8] Kepel A. i in.: Wytyczne dotyczące oceny oddziaływania elektrowni wiatrowych na nietoperze, Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska, Warszawa 2011.
- [9] Kłaczyński M. Wszolek T.: Acoustic study of REpower MM92 wind turbines during exploitation. *Archives of Acoustics* 39(1)/2014, 3–10.
- [10] Knopper L.D., Ollson C.A.: Health effects and wind turbines: A review of the literature *Environmental Health* 10(78)/2011.
- [11] Kunz T. et al.: Ecological impacts of wind energy development on bats: questions, research needs, and hypotheses, *Front Ecol. Environ* 5(6)/2007, 315–324.
- [12] LeBlanc M.P.: Recommendations for risk assessments of ice throw and blade failure in Ontario, Canadian Wind Energy Association, May 2007.
- [13] Makarewicz R.: Thump noise prediction 5th International Meeting on Wind Turbine Noise Denver, August 2013.

- [14] Marczak P.: Energetyka wiatrowa a społeczności lokalne, Opracowania Tematyczne, Kancelaria Senatu, Warszawa 2011.
- [15] Pawlas K.: Wpływ infradźwięków i hałasu o niskich częstotliwościach na człowieka – przegląd piśmiennictwa. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* 2(60)/2009, 27–64.
- [16] Pawlas K. i in.: Życie w pobliżu turbin wiatrowych, ich wpływ na zdrowie – przegląd piśmiennictwa *Medycyna Środowiskowa* 15(4)/2012, 150–158.
- [17] Pojmański G.: Opinia dotycząca zagrożeń związanych z eksploatacją i awariami turbin wiatrowych, 2013  
<http://bezpiecznaenergia.eu/aktualnosci-wiatrakowe/33-zagrozenie-bezpieczenstwa-publicznego.html>, [10.05.15]
- [18] Salt A.N., Hullar T.E.: Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines, *Hearing Research* 268/2010, 12–21.
- [19] Tammelin B. et al.: Wind Energy in Cold Climate, *Meteorological Publications No. 41*, Finnish Meteorological Institute, Helsinki, February 2000.
- [20] Update of UK Shadow Flicker Evidence Base, Ekspertyza przeprowadzona przez firmę Parsons Brinckerhoff dla Departamentu Energii i Zmian Klimatu Wielkiej Brytanii, 2011.
- [21] Van den Berg G.P., Effects of the wind profile at night on wind turbine sound, *Journal of Sound and Vibration* 277/2004, 955–970.
- [22] Wiśniewski G. i in.: Raport: Wizja rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce do 2020 r., Instytut Energetyki Odnawialnej, styczeń 2010.
- [23] Wszolek T., Kłaczyński M.: Problems in Measurements of Noise Indicators for Wind Turbines in Poland, *Proc. Forum Acusticum*, September 2014.
- [24] Wuczyński A.: Wpływ farm wiatrowych na ptaki. Rodzaje oddziaływań, ich znaczenie dla populacji ptasich i praktyka badań w Polsce, *Notatki Ornitologiczne*, 50/2009, 206–227.
- [25] Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, czerwiec 2014.
- [26] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku wraz z późniejszymi poprawkami, styczeń 2014.
- [27] ISO PN-EN 61672-1:2005 Elektroakustyka -- Mierniki poziomu dźwięku -- Część 1: Wymagania.
- [28] PN-ISO 7196:2002 Akustyka – Charakterystyka częstotliwościowa filtru do pomiarów infradźwięków.
- [29] PN-N-01338:2010 Akustyka – Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.
- [30] <http://wind-power.pl/mapa/podkarpackie/farma-wiatrowa-leki-dukielskie/> [30.11.13].

**Mgr inż. Hanna Pamuła**  
e-mail: hanna.pamula@agh.edu.pl

Doktorantka na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki. W lipcu 2015 ukończyła z wyróżnieniem inżynierię biomedyczną na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej. Interesuje się pomiarami i analizą sygnałów biomedycznych oraz ornitologią i fotografią. Jej praca magisterska została wybrana jako najlepsza z prac teoretycznych obronionych na wydziale w 2015 r., otrzymując wyróżnienie w konkursie „Diamenty AGH”.



**Dr inż. Maciej Kłaczyński**  
e-mail: maciej.klaczynski@agh.edu.pl

Adiunkt na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH w Krakowie w Katedrze Mechaniki i Wibroakustyki. Zajmuje się przetwarzaniem sygnałów i metodami rozpoznawania obrazów i sygnałów wibroakustycznych do zastosowań w medycynie, technice i monitoringu środowiska. Autor 108 artykułów naukowych i publikacji konferencyjnych. Członek Polskiego Towarzystwa Akustycznego i Polskiego Towarzystwa Diagnostyki Technicznej.



otrzymano/received: 10.10.2015

przyjęto do druku/accepted: 31.03.2016