

## **11. Spotkanie Międzynarodowe poświęcone hałasowi i wibracjom o niskiej częstotliwości i ich ograniczaniu. Maastricht 30.08 – 01.09. 2004**

### **Czy turbiny wiatrowe generują dźwięki niskiej częstotliwości o znaczącym poziomie.**

G.P. van den Berg

University of Groningen – Science Shop for Physics

Nijenborgh 4, 9747AG Groningen, the Netherlands

g.p.van.den.berg@phys.rug.nl

### **Streszczenie**

Turbiny wiatrowe powodują powstawanie dźwięków niskiej częstotliwości ale nie wykazano aby to było głównym czynnikiem składającym się na ich uciążliwość. Dźwięk pochodzący z turbin wiatrowych jest wynikiem działania kilku mechanizmów jego generowania związanych z wzajemnym oddziaływaniem łopat turbiny i powietrza. Dźwięk niskiej częstotliwości jest w przeważającej mierze wynikiem przemieszczania powietrza przez łopatę i turbulencji powstających na powierzchni łopaty.

W istotny sposób do powstawania części widma akustycznego o niskiej częstotliwości może przyczyniać się gwałtowna zmiana opływu powietrza w momencie, gdy łopata przechodzi obok wieży: kąt natarcia nadlatującego powietrza w sposób nagły odbiega od kąta optyimizowanego dla średnich przepływów.

Tego efektu prawdopodobnie dlatego nie uznano za ważny ponieważ częstotliwość dźwięku powstającego w momencie przejścia łopaty obok wieży jest rzędu jednego herca, czyli mieści się w zakresie na który ludzki słuch nie jest wrażliwy. Jednakże taki argument ukrywa jeden bardzo ważny skutek: niska częstotliwość dźwięku powstającego w momencie przejścia moduluje dobrze słyszalne dźwięki wyższej częstotliwości i w ten sposób generuje dźwięk okresowy. Taki efekt jest silniejszy w porach nocnych, ponieważ w stabilnych warunkach atmosferycznych zaznaczają się większe różnice między średnią prędkością wirnika i prędkością wiatru w pobliżu wieży. Wykonane pomiary wykazują iż większą liczbą turbin może wzajemnie oddziaływać na siebie i w ten sposób wzmacniać wspomniany efekt.

Istnienie tego efektu potwierdzają ludzie zamieszkujący w pobliżu turbin wiatrowych. Z ich podobnych do siebie obserwacji wynika, że często późnym popołudniem lub wieczorem dźwięk turbin zmienia się na bardziej „kłapiący” lub przypominający „rytmiczne uderzenia”, przy czym rytm zgadza się z częstotliwością przejścia łopaty obok wieży. Z tego jasno wynika, że to zjawisko jest związane z większą stabilnością atmosferyczną. Nie badano podwyższonej uciążliwości jako takiej, choć literatura przedmiotu zawiera sugestie iż omawiane skutki są ważne. Są one tym bardziej istotne, że odnoszą się do nowoczesnych (tzn. wyższych) turbin wiatrowych, w których występują ze zwiększoną intensywnością.

### **Wprowadzenie**

Nowoczesne turbiny wiatrowe mają wydajność do 2 MW (obecnie do 5 MW) energii elektrycznej i osiągają wysokość od 80 do 100 metrów (obecnie do 120 m). W Unii Europejskiej – produkującej 74% światowej energii elektrycznej wytwarzanej z wiatru - do końca 2002 r. zainstalowano urządzenia wiatrowe o mocy 23 GW. Cel Europy na rok 2010 to osiągnięcie 40 GW, ale już prognozuje się osiągnięcie 90 GW w tym roku [1]. Jednym ze

skutków tego wzrostu jest to, że coraz większa liczba ludzi mieszka w pobliżu (projektowanych) parków wiatrowych i mają oni powody do zadawania zapytań i - być może - zaniepokojenia wpływem wspomnianych parków na środowisko. Zwykle za potencjalnie negatywny wpływ na środowisko uważa się: wpływ wizualny, czyli pojawiające się i znikające odbłaski z łopat turbin oraz pojawiające się i znikające cienie (gdy słońce jest we pozycji za łopatami), a także generowany dźwięk.

Podjeżdżewa się, że turbiny wiatrowe są źródłem hałasu o niskiej częstotliwości, który ma wpływ na ludzi mieszkających w ich sąsiedztwie. Tę kwestię podniesiono w Wielkiej Brytanii, gdzie przeciwnicy parków wiatrowych twierdzą, że „obecne rekomendacje odnośnie oceny hałasu w pobliżu miejsc umieszczenia turbin wiatrowych kompletnie pomijają pomiary dźwięku o niskiej częstotliwości” [2]. W odpowiedzi na tak postawiony zarzut Brytyjskie Stowarzyszenie Energii Wiatrowej zaprzecza i oskarża przeciwną stronę o „niezrozumienie informacji technicznych i radosne wykorzystywanie takich materiałów w niewłaściwy sposób. Jednym z tego przykładów jest uporczywie niewłaściwe używanie materiałów dotyczących hałasu”. [3].

Jednakże w niedawnej ocenie zjawiska przygotowanej na potrzeby Brytyjskiego Departamentu ds. Środowiska, Żywności i Spraw Społeczności Wiejskich stwierdza się, że „we współczesnym życiu, wystawienie na działanie infradźwięków jest wszechobecne (...) powszechne w środowiskach miejskich oraz jako emisja z (...) urządzeń wykorzystujących ruch powietrza, z turbinami wiatrowymi włącznie (...). W porównaniu do innych rodzajów hałasu, skutki infradźwięków, czyli hałasu o niskiej częstotliwości, dają powód do szczególnego zaniepokojenia ze względu na ich wszechobecność.”[4]. Również według propozycji projektu badawczego przedstawionego przez szwedzką Kungl - Wyższą Szkołę Technologii „istnieje ryzyko [generowania] dźwięku o niskiej częstotliwości przez duże farmy turbin wiatrowych, których budowę planuje się w Szwecji i innych krajach europejskich” [5]. Tak więc ci, którzy łączą turbiny wiatrowe z powstawaniem dźwięku o niskiej częstotliwości są w doborowym towarzystwie. Lecz pozostaje pytanie: czy ma on wpływ na ludzi mieszkających w sąsiedztwie?

Niniejsza praca bada naturę dźwięku niskiej częstotliwości powstającego w wyniku działania turbin wiatrowych i wyjaśnia dlaczego, w zależności od przyjętej perspektywy, niskie częstotliwości jednocześnie są i nie są istotne dla omawianego tematu.

### **Źródła dźwięku generowanego przez turbiny wiatrowe**

Dysponujemy ogromnym zasobem informacji na temat natury, przyczyn i mocy dźwięku generowanego przez turbiny wiatrowe. Wagner i jego współpracownicy dają przegląd tematu wynikający z programu badawczego Unii Europejskiej [6]. Niniejsza praca zwraca uwagę na omówienie trzech mechanizmów będących źródłem wspomnianego dźwięku. To omówienie jest poprzedzone wstępem na temat aeroakustyki wiatru.

Przepływ powietrza wokół ciała o opływowym kształcie powoduje powstawanie dźwięku o niskiej intensywności. W przypadku wyższych prędkości oraz/lub na dłuższych odcinkach opływ w warstwie przyściennej (między ciałem i głównym strumieniem) staje się turbulentny. Jako że to zjawisko prowadzi do szybkich zmian prędkości, generuje ono głośniejszy dźwięk o częstotliwościach związanych z szybkością zachodzących zmian. Typowy rozmiar takiej turbulencji określa grubość warstwy przyściennej.

Podobnie jak w przypadku skrzydeł samolotowych czy łopat śmigła, łopatę turbiny wiatrowej napędza siła nośna wywołana opływem powietrza - łopata osiąga największą wydajność przy maksymalnej sile nośnej i minimalnym oporze opływu. O sile nośnej i

oporze decyduje kąt natarcia: kąt zawarty między strumieniem dolotowym i cięciwą profilu lotniczego (linią między krawędzią przednią i tylną łopaty). Kiedy kąt natarcia przekracza swoją optymalną wartość, turbulenta warstwa przyścienna staje się grubsza i wykazuje silniejsze turbulencje jednocześnie zmniejszając wydajność mocy i zwiększając poziom dźwięku. W przypadku rosnącego kąta natarcia prowadzi to do przeciągnięcia: dramatycznego spadku siły nośnej. Również sama atmosfera wykazuje turbulencje o szerokim zakresie częstotliwości i natężeniu. Energia turbulencji atmosferycznych osiąga najwyższą wartość przy częstotliwości zależnej od wysokości i stabilności warunków atmosferycznych; w przypadku turbin wiatrowych ta częstotliwość wynosi jeden raz na minutę (w przybliżeniu 0.01 Hz) a „średnica” towarzyszącego jej wiru wynosi kilkaset metrów [7]. Średnica wiru i siła turbulencji zmniejszają się przy rosnącej częstotliwości i zanikają w rezultacie tarcia lepkościowego po osiągnięciu rozmiaru jednego milimetra.

W przypadku współczesnych turbin wiatrowych zakłócony opływ powietrza jest dominującą przyczyną powstawania (słyszalnego) dźwięku. Za powstawanie dźwięku odpowiada kilka mechanizmów.

1. Kiedy łopata przecina powietrze, powietrze na krawędzi natarcia jest rozprawiane na boki i zbiega się na krawędzi tylnej. Tak więc w przypadku łopaty w ruchu okresowym powietrze ulega okresowemu wymuszonemu przemieszczeniu, co prowadzi do powstania „hałasu grubości” (część składowa hałasu wywoływanego przez śmigło powodowana przemieszczaniem powietrza przez łopatę wirującego śmigła – przyp.tłum.). Zwykle nie powoduje to znaczącego generowania dźwięku. Jednakże w momencie kiedy łopata przechodzi obok wieży turbiny napotyka wiatr, na którego zachowanie wpływa sama wieża: wiatr zwalnia i jest zmuszony do opłynięcia wieży z dwóch stron. A to oznacza, że kąt natarcia ulega nagłej zmianie. Siła nośna i opór również gwałtownie się zmieniają. Zmiana mechanicznego obciążenia zwiększa hałas grubości w tempie odpowiadającym częstotliwości z jaką łopata przechodzi obok wieży  $f_B$  (gdzie  $f_B$  oznacza częstotliwość rotacji turbiny pomnożoną przez liczbę łopat). Jako że taki ruch nie jest czysto sinusoidalny mamy do czynienia ze składowymi harmonicznymi o częstotliwości  $k \cdot f_B$ , gdzie  $k$  jest (niewielką) liczbą całkowitą. Ponieważ  $f_B$  zwykle ma wartość około 1 Hz a harmoniczne mogą występować w zakresie 10 – 20 Hz, ten dźwięk pozostaje w infradźwiękowej części widma. Innym następstwem jest gwałtowne nasilenie dźwięku wysokiej częstotliwości w wyniku zwiększonej turbulencji wynikającej z suboptymalnego kąta natarcia; tak powstaje charakterystyczny świst przecinanego powietrza nakładający się na stały hałas turbiny wiatrowej.
2. Turbulencje atmosferyczne powodują przypadkowy ruch powietrza nakładający się na średnią prędkość wiatru. Udział turbulencji atmosferycznych w generowaniu dźwięku przez turbiny wiatrowe nazywamy „hałasem turbulencji dopływowej” – jest to dźwięk szerokopasmowy obejmujący szerokie pasmo częstotliwości. W przypadku turbulentnych wirów przewyższających rozmiarami łopatę można przyjąć interpretację według której mamy do czynienia ze zmianami kierunku i/lub prędkości dopływu powietrza równymi odchyleniom od optymalnego kąta natarcia. To prowadzi do takich samych zjawisk jakie mówiono w punkcie 1., przy czym zmiany są zwykle mniej gwałtowne. W przypadku wirów turbulentnych o rozmiarach równych długości cięciwy profilu lub mniejszych, skutki mają charakter lokalny i nie zachodzą w sposób koherentny na powierzchnię łopaty. Kiedy łopata przecina wiry, powstają duże przyspieszenia i tym samym generuje się dźwięk.

3. Dźwięk wysokiej częstotliwości jest rezultatem kilku zjawisk związanych z opływem powietrza i zachodzących na samej łopacie lub w turbulentnym strumieniu odpływowym za łopatą (hałas płata). Wzrasta on wraz ze wzrostem indukowanej turbulencji wywołanej np. wyższą prędkością lub nieprawidłowościami na powierzchni łopaty (zadrapania, brud, insekty). Z natury jest to dźwięk szerokopasmowy ale jeśli turbulencja zdoła ustalić się na rysie czy nacięciu równoległym do krawędzi spływu, może zaznaczyć się określona częstotliwość skutkująca powstaniem dźwięku tonalnego.

### **Pomiary widma akustycznego dźwięku generowanego przez turbiny wiatrowe**

W lecie 2002 roku na terenie i w pobliżu parku wiatrowego Rhede na granicy niemiecko-duńskiej dokonano zapisu dźwięku generowanego przez turbiny wiatrowe. W tym parku turbiny ustawiono w równym rzędzie w odległości około 300 metrów jedna od drugiej równoległe do przebiegu granicy; siedem turbin postawiono ok. 400 m za pierwszym rzędem, w nieregularnej linii i w nieco nieregularnych odległościach od siebie. Każda z turbin ma 100 m wysokości (wysokość mierzona do osi turbiny), długość łopat wynosi 35 m; wydajność turbiny to 2 MW. Dowiedziono, że poziom dźwięku, determinowany przez prędkość obrotową turbin, zależał od stabilności warunków atmosferycznych i był mylnie prognozowany dla godzin wieczornych i nocnych według zwykłej referencyjnej prędkości wiatru mierzonej na wysokości 10 m.

Uzyskano wykres zarejestrowanego dźwięku w pasmach o szerokości 1/3 oktawy. Dźwięk rejestrowano na magnetofonie DAT TASCAM DA-1 z użyciem precyzyjnego mikrofonu Sennheiser. Następnie użyto analizatora częstotliwości Larson Davis 2800 do samplowania dźwięku w odcinkach jednosekundowych. Odpowiedź częstotliwościowa łańcucha pomiarowego była w zakresie 3dB dla częstotliwości wyższych od 4 Hz. W zakresie od 1 do 4 Hz odpowiedź częstotliwościowa nie jest dokładnie znana (określenie jej nigdy nie było konieczne dla naszej pracy). Widma określano na podstawie zapisów dźwiękowych (każdy o długości ok. 5 min.) dokonanych przy użyciu mikrofonu tuż nad utwardzoną powierzchnią na poziomie gruntu w odległości 100 m od dwóch różnych turbin (poziomy na wykresie mierzono wg. Równoważnego Poziomu Hałasu Ciągłego (Leq) z korekcją minus 6 dB dla koherentnych odbić od powierzchni) oraz zapisu dokonanego 1,5 m nad betonowym tarasem i w odległości 2 m od fasady domu mieszkalnego posadowionego 750 m od najbliższego rzędu turbin (pomiar Leq z korekcją minus 3 dB dla niekoherentnego odbicia przy fasadzie). W każdej części ilustracji nr 1 wykreślono 200 widm (co 1 sek.) oraz średnie widmo energetyczne. Również dla każdej częstotliwości w paśmie o szerokości 1/3 oktawy sporządzono wykres ilustrujący współczynnik korelacji  $\rho'$  między wszystkimi nieważonymi poziomami w pasmach o szerokości 1/3 oktawy oraz całkowity poziom dźwięku A (poziom ciśnienia akustycznego skorygowany według charakterystyki częstotliwościowej A – przyp. tłum.) . Z widm jasno wynika, że największą energię znajdujemy w niższych częstotliwościach. To nie implikuje, że wspomniana energia jest ważna dla słuchu albowiem słuch ludzki jest stosunkowo niewrażliwy na dźwięki niskiej częstotliwości. W rzeczy samej, korelacje wskazują, że większość słyszalnej energii w pobliżu turbin zawiera się w pasmach o szerokości 1/3 oktawy z częstotliwościami od 400 do 3150 Hz (gdzie współczynnik korelacji  $\rho'$  jest większy od 0,4). W przypadku dźwięku przy fasadzie jest on o jedną oktawę niższy (200 – 1600 Hz) ponieważ dźwięki o wyższej częstotliwości były lepiej absorbowane i w mniejszym stopniu przyczyniają się do powstawania energii dźwiękowej tak, jak ma to miejsce w pobliżu turbin.

Ilustracja nr 2 pokazuje wykres 13-tu bardziej szczegółowych jednosekundowych pasm o szerokości 1/3 oktawy (patrz ilustracja nr 1). Choć należałoby wziąć mniejszą szerokość pasma aby wykryć składową harmoniczną łopaty śmigła w momencie przejścia

obok wieży  $f_B=1$  Hz, pierwsza składowa harmoniczna 2 Hz jest wyraźnie widoczna. Bardziej szczegółowe widmo z pojedynczej turbiny podaje Betke i współpracownicy [9]. Na ilustracji nr 3 powtórzone trzy średnie widma z ilustracji nr 1 i dodano średni próg słuchu dla wybranych przez otolaryngologa młodych, dorosłych osób (zgodnie z normą ISO 226 [10]) a także próg słuchu dla 10% z nich cieszących się najlepszym (7-8 dB poniżej średniej) słuchem w grupie. Jest rzeczą oczywistą, że dźwięk poniżej 20 Hz należy uznać za niesłyszalny nawet dla osób z dobrym słuchem i nawet jeśli staną one blisko turbiny. Poziomy dźwięku mieszczące się powyżej niskich częstotliwości ale poniżej mniej więcej 1000 Hz należą do najczęściej słyszanych.

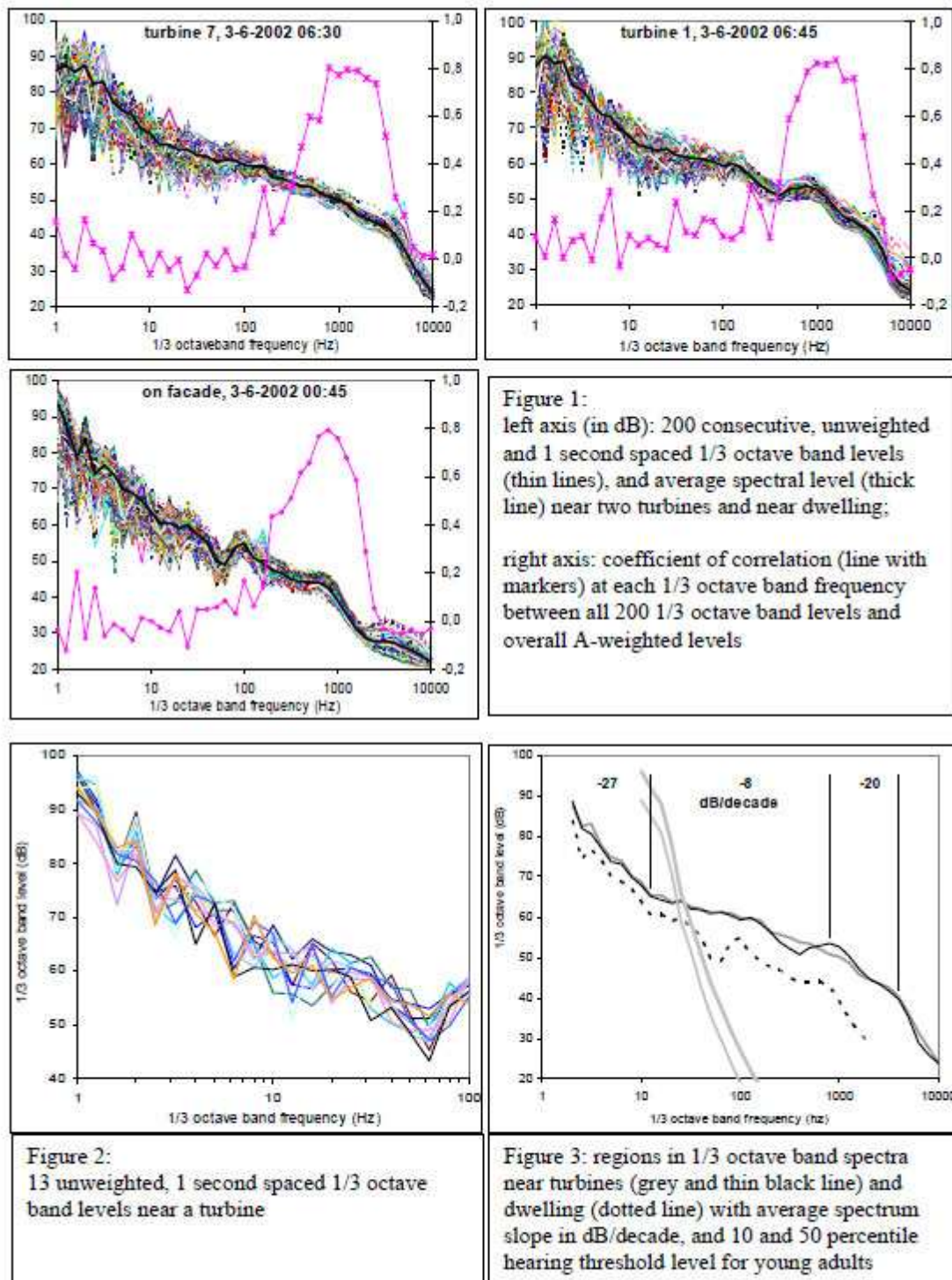
Z ilustracji nr 3 jasno wynika, iż poziomy dźwięku zarejestrowane w odległości 100 metrów od pojedynczej turbiny oraz 750 m od pierwszego rzędu turbin (widma w górnej części wykresu) wykazują podobne wartości przy częstotliwościach infradźwiękowych; różnica wynosi zaledwie 4 dB. Choć wraz z wzrostem odległości zmniejsza się poziom dźwięku generowanego przez pojedynczą turbinę, zjawisko to znajduje przeciwwagę w dużej liczbie turbin generujących hałas. Tak samo dzieje się przypadku wyższych częstotliwości ale wraz ze wzrostem odległości więcej energii dźwiękowej pochłania otoczenie.

Widma na ilustracji nr 3 dzielą się na trzy strefy. Dla częstotliwości poniżej 10 Hz dźwięk jest zdominowany przez hałas grubości związany z częstotliwością (oraz składową harmoniczną) z jaką łopata przechodzi obok wieży. Następnie, w wyższej strefie infradźwięków i powyżej tej strefy, gdzie spadek poziomu nie jest tak ostry, dominującym źródłem generującym dźwięk jest turbulencja strumienia dopływającego. Stopniowo, przy częstotliwościach powyżej 100 Hz, takim dominującym źródłem staje się hałas płata, który zmniejsza się dopiero przy wysokich częstotliwościach o wartości kilku kHz.

## **Pulsacje**

Dźwięk generowany przez turbiny wiatrowe z reguły nie jest uważany za pulsujący ponieważ wykazuje on mniej więcej stały poziom wynikający z przypadkowej natury mechanizmów odpowiedzialnych za jego powstawanie. Choć okresowe poświsty są słyszalne nie da się ich porównać z „prawdziwymi impulsami” takimi jak uderzenia młotka czy strzały z broni palnej.

Jednakże przy ustabilizowanych warunkach atmosferycznych okresowe poświsty są głośniejsze niż w ciągu dnia. Mieszkańcy używają w stosunku do nich takich określeń jak klaskanie, uderzanie, walenie. W przypadku parku wiatrowego Rhede walenie wyraźnie słychać z odległości co najmniej 1 km, a w porze nocnej można na jego podstawie obliczyć prędkość obrotową turbiny. Tak więc być może turbiny wiatrowe są w stanie wygenerować dźwięk pulsujący ale jest to możliwe tylko w szczególnych warunkach atmosferycznych: atmosfera musi być stabilna. Aby to lepiej zrozumieć musimy zrozumieć implikacje związane ze stabilną atmosferą w odniesieniu do wiatru czyli materii która napędza turbiny.



Ilustracja nr 1:

Lewa oś (w dB): 200 następujących po sobie, nieważonych i w odstępach jednosekundowych pasm o szerokości 1/3 oktawy (cienkie linie), oraz średni poziom spektralny (linia pogrubiona) w pobliżu dwóch turbin oraz w pobliżu domu mieszkalnego; Prawa oś: współczynnik korelacji (linia z markerami), dla każdej częstotliwości pasma o szerokości 1/3 oktawy, między wszystkimi (200) częstotliwościami pasma o szerokości 1/3 oktawy oraz całkowity poziom dźwięku A.

Ilustracja nr 2:

Trzydzieści nieważonych pasm o szerokości 1/3 oktawy w pobliżu turbiny.

Ilustracja nr 3:

Strefy w widmach pasma o szerokości 1/3 oktawy w pobliżu turbin (szare i cienkie czarne linie) i domu mieszkalnego (linia kropkowana) z średnim spadkiem widma w dB/dekada, oraz progiem słuchu dla młodych, dorosłych osób.

Prędkość wiatru  $v_h$  na wysokości  $h$  w atmosferze można zapisać jako:

$$V_h = v_{ref} \cdot (h/h_{ref})^m \quad (1)$$

gdzie  $v_{ref}$  jest prędkością wiatru na wysokości referencyjnej  $h_{ref}$  (zwykle 10 m). Wykładnik potęgi  $m$  zależy od stabilności atmosferycznej. Dla neutralnej atmosfery, występującej w warunkach dużego zachmurzenia i/lub przy silnym wietrze, siła wyporu powietrza dominuje wśród efektów termicznych i  $m$  ma wartość, w przybliżeniu, 0,2. W niestabilnej atmosferze, z jaką mamy do czynienia w ciągu dnia,  $m$  osiąga wartość (w przybliżeniu) 0,1. W stabilnej atmosferze  $m$  powinno teoretycznie osiągać wartości do maksimum  $\frac{1}{2}$ .  $V_2$  wyrażające paraboliczny profil wiatru odpowiadający przepływowi laminarnemu. W naszych pomiarach z Rhede wartości  $m$  sięgały do 0,6 [8]. Próbką danych z Duńskiego Królewskiego Instytutu Meteorologicznego KNMI [11] pokazuje, że w istocie to teoretyczne maksimum można osiągnąć: w dziesięciu z dwunastu półgodzinnych przedziałów o północy (średnio 0:00 – 0:30 czasu Greenwich) każdej pierwszej nocy miesiąca występowały inwersje temperatury w niższych 120-tu metrach wskazujące na stabilność atmosferyczną. W sześciu przypadkach temperatura wzrastała o więcej niż jeden stopień Celsjusza na wysokości od 10m do 120m a wykładnik  $m$  (obliczony z (1):  $m = \log(v_{80}/v_{10})/\log(8)$ ) wynosił 0,43; 0,44; 0,55; 0,58; 0,67; i 0,72 (planujemy wykonanie bardziej dogłębnej analizy na podstawie większej ilości danych aby uzyskać statystycznie istotne rezultaty długoterminowe).

W tekście poniżej użyjemy wartości  $m=0,1$  dla atmosfery niestabilnej oraz  $m=0,6$  dla atmosfery stabilnej. Te wartości przyjmujemy dla wysokości od 10 do 120 m. Prawdopodobnie profil wiatru na wysokości ponad 120 m nie mieści w formule (1) ponieważ otrzymamy mniej lub bardziej stałą prędkość wiatru (wiatr geostroficzny) w stabilnej atmosferze, po spadku kiedy sięgniemy górnej warstwy silnego strumienia wiatru na niskiej wysokości, ok. 100 m. Z tego powodu optymalną wysokością dla turbiny wiatrowej z punktu widzenia pozyskania energii elektrycznej będzie 100 m.

Skuteczność zależy od właściwości turbiny wiatrowej (takich jak prędkość, średnica i wysokość). Użyjemy typowych wymiarów nowoczesnej turbiny wiatrowej o mocy 1.5-2 MW, wysokość do osi turbiny – 80 m, średnica śmigła - 70 m, maksymalna prędkość obrotowa - 20 obr/min. Istnieją dwa powody dla których w stabilnej atmosferze okresowe poświsty nabierają bardziej pulsacyjnego charakteru (w porównaniu do atmosfery niestabilnej lub neutralnej).

1. Prędkość obrotową determinuje średnia prędkość wiatru na wirniku ale różnica w prędkości wiatru między górną a dolną częścią wirnika zwiększa się. Przypuśćmy, że prędkość wiatru na wysokości osi to  $v_{80}=8$  m/sek. W ciągu dnia ( $m=0,1$ ) prędkość wiatru w najniższym punkcie wirnika wyniesie  $v_{45}=7.6$  m/sek.; zaś w najwyższym punkcie będzie to  $v_{115}=8.3$  m/sek.. Różnica prędkości wiatru wynosząca 0,35 m/sek. powoduje zmiany w kącie natarcia o wartości 0,25 stopnia (plus lub minus, zależnie od wartości średniej). Bardzo niewielka zmiana nachylenia wirnika w pionie może temu zapobiec. W nocy ( $m=0,6$ ) przy tej samej prędkości wiatru na wysokości osi  $v_{45}$  wynosi 5.7 m/sek. a dla  $v_{115} = 9.9$  m/sek., tak więc różnice w prędkości wiatru na wirniku oraz zmiana kąta natarcia stają się sześć razy większe: odpowiednio - 2,1 m/sek. oraz 1,5 stopnia. Konsekwencją tego jest większy hałas płata. Innym skutkiem jest większe niedopasowanie optymalnego i rzeczywistego kąta natarcia w momencie kiedy łopata przechodzi obok wieży (gdzie i tak wystąpiło już niedopasowanie spowodowane wieżą) powodujące większe obciążenie łopat i większe turbulencje. Ten skutek jest wyraźnie słyszalny po zapadnięciu nocy: łopaty zaczynają kłapać lub bić z częstotliwością z jaką łopata przechodzi obok wieży. Efekt wzmacnia się wraz ze wzrostem stabilności atmosferycznej, a także wtedy gdy prędkość wiatru na wysokości osi wirnika wzrasta do tego stopnia, że turbulencje

wywołane tarciem biorą górę nad stabilnością i atmosfera przechodzi w stan neutralny.

2. Jak już wcześniej wykazano [8] w atmosferze stabilnej turbiny wiatrowe mogą pracować prawie synchronicznie ponieważ względny brak turbulencji powoduje mniej przypadkowy ruch nałożony na stałą prędkość wiatru na każdej turbinie. Dlatego też, turbiny pracujące w parku wiatrowym dostają wiatr, który jest bardziej stały na większych odległościach. W rezultacie reagują one w podobny sposób, tzn. ich prędkości stają się prawie równe. Potwierdzają to długookresowe pomiary wykonane przez Nanahara i jego współpracowników, którzy analizowali koherencję prędkości wiatru w dwóch obszarach przybrzeżnych [12]. W godzinach nocnych prędkości wiatru w różnych miejscach okazały się zmieniać bardziej koherentnie niż w ciągu dnia. [13]. Różnica między godzinami nocnymi i dziennymi nie była bardzo duża, prawdopodobnie dlatego, że po prostu pora dnia jest pomocną, ale niewystarczającą, wskazówką odnośnie stabilności, szczególnie w pobliżu morza i nie przez cały rok.

W wyniku prawie-synchroniczności kilku turbin zdarza się że dwie z nich są w fazie i pulsowania spowodowane przejściem łopaty obok wieży stają się zbieżne po to aby za chwilę znaleźć się w przeciwfazie. To samo może się zdarzyć z trzema lub większą liczbą turbin. Dokładna synchroniczność nie dałaby tego samego efektu ponieważ nie jest prawdopodobne aby obserwator słyszał pulsy w tym samym czasie. Prawie-synchroniczność spowoduje, że obserwator usłyszy pulsowanie przez pewien czas. Synchroniczność odnosi się do impulsów dźwiękowych różnych turbin w miejscu, w którym znajduje się obserwator: impulsy synchronizują się kiedy jednocześnie docierają do ucha obserwatora. To nie znaczy, że wirniki są w fazie: w takim przypadku impulsy nie docierałyby symultanicznie jeśli turbiny nie byłyby umiejscowione w odległości (do obserwatora) równej dystansowi na jakim rozprzestrzenia się pojedynczy impuls w jednej lub wielu powtórkach.

Oba efekty, gradient prędkości wiatru i prawie-synchroniczność, podnoszą poziom dźwięku słyszanego w momencie kiedy łopaty przechodzą obok wieży. Dodatkowe obciążenie łopaty samo w sobie nie jest słyszalne z powodu wysokiego progu słyszalności przy bardzo niskiej częstotliwości towarzyszącej przejściu łopaty obok wieży. Jednakże efekt dodatkowej, indukowanej częstotliwości podnosi poziom dźwięku przy częstotliwościach, które dominują w najlepiej słyszanej części dźwięku – tzn. w odległości 750 m i paśmie 200-1600 Hz. Kiedy pulsowanie dźwięku w Rhede synchronizuje się, poziom 800 Hz pasma o szerokości 1/3 oktawy (najlepiej skorelowany ze słyszalnością: patrz widmo fasady na ilustracji nr 1) wzrasta o 10 dB podczas gdy ogólny poziom dźwięku A wzrasta o 5 dB. Wysokość impulsu zależy od zmiany kąta natarcia oraz odległości w jakiej stoją wieże względem obserwatora: rytmiczne uderzenia powodowane przez kilka turbin osiągną wyższy poziom pulsowania, kiedy więcej turbin znajduje się w mniej więcej równej odległości przyczyniając się do wyższych poziomów emisji. Odgłosy kłapania czy uderzania występują na dobrze słyszanych częstotliwościach i powtarzają się z częstotliwością równą częstotliwości z jaką łopata przechodzi obok wieży.

## **Drżenie szyb**

Choć infradźwięki o częstotliwości 20 Hz generowane przez wielkie turbiny są zbyt niskie aby były słyszalne, mogą one powodować wibrowanie elementów konstrukcyjnych w domach. Wibracje zaś mogą generować dźwięk o wyższej, słyszalnej częstotliwości.



Ze względu na niską masę w stosunku do zajmowanej powierzchni, okna są zwykle najbardziej wrażliwym elementem konstrukcyjnym. Dostrzegalne wibracje okien mogą powstawać przy częstotliwościach od 1 do 10 Hz gdy ciśnienie akustyczne przychodzącego dźwięku o szerokości 1/3 oktawy wynosi w przybliżeniu 52 dB [14]; przy częstotliwościach wyższych lub niższych konieczny jest wyższy poziom dB aby spowodować dostrzegalne wibracje. Poziomy ciśnienia akustycznego powyżej 60 dB przy częstotliwościach poniżej 10 Hz występują w pobliżu turbiny oraz **w odległości 750 i więcej metrów** od niej.

Okno wibrujące z określoną częstotliwością przenosi tę częstotliwość na powietrze wewnątrz budynku. Jeśli nie zbiegnie się ona z rezonansem pokoju, dźwięk nie będzie głośniejszy niż na zewnątrz. W przypadku pokoi mieszkalnych nie większych niż 10 m częstotliwości rezonansu są wyższe niż ,w przybliżeniu, 15 Hz i dlatego nie mogą zbiegać się z odnośnymi składowymi harmonicznymi fB, [czyli] częstotliwością z jaką łopata przechodzi obok wieży. Jednakże sama szyba okienna może mieć swoją częstotliwość rezonansu rzędu, powiedzmy, 40 Hz, a częstotliwość rzędu 10 Hz może podtrzymać rezonans szyby okiennej w ten sposób przekształcając niesłyszalne infradźwięki w słyszalne, wyższe częstotliwości.

## Podsumowanie

Infradźwiękowe składowe harmoniczne częstotliwości równej częstotliwości z jaką łopata mija wieżę generowane przez nowoczesne, wysokie turbiny wiatrowe należy uznać za niesłyszalne. Dźwięk niskiej częstotliwości powstający w zakłóconym strumieniu wpływającym może być słyszalny, ale to przy średnich i wysokich częstotliwościach dźwięk generowany przez turbiny wiatrowe jest najgłośniejszy. Ten łatwo słyszany dźwięk jest powodowany przez turbulencje atmosferyczne i indukowane na powierzchni łopaty. Poziom takiego dźwięku turbulencyjnego o średniej/wysokiej częstotliwości waha się zależnie od częstotliwości z jaką łopata przechodzi obok wieży, co powoduje generowanie typowego poświstu.

W warunkach stabilnej atmosfery, zwykle w nocy, przy częściowo bezchmurnym niebie i niewielkim do umiarkowanego wietrze ( na poziomie gruntu) w profilu wiatru zachodzi ważna zmiana mająca wpływ na wydajność turbiny. Opływ powietrza wokół łopaty zmienia się na mniej niż optymalny, co skutkuje dodatkową turbulencją indukowaną. Ten efekt jest najsilniejszy, kiedy łopaty przechodzą obok wieży powodując krótkotrwałe, wyższe poziomy dźwięku o częstotliwości równej częstotliwości z jaką łopata przechodzi obok wieży. W parkach wiatrowych takie pulsujące dźwięki mogą się synchronizować, co prowadzi do powstania jeszcze głośniejszych impulsów odczuwanych przez obserwatora stojącego poza parkiem. Powtarzające się, pulsujące dźwięki zmieniają charakter dźwięku generowanego przez park i należy się spodziewać że będą powodować dodatkową uciążliwość.

## Przypisy

1- "Windpower keeps its promises", New and Renewable energies: Wind energy, [http://europa.eu.int/comm/energy/res/sectors/wind\\_energy\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/energy/res/sectors/wind_energy_en.htm), visited June 16, 2004

2- More attention must be paid to the harmful effects, Western Morning News, 6 January 2004; <http://www.countryguardian.net/WMN%20re%20noise.htm>

3- <http://www.britishwindenergy.co.uk/ref/cgnoise.html>, visited June 16, 2004

4- Geoff Leventhal: "A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its

Effects”, Report for Defra, 2003

5- H. Bodén, M. Boue, M. Åbom: “Sound from sea based wind turbines (TRANS)”,  
<http://www.kth.se/forskning/pocket/project.asp?id=20106>, visited June 16, 2004

6- S. Wagner, R. Bareiss, G. Guidati: “Wind turbine noise”, Springer, Berlin, 1996

7- E.L. Petersen, N.G. Mortensen, L. Landberg, J. Høstrup, H.P. Frank: Wind power meteorology”, *Wind Energy* **1** (1998), pp. 2-22

8- G.P. van den Berg: "Effects of the wind profile at night on wind turbine sound", *Journal of Sound and Vibration*, in press

9- K. Betke, H. Remmers: “Messung und bewertung von tieffrequentem Schall”, presented at DAGA’98, Zürich, 1998

10- ISO: ISO 226: “Acoustics-Equal Loudness contours for otologically normal listeners, part 1”

11- A.P. van Ulden, J.G. van der Vliet en J. Wieringa: “Temperature and wind observations at heights from 2m to 200m at Cabauw in 1973”, 1976, De Bilt

12- T. Nanahara, M. Asara, T. Sato, K. Yamaguchi, M. Shibata, T. Maejima: "Smoothing effects of distributed wind turbines, part 1", *Wind Energy* 2004 (7), pp. 61-74

13- T. Nanahara: personal communication by e-mail, June 14, 2004

14- Figure in [6] taken from D. G. Stephens: “Evaluation human exposure noise large wind turbines”, NASA-TM-83288, March 1982