

Studium wpływu turbin wiatrowych na zdrowie:

Sprawozdanie panelu niezależnych specjalistów

styczeń 2012

Opracowane dla:

**Departament Ochrony Środowiska Stanu Massachusetts
Departament Zdrowia Publicznego Stanu Massachusetts**

Członkowie panelu niezależnych specjalistów:

Jeffrey M. Ellenbogen, MD; MMSc
Professor of Neurology, Harvard Medical School
Division Chief, Sleep Medicine, Massachusetts General Hospital

Sheryl Grace, PhD; MS Aerospace & Mechanical Engineering
Associate Professor of Mechanical Engineering, Boston University

Wendy J Heiger-Bernays, PhD
Associate Professor of Environmental Health, Department of Environmental Health,
Boston University School of Public Health
Chair, Lexington Board of Health

James F. Manwell, PhD Mechanical Engineering;
MS Electrical & Computer Engineering; BA Biophysics
Professor and Director of the Wind Energy Center, Department of Mechanical & Industrial
Engineering University of Massachusetts, Amherst

Dora Anne Mills, MD, MPH, FAAP
State Health Officer, Maine 1996–2011
Vice President for Clinical Affairs, University of New England

Kimberly A. Sullivan, PhD
Research Assistant Professor of Environmental Health, Department of Environmental Health,
Boston University School of Public Health

Marc G. Weisskopf, ScD Epidemiology; PhD Neuroscience
Associate Professor of Environmental Health and Epidemiology
Department of Environmental Health & Epidemiology, Harvard School of Public Health

Facilitative Support provided by Susan L. Santos, PhD, FOCUS GROUP Risk
Communication and Environmental Management Consultants

Spis treści:

Podsumowanie prac

ES 1 Zadania panelu

ES 2 Metody działania

ES 3 Wstęp do raportu i opis

ES 4 Wyniki

ES 4.1 Hałas

ES 4.1.a Wytwarzanie hałasu i wibracji przez turbiny wiatrowe

ES 4.1.b Wpływ hałasu i wibracji na zdrowie

ES 4.2 Migotanie cieni

ES 4.2.a Powstawanie migotania cieni

ES 4.2.b Wpływ migotania cieni na zdrowie

ES 4.3 Miotanie lodem

ES 4.3.a Przyczyny miotania lodem

ES 4.3.b Wpływ miotania lodem na zdrowie

ES 4.4 Inne rozpatrywane kwestie

ES 5 Najlepsze praktyki dotyczące wpływu turbin wiatrowych na zdrowie

ES 5.1 Hałas

ES 5.2 Migotanie cieni

ES 5.3 Miotanie lodem

ES 5.4 Konsultacje społeczne a rozdrażnienie

ES 5.5 Przepisy/Zachęty/Edukacja społeczna

Rozdział 1: Wstęp do raportu

Rozdział 2: Wprowadzenie do tematyki turbin wiatrowych

2.1 Budowa i działanie turbin wiatrowych

2.2 Hałas generowany przez turbiny

2.2.a Pomiar i rejestracja

2.2.b Infradźwięki i dźwięki niskiej częstotliwości (IFLN)

Rozdział 3: Skutki zdrowotne

3.1 Wstęp

3.2 Wystawienie ludzi na oddziaływanie turbin wiatrowych

3.3 Studia epidemiologiczne ekspozycji na oddziaływanie turbin wiatrowych

3.3.a Badania szwedzkie

3.3.b Badania holenderskie

3.3.c Badania nowozelandzkie

3.3.d Dodatkowe publikacje nie-naukowe

3.3.e Podsumowanie danych epidemiologicznych

3.4 Oddziaływanie turbin wiatrowych: Hałas, wibracje, migotanie cieni i miotanie lodem

3.4.a Potencjalne skutki zdrowotne związane z hałasem i wibracjami

3.4.a.i Wpływ hałasu z turbin wiatrowych na sen

3.4.b Migotanie cieni i potencjalne skutki dla zdrowia

3.4.b.i Potencjalne skutki zdrowotne migotania

3.4.b.ii Podsumowanie wpływu migotania

3.4.c. Miotanie lodem i potencjalne skutki zdrowotne

3.5 Skutki hałasu i wibracji na modelach zwierzęcych

3.6 Zgłoszenia występowania negatywnych skutków zdrowotnych wywołanych przez hałas i wibracje

3.6.a Wibracje

3.6.b Podsumowanie zgłoszonych przypadków

Rozdział 4: Wnioski

4.1 Hałas

4.1.a Generowanie hałasu i wibracji przez turbiny wiatrowe

4.1.b Skutki zdrowotne hałasu i wibracji

4.2 Migotanie cieni

4.2.a Powstawanie migotania cieni

4.2.b Skutki zdrowotne migotania cieni

4.3 Miotanie lodem

4.3.a Geneza zjawiska

4.3.b Skutki zdrowotne miotania lodem

4.4 Inne postulowane wnioski

Rozdział 5: Najlepsze praktyki dotyczące ograniczania wpływu turbin wiatrowych na zdrowie

5.1 Hałas

5.2 Migotanie cieni

5.3 Miotanie lodem

5.4 Konsultacje społeczne a rozdrażnienie

5.5 Przepisy / Zachęty / Edukacja społeczna

Załącznik A: Turbiny wiatrowe – Wprowadzenie do energii wiatrowej

AA.1 Natura wiatru

AA.2 Zmienność wiatru

AA.3 Energia wiatru

AA.4 Uskok wiatru

AA.5 Zależność konstrukcji turbiny od charakteru wiatru

AA.5.a Turbulencje

AA.5.b Porywy wiatru

AA.5.c Huragany

AA.5.d Grunt

AA.6 Aerodynamika turbin wiatrowych

AA.7 Mechanika i dynamika turbin wiatrowych

AA.7.a Ruch wirnika

AA.7.b Zmęczenie

AA.8 Komponenty turbin wiatrowych

AA.8.a Zespół gondoli wirnika

AA.8.b Wirnik

AA.8.c Zespół napędowy

AA.8.d Wały

AA.8.e Przekładnia

- AA.8.f Hamulec
- AA.8.g Generator
- AA.8.h Płyta fundamentowa
- AA.8.i Układ odchylania
- AA.8.j Układ sterowania
- AA.8.k Konstrukcja wsporcza
- AA.8.l Materiały na turbiny wiatrowe

AA.9 Montaż

AA.10 Produkcja energii

AA.11 Zmienne aspekty działania turbin wiatrowych

- AA.11.a Okresowość zmiennych aspektów działania turbin wiatrowych

AA.12 Turbiny wiatrowe i ograniczanie zanieczyszczania środowiska

Załącznik B: Turbiny wiatrowe – migotanie cieni

AB.1 Migotanie cieni i błyskanie

AB.2 Możliwości łagodzenia zjawiska

Załącznik C: Turbiny wiatrowe – Miotanie lodem

AC.1 Spadanie lub miotanie lodem przez turbinę wiatrową

AC.2 Podsumowanie zagadnienia

Załącznik D: Turbiny wiatrowe – wprowadzenie do zagadnienia do hałasu

AD.1 Poziom ciśnienia akustycznego

AD.2 Pasma częstotliwości

AD.3 Uśrednianie

AD.4 Moc akustyczna źródła

AD.5 Przykład analizy danych

AD.6 Hałas turbiny wiatrowej na przykładzie kilku turbin

AD.7 Definicja infradźwięków

Załącznik E: Turbiny wiatrowe – Szacowanie poziomu mocy akustycznej i rozchodzenia się hałasu

AE.1 Modele aproksymujące przewidywany poziom mocy akustycznej turbiny wiatrowej

AE.2 Zależność poziomu mocy akustycznej od liczby turbin wiatrowych

AE.3 Rozprzestrzenianie się hałasu z turbin wiatrowych

AE.4 Rozprzestrzenianie się hałasu z zespołu turbin wiatrowych

Załącznik F: Turbiny wiatrowe – hałas łopat sterowanych przeciągnięciem wobec hałasu łopat regulowanych kątem ustawienia

AF.1 Typowy hałas turbiny wiatrowej z regulowanym kątem ustawienia łopat

AF.2 Hałas turbiny wiatrowej regulowanej przeciągnięciem

Załącznik G: Podsumowanie badań laboratoryjnych na zwierzętach dotyczących wpływu infradźwięków i dźwięków niskiej częstotliwości (IFLN)

Odniesienia

Bibliografia

Wykaz tabel

- 1: Źródła dźwięków aerodynamicznych w turbinach wiatrowych
- 2: Dane turbin wiatrowych według literatury
- 3: Opis trzech kategorii najlepszych praktyk
- 4: Dopuszczalne poziomy ciśnienia akustycznego w zależności od rodzaju otoczenia

Zadania panelu

Departament Ochrony Środowiska Stanu Massachusetts (MassDEP) oraz Departament Zdrowia Publicznego Stanu Massachusetts (MDPH) postawiły przed panelem specjalistów następujące zadania:

1. Zidentyfikowanie i scharakteryzowanie cech przedmiotowych (takich jak hałas, infradźwięki, wibracje i migotanie cieni) oraz ustalenie wszelkich udokumentowanych naukowo, bądź potencjalnych zależności w zakresie wpływu na zdrowie związanego z turbinami wiatrowymi umieszczonymi na lądzie lub na morzu w strefie przybrzeżnej, które mogą oddziaływać na receptory ludzi na lądzie.
2. Oszacowanie i omówienie informacji ze studiów naukowych, innych sprawozdań, mediów oraz uwag społecznych otrzymanych przez MassDEP i/lub informacji zawartych w *Monitorze Informacji Środowiskowych* i/lub informacji przekazanych przez MDPH na temat rodzaju i charakteru skarg związanych ze zdrowiem, zgłaszanych przez osoby mieszkające w pobliżu istniejących farm wiatrowych.
3. Oszacowanie na podstawie istniejących danych rozmiaru i częstotliwości wszelkich potencjalnych oddziaływań i zagrożeń dla zdrowia ludzkiego związanych z projektowaniem i działaniem turbin wiatrowych.
4. Ustalenie udokumentowanych najlepszych praktyk, mogących zmniejszyć potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego w rozważanym zakresie. Włączenie przykładów takich najlepszych praktyk (projektowanie, działanie, konserwacja i zarządzanie według materiałów opublikowanych). Najlepsze praktyki mogą być wykorzystane informacyjnie, przy podejmowaniu decyzji urzędowych dotyczących lokalizacji turbin przez władze stanowe, miejscowe lub regionalne.
5. Przygotowanie, w ciągu 3 miesięcy od przeprowadzenia analizy, raportu podsumowującego wyniki prac.

Aby wykonać postawione przed nim zadania, Panel przeprowadzi przegląd literatury i trzy razy spotka się całym zespołem. Dodatkowo, członkowie Panelu będą porozumiewali się telefonicznie dla dokładnego wyjaśniania omawianych zagadnień.

Streszczenie

Departament Ochrony Środowiska Stanu Massachusetts (MassDEP), we współpracy z Departamentem Zdrowia Publicznego Stanu Massachusetts (MDPH), powołały panel niezależnych specjalistów, którego celem było zidentyfikowanie wszelkich udokumentowanych lub potencjalnych zagrożeń zdrowotnych, mających potencjalny związek z wystawieniem na oddziaływanie turbin wiatrowych oraz wywołanie opartej o naukowe podstawy dyskusji o turbinach wiatrowych i ludzkim zdrowiu.

Podczas gdy stan Massachusetts przewiduje zwiększenie stopnia wykorzystania energii wiatru z obecnych 40 MW do 2000 MW do roku 2020, MassDEP sygnalizuje, że istnieją wątpliwości związane z wykorzystaniem energii wiatrowej. Zainteresowanie Panelu skupiło się na zagrożeniach dla zdrowia stwarzanych przez turbiny wiatrowe *jako takie*. Do zadań Panelu *nie* należało rozpatrywanie potencjalnych korzyści płynących z ograniczenia niepożądanych skutków oddziaływania innych źródeł energii, takich jak węgiel, olej, gaz ziemny, w wyniku przestawienia na energię z turbin wiatrowych.

Obecnie „przepisy” dotyczące turbin wiatrowych są ustalane na poziomie lokalnym przez miejscowe wydziały zdrowia i wydziały budownictwa. Czasami podnoszony jest także problem możliwego oddziaływania turbin wiatrowych na zdrowie ze względu na hałas, infradźwięki, wibracje lub migotanie cieni powodowane przez turbiny. Celem prac i raportu Panelu jest dokonanie przeglądu prac naukowców zajmujących się tym tematem i przedstawienie użytecznych informacji dla MassDEP i MDPH oraz dla lokalnych agencji, które często muszą zajmować stanowisko w tych sprawach. Panel składa się z siedmiu osób, posiadających doświadczenie w dziedzinie zdrowia publicznego, epidemiologii, toksykologii, neurologii i leczenia zaburzeń snu, leczenia nerwic oraz inżynierii mechanicznej. Wszyscy członkowie Panelu są niezależnymi specjalistami z instytucji akademickich.

W trakcie prac Panel przeprowadzał intensywny przegląd literatury naukowej, jak również innych sprawozdań, mediów oraz uwag otrzymanych przez MassDEP.

ES 1. Zadania Panelu

1. Zidentyfikowanie i scharakteryzowanie cech przedmiotowych (takich jak hałas, infradźwięki, wibracje i migotanie cieni) oraz ustalenie wszelkich udokumentowanych naukowo, bądź potencjalnych zależności w zakresie wpływu na zdrowie związanego z turbinami wiatrowymi umieszczonymi na lądzie lub na morzu w strefie przybrzeżnej, które mogą oddziaływać na receptory ludzi na lądzie.
2. Oszacowanie i omówienie informacji ze studiów naukowych, innych sprawozdań, mediów oraz uwag społecznych otrzymanych przez MassDEP i/lub informacji zawartych w *Monitorze Informacji Środowiskowych* i/lub informacji przekazanych przez MDPH na temat rodzaju i charakteru skarg związanych ze zdrowiem, zgłaszanych przez osoby mieszkające w pobliżu istniejących farm wiatrowych.
3. Oszacowanie na podstawie istniejących danych rozmiaru i częstotliwości wszelkich potencjalnych oddziaływań i zagrożeń dla zdrowia ludzkiego związanych z projektowaniem i działaniem turbin wiatrowych.
4. Ustalenie udokumentowanych najlepszych praktyk, mogących zmniejszyć potencjalne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego w rozważanym zakresie. Włączenie przykładów takich najlepszych praktyk (projektowanie, działanie, konserwacja i zarządzanie według materiałów opublikowanych). Najlepsze praktyki mogą być wykorzystane informacyjnie, przy podejmowaniu decyzji urzędowych dotyczących lokalizacji turbin przez władze stanowe, miejscowe lub regionalne.
5. Przygotowanie, w ciągu 3 miesięcy od przeprowadzenia analizy, raportu podsumowującego wyniki prac.

ES 2. Metody działania

Aby wykonać swoje zadania Panel przeprowadził obszerne badania literatury oraz trzykrotnie odbył spotkania w pełnym składzie. Dodatkowo członkowie Panelu telefonicznie uzgadniali poszczególne omawiane problemy. Rozważania Panelu były wspierane przez niezależnego asystenta. Każdy z członków Panelu otrzymał pisemny tekst przeglądu literatury i analiz. Każdy z członków Panelu miał również wgląd do roboczej wersji raportu, a końcowy tekst raportu oraz zawarte w nim wnioski zostały przez wszystkich uzgodnione i zaakceptowane.

ES 3. Wstęp do raportu i opis

Wiele krajów traktuje siłę wiatru jako źródło czystej energii, gdyż wiatr jest energią odnawialną; powstaje „lokalnie”, zapewnia niezależność energetyczną oraz nie emituje

dwutlenku węgla. Wykorzystanie energii wiatru na lądzie i na morzu nie się wiele korzyści. Ten raport skupia się wyłącznie na instalacjach lądowych i wszystkie uwagi są odniesione do tej technologii. Turbiny wiatrowe na lądzie mają obecnie moc w zakresie od 100 kW do 3 MW (3000 kW). Największa turbina pracująca aktualnie w Massachusetts ma moc 1,8 MW.

Rozwój współczesnych turbin wiatrowych jest procesem ewolucyjnym, wprowadzającym optymalizację na wielu poziomach. Przegląd charakterystyk turbin wiatrowych, hałasu i wibracji znajduje się w Rozdziale 2 niniejszego raportu. Wyniki pomiarów akustycznych i sejsmicznych hałasu i wibracji z turbin wiatrowych dają możliwość porównania z wynikami studiów epidemiologicznych i skargami złożonymi w związku z pracą turbin wiatrowych. W załącznikach przedstawiono szczegółowe opisy i równania pozwalające na głębsze zrozumienie energii wiatrowej, budowy turbin, aerodynamiki turbin, instalowania, produkcji energii, migotania cieni, miotania lodu, hałasu turbiny wiatrowej, rozchodzenia się hałasu, infradźwięków oraz porównania turbin sterowanych regulacją kąta lub „przeciągnięciem”.

Obszerne badanie literatury doprowadziło do ustalenia studiów poświęconych reakcjom ludzi na turbiny, jak również reakcjom społecznym i indywidualnym na trzy główne cechy charakterystyczne działania turbin wiatrowych: hałas, wibracje i migotanie. Szczególny nacisk w pracach Panelu położono na zbadanie biologicznego prawdopodobieństwa lub podstaw dla skutków zdrowotnych wywoływanych przez turbiny (hałas, wibracje, migotanie). Oprócz tradycyjnych form publikacji naukowych, Panel przeanalizował z dużą uwagą również inne materiały dotyczące potencjalnego wpływu na zdrowie, łącznie z informacjami odnoszącymi się do „Syndromu Turbin Wiatrowych” oraz sprawdził, czy istnieją jego naukowe podstawy. Ludzie mieszkających w pobliżu turbin najczęściej skarżą się na zakłócenia snu, dlatego Panel przeprowadził wnikliwe badanie zależności pomiędzy hałasem, wibracjami i niedogodnościami a zaburzeniami snu przez hałas, oraz potencjalnymi skutkami wynikającymi z bezsenności.

Szacując stan dowodów na występowanie skutków zdrowotnych wywołanych pracą turbin wiatrowych, Panel postępował według akceptowanych zasad naukowych i stosował różne typy studiów. Badania przeprowadzone na ludziach uznano za najważniejsze. Były to badania epidemiologiczne powiązane z oddziaływaniem turbin wiatrowych, oraz – w zdefiniowanych przypadkach konkretnego narażenia na oddziaływanie turbin – dane doświadczalne. Badania nad zwierzętami są bardzo pomocne w badaniu biologicznego prawdopodobieństwa i w zrozumieniu potencjalnych mechanizmów biologicznych różnych oddziaływań, a także w dostarczaniu informacji o możliwych skutkach zdrowotnych w przypadkach, gdy doświadczenia na ludziach są

nieetyczne lub praktycznie niemożliwe do przeprowadzenia. Takie artykuły były również analizowane pod kątem skutków oddziaływania turbin wiatrowych. Materiały nienaukowe dostarczały dowodów niższej kategorii. We wszystkich przypadkach brano pod uwagę jakość danych; niektóre badania zostały odrzucone z powodu braku wskazania metody badawczej lub niespójności interpretacji z dowodami naukowymi.

ES 4. Wyniki

Powtórzone tutaj wyniki podane w Rozdziale 4.

Opierając się na szczegółowym przeglądzie literatury naukowej i innych dostępnych sprawozdaniach oraz uwzględniając silne dowody naukowe, Panel prezentuje wyniki odnoszące się do trzech czynników związanych z działaniem turbin wiatrowych: hałasu i wibracji, migotania cieni oraz miotania lodu. Poniżej są szczegółowo podane wyniki dla każdego z tych trzech czynników.

ES 4.1 Hałas

ES 4.1.a Wytwarzanie hałasu i wibracji przez turbiny wiatrowe

1. Turbiny wiatrowe mogą wytwarzać podczas pracy niepożądane dźwięki (opisane jako hałas). Rodzaj dźwięku zależy od konstrukcji turbiny wiatrowej. Rozchodzenie się dźwięku jest głównie funkcją odległości, ale może również być zależne od umiejscowienia turbiny, otaczającego terenu i warunków atmosferycznych.
 - a. Turbiny pracujące z wiatrem bądź pod wiatr mają różne charakterystyki akustyczne, głównie z powodu interakcji łopat ze strefami zredukowanej prędkości wiatru za wieżą w przypadku turbiny pracującej z wiatrem.
 - b. Wpływ prędkości wiatru na generowany hałas jest różny dla turbin regulowanych „przeciągnięciem” oraz regulowanych zmianą kąta łopat.
 - c. Na rozchodzenie się dźwięku ma wpływ załamywanie się dźwięku z powodu gradientu temperatury, odbić od zboczy wzgórz i absorpcji atmosferycznej. Różny sposób rozchodzenia dźwięku powoduje różnice w odbieraniu hałasu przez sąsiadów.
 - d. Słyszalny hałas o modulowanej amplitudzie z turbiny wiatrowej („świsł”) jest odbierany jako bardziej intensywny w nocy (i czasami staje się bardziej „uderzający”) z wielu względów: i) stabilna atmosfera ma większy gradient wiatru, ii) stabilna atmosfera może załamywać dźwięk w dół, zamiast do góry, iii) blisko ziemi hałas otoczenia jest niższy, ze względu na stabilną atmosferę i ze

względem na fakt, że poziom hałasu generowanego przez ludzi często jest niższy nocą.

2. Poziom mocy akustycznej współczesnej typowej turbiny wiatrowej normalnej wielkości jest na poziomie 103 dB(A), ale czasem może być nieco wyższy lub niższy zależnie od konstrukcji i mocy znamionowej turbiny. Słyszalność dźwięku szybko spada wraz z odległością od turbiny. Typowo w odległości większej niż 400 m, poziom mocy akustycznej współczesnej turbiny wiatrowej jest mniejszy niż 40 dB(A), a więc poniżej poziomu uznanego za dokuczliwy poziom hałasu według badań epidemiologicznych.
3. Infradźwięki odnoszą się do wibracji o częstotliwości poniżej 20 Hz. Infradźwięki o amplitudzie ponad 100-110 dB mogą być słyszalne i odczuwalne. Badania wykazały, że wibracje poniżej tej amplitudy nie są odczuwane. Najwyższy poziom infradźwięków zmierzony w pobliżu turbiny, w odległości do 100 m od niej i odnotowany w literaturze wynosi poniżej 90 dB przy 5 Hz i mniej przy wyższych częstotliwościach.
4. Infradźwięki z turbin wiatrowych nie są powiązane, ani nie powodują “ciągłego świszczania”.
5. Fale ciśnienia przy każdej częstotliwości (słyszalnej lub infradźwiękowej) mogą powodować wibracje innej struktury lub substancji. Aby wystąpiły wibracje, amplituda (wysokość) fali musi być wystarczająco wysoka, a w wibracje będą wpadały tylko struktury lub substancje mające zdolność do odbierania fal (częstotliwość rezonansowa).

ES 4.1.b Wpływ hałasu i wibracji na zdrowie

1. Większość literatury epidemiologicznej o reakcjach ludzi na turbiny wiatrowe odnosi się do zgłaszanych „uciążliwości”, i te reakcje wydają się być funkcją pewnej kombinacji samego hałasu, widoku turbiny i stosunku do idei turbiny wiatrowej.
 - a. Istnieje ograniczona liczba dowodów epidemiologicznych sugerujących związek pomiędzy wystawieniem na oddziaływanie turbin wiatrowych a uciążliwościami.
 - b. Brak wystarczającej ilości dowodów epidemiologicznych dla stwierdzenia, czy istnieje związek pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a uciążliwościami niezależnymi od skutków widoku turbin wiatrowych i odwrotnie.
2. Istnieje ograniczona liczba dowodów epidemiologicznych sugerujących związek pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a zakłóceniami snu. Innymi słowy jest możliwe, że dźwięk turbin wiatrowych może powodować zakłócenia snu.
3. Bardzo głośne turbiny wiatrowe mogą powodować zakłócenia snu, szczególnie wśród

osób wrażliwych, znajdujących się w pewnej odległości, natomiast bardzo ciche turbiny nie powinny budzić nawet najlżej śpiących osób znajdujących się w tej samej odległości. Nie ma jednak dość dowodów do ustalenia dokładnego progu ciśnienia akustycznego, przy którym turbiny wiatrowe powodują zakłócenia snu. Dalsze badania winny ustalić ten poziom.

4. Nie zbadano wystarczająco, czy uciążliwości wywołane przez turbiny wiatrowe mogą prowadzić do problemów ze snem lub wywoływać stres. Udowodniono, że zakłócenia snu mogą negatywnie wpływać na nastrój, funkcje poznawcze oraz ogólne poczucie zdrowia i dobre samopoczucie, jednak ustalenie to nie jest związane z badaniami nad turbinami wiatrowymi.
5. Nie ma wystarczających dowodów na to, że hałas turbin wiatrowych *bezpośrednio* (czyli *niezależnie od skutków uciążliwości lub snu*) powoduje problemy zdrowotne lub choroby.
6. Twierdzenia, że infradźwięki z turbin wiatrowych bezpośrednio oddziałują na zmysł równowagi nie zostały naukowo potwierdzone. Dostępne dowody wskazują na to, że poziom infradźwięków w pobliżu turbin nie może wpływać na zmysł równowagi.
 - a. Zmierzony poziom infradźwięków wytwarzanych przez współczesne turbiny wiatrowe pracujące pod wiatr w odległości 68 m jest znacznie poniżej poziomu wyczuwalnego odbierania (odczuwanie wibracji części ciała, ucisk w klatce piersiowej itp.).
 - b. Jeżeli infradźwięki sprzęgną się z konstrukcją, ludzie wewnątrz konstrukcji będą odczuwać wibracje. Sprawdzono, że takie wibracje prowadzą do odczuwania niepokoju i ogólnego rozdrażnienia. Pomiarów nie wykazały dowodów na występowanie takich sprzężeń we współczesnych turbinach pracujących pod wiatr.
 - c. Pomiarów sejsmicznych (przenoszonych przez ziemię) w pobliżu turbin wiatrowych i farm wiatrowych nie powinny wnikać w struktury.
 - d. Przedstawiono potencjalny mechanizm sprzęgnięcia pomiędzy infradźwiękami i zmysłem równowagi (poprzez komórki rzęsaty zewnętrzne w uchu wewnętrznym), ale nie jest on jeszcze w pełni zrozumiany ani wystarczająco wyjaśniony. Poziom infradźwięków w pobliżu turbin wiatrowych jest wystarczający, aby był odczuwalny przez komórki rzęsaty. Jednakże nie istnieją dowody na wykazanie wpływu infradźwięków generowanych przez turbinę wiatrową na ośrodek równowagi w mózgu.
 - e. Nieliczne dowody z badań laboratoryjnych gryzoni (szczurów) pokazują krótkotrwałe

- zmiany biochemiczne w komórkach układu krążenia i mózgu w odpowiedzi na krótkotrwałe narażenie na emisję 16 Hz i 130 dB. Te poziomy przekraczają o ponad 35 dB zmierzony poziom infradźwięków współczesnych turbin.
7. Nie ma dowodów na zespół objawów zdrowotnych powodowanych oddziaływaniem turbin wiatrowych nazywanych “syndromem turbin wiatrowych”.
 8. Najpełniejsze badanie epidemiologiczne sugeruje brak związku pomiędzy hałasem generowanym przez turbiny wiatrowe a dyskomfortem psychicznym lub problemami zdrowia psychicznego. Przeanalizowano także dwa pomniejsze i słabsze badania: jedno stwierdziło istnienie takiego związku, a drugie nie. Dlatego też wnioskujemy, że dowody wskazują na brak związku pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a dyskomfortem psychicznym lub problemami zdrowia psychicznego.
 9. Żaden z analizowanych dowodów epidemiologicznych nie sugeruje związku pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a bólem i uczuciem sztywności, cukrzycą, nadciśnieniem, szumem w uszach, zaburzeniami słuchu, chorobami sercowo-naczyniowymi oraz bólem głowy/migreną.

ES 4.2 Migotanie cieni

ES 4.2.a Powstawanie migotania cieni

Migotanie cienia wynika z przechodzenia obracających się łopat turbiny wiatrowej pomiędzy słońcem a obserwatorem.

1. Występowanie migotania cieni zależy od pozycji obserwatora w stosunku do turbiny oraz czasu dnia i pory roku.
2. Częstotliwość migotania cieni wywoływanego przez turbinę jest proporcjonalna do prędkości obrotowej wirnika i liczby łopat, dla typowej dużej turbiny wynosi od 0,5 do 1,1 Hz.
3. Migotanie cieni jest widoczne tylko w odległościach mniejszych niż 1400 m od turbiny.

ES 4.2.b Wpływ migotania cieni na zdrowie

1. Dowody naukowe wskazują, że migotanie cieni nie powoduje zagrożenia wywołania napadów w wyniku stymulacji światłem.
2. Istnieją nieliczne dowody naukowe na związek pomiędzy rozdrażnieniem na skutek dłuższego narażenia na migotanie cienia (przekraczającego 30 minut w ciągu dnia) a potencjalnymi przejściowymi skutkami dla ogólnego stanu zdrowia i postrzegania.

ES 4.3 Miotanie lodem

ES 4.3.a Przyczyny miotania lodem

Lód może spadać lub być zrzucany z turbiny wiatrowej w trakcie lub po wystąpieniu zjawiska formowania się lub kumulowania lodu na łopatach.

1. Odległość, na jaką kawałek lodu może być wyrzucony przez turbinę, zależy od prędkości wiatru, warunków pracy oraz kształtu lodu.
2. W większości przypadków lód spada w odległości od turbiny równej wysokości wieży, a w rzadkich przypadkach ta odległość przekracza dwukrotność całkowitej wysokości turbiny (wieża plus długość łopaty).

ES 4.3.b Wpływ miotania lodem na zdrowie

1. Istnieją wystarczające dowody, że spadający lód stanowi zagrożenie fizyczne i należy podjąć kroki zabezpieczające ludzi przed takim zdarzeniem.

ES 4.4 Inne rozpatrywane kwestie

Oprócz ustaleń opisanych powyżej dotyczących hałasu i wibracji, migotania cieni oraz miotania lodu, Panel przedstawia następujący wniosek:

1. Efektywny udział społeczeństwa oraz bezpośrednie korzyści z projektu energii wiatrowej (takie jak pozyskiwanie energii z sąsiadujących turbin wiatrowych) powodują ogólnie mniejsze rozdrażnienie oraz większą akceptację społeczną.

ES 5. Najlepsze praktyki dotyczące wpływu turbin wiatrowych na zdrowie

Powtórzone tutaj najlepsze praktyki przedstawione w Rozdziale 5.

Ogólnie mówiąc termin “najlepsza praktyka” odnosi się do polityki, wytycznych lub zaleceń opracowanych dla konkretnej sytuacji. Termin ten oznacza, że praktyka jest oparta na najlepszej informacji dostępnej w czasie jej tworzenia. Najlepsza praktyka może być ulepszona na skutek dostępu do nowych informacji i badań. Panel uznał, że najlepsze praktyki są rozwijane i wdrażane w krajach, które są zależne od energii wiatrowej i chronią zdrowie obywateli.

W niektórych przypadkach waga wyników badań dla konkretnej praktyki jest większa, niż w innych. Odpowiednio najlepsze praktyki* mogą być podzielone na kategorie według dostępnych źródeł, jak niżej:

Opis trzech kategorii najlepszych praktyk:

Kategoria	Nazwa	Opis
1	Najlepsza praktyka poparta badaniami naukowymi	Program, działanie lub strategia mające najwyższy stopień skuteczności, wsparte obiektywnymi i wyczerpującymi badaniami i opracowaniami.
2	Najlepsza praktyka poparta testami	Skuteczny program, działanie lub strategia, wykazujące prawidłowe wyniki, w pewnym stopniu wsparte przez subiektywne oraz obiektywne źródła danych.
3	Obiecująca najlepsza praktyka	Program, działanie lub strategia skuteczne w obrębie jednej organizacji, które może stać się ogólną najlepszą praktyką. Obiecująca najlepsza praktyka musi mieć jakieś podstawy obiektywne dla stwierdzenia jej skuteczności oraz musi być możliwa do wdrożenia w innych organizacjach.

**Podział na kategorie oparto na sugestiiach zawartych w "Identifying and Promoting Promising Practices." Federal Register, Vol. 68, No 131, 131. lipiec 2003.*

www.acf.hhs.gov/programs/ccf/about_ccf/gbk_pdf/pp_gbk.pdf

ES 5.1 Hałas

Dowody wskazujące na istnienie wpływu hałasu turbin wiatrowych na zdrowie ludzi są nieliczne. Istnieje ograniczona liczba dowodów na związek pomiędzy hałasem z turbiny wiatrowej a rozdrażnieniem i zakłóceniami snu, w zależności od poziomu ciśnienia akustycznego i położenia. Jednakże nie ma badań poziomu ciśnienia akustycznego odpowiadającego odczuwaniu hałasu przez ludzi. Kraje mające większe doświadczenie z energią wiatrową i prowadzące politykę ochrony zdrowia opracowały wytyczne dla minimalizowania możliwych negatywnych skutków hałasu. Te wytyczne uwzględniają porę dnia, przeznaczenie terenu oraz prędkość wiatru. Tabela 4 poniżej podsumowuje wytyczne niemieckie (w kategoriach terenów przemysłowych, handlowych i mieszkalnych) oraz duńskie (w kategoriach zabudowy rzadkiej i mieszkalnej). W tabeli podano poziom hałasu dla pory nocnej i jest rozumiany jako określany w bezpośredniej bliskości domków lub zabudowań. Dodatkowo WHO (Światowa Organizacja Zdrowia) zaleca dla terenów mieszkalnych w porze nocnej maksymalny poziom ciśnienia akustycznego 40 dB(A). Zalecane ograniczenia odpowiadające tym wartościom mogą być obliczone w programach takich jak WindPro lub podobnych. Takie obliczenia są normalnie wykonywane w ramach studiów wykonalności. Panel określił wytyczne pokazane poniżej jako Obiecujące Najlepsze Praktyki (Kategoria 3), niosące w sobie element Najlepszych praktyk

popartych testami (Kategoria 2).

Obiecująca Najlepsza Praktyka dla poziomu głośności w nocy w zależności od przeznaczenia terenu

Przeznaczenie terenu	Poziom głośności, dB(A) Limit w nocy
Przemysłowy	70
Handlowy	50
Tereny wiejskie, użytkowanie mieszane	45
Tereny rzadko zaludnione, wiatr 8 m/s*	44
Tereny rzadko zaludnione, wiatr 6 m/s*	42
Tereny mieszkalne, wiatr 8 m/s*	39
Tereny mieszkalne, wiatr 6 m/s*	37

**mierzony 10 m nad poziomem gruntu, na zewnątrz budynku lub zabudowań*

Okres czasu, przez który są mierzone lub obliczane te limity hałasu również jest różny. Dla przykładu, często cytowana Światowa Organizacja Zdrowia zaleca poziom hałasu w nocy 40 dB(A) jako wartość średnioroczną (i nie podaje specjalnych danych dla turbin). Duńskie limity hałasu w powyższej tabeli są obliczane dla okresu 10 minut. Te limity są zgodne z poziomami hałasu, które badania epidemiologiczne łączą z mało istotnymi zgłoszeniami rozdrażnienia.

Panel rekomenduje włączenie limitów hałasu takich, jak podane w tabeli, jako części stanowej polityki dotyczącej budowy nowych turbin wiatrowych. Dodatkowo należy przewidzieć odpowiednie zakresy i procedury dla przypadków, w których poziom hałasu może przekraczać te wartości. W pracach należy wziąć pod uwagę zyski i straty wynikające z oddziaływania na zdrowie i środowisko różnych źródeł energii, państwowe i stanowe cele niezależności energetycznej, potencjalny zasięg oddziaływania itp.

Panel rekomenduje również, aby jednostki odpowiedzialne za zakup turbin wiatrowych zapoznawały się ze specyfikacjami głośności turbin i czynnikami wywołującymi oraz kontrolującymi poziom hałasu. Turbiny regulowane przez zmianę kąta ustawienia łopat i regulowane przez „przeciągnięcie” mają różne charakterystyki hałasu, szczególnie przy dużych prędkościach wiatru. Dla określonych turbin jest możliwe obniżanie hałasu w nocy poprzez odpowiednie środki regulacyjne (np. zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika). Jeżeli rozważane

są środki kontroli poziomu hałasu, producent turbiny wiatrowej wykazać, że taka kontrola i regulacja jest możliwa.

Panel rekomenduje ciągły program monitorowania i badania dźwięku wydawanego przez turbiny wiatrowe zainstalowane na terenie stanu. Norma IEC 61400-11 zapewnia wytyczne dla pomiaru hałasu z turbin wiatrowych (International Electrotechnical Commission, 2002). Ogólnie, Panel zaleca bardziej szczegółowe szacowanie hałasu z turbin wiatrowych na terenach zamieszkałych. Opracowania winny być wykonywane z uwzględnieniem prowadzonych nieustannie międzynarodowych badań nad hałasem z turbin wiatrowych i jego skutkami. Takie oszacowania mogą być przydatne dla uaktualniania wytycznych lokalizacyjnych i dla podnoszenia najlepszych praktyk do wyższej kategorii. Zalecane jest przeprowadzenie dokładnych badań obok domów, gdzie różnice między skorygowanymi korektą A i C wynikami pomiarów zewnętrznych przekraczają 15 dB.

ES 5.2 Migotanie cieni

Opierając się na wynikach badań naukowych oraz doświadczeniach terenowych związanych z migotaniem cienia, w Niemczech wprowadzono wytyczne obejmujące poniższe:

1. Migotanie cieni winno być obliczane dla maksymalnych wartości astronomicznych (tzn. nie biorąc pod uwagę zachmurzenia itp.).
2. Do obliczeń można wykorzystywać dostępne w sprzedaży oprogramowanie takie jak WindPro lub podobne. Takie obliczenia winny stanowić część studium wykonalności dla nowych turbin wiatrowych.
3. Migotanie cienia nie może występować częściej, niż 30 minut na dzień i nie więcej, niż 30 godzin w ciągu roku w badanym miejscu (np. domy mieszkalne).
4. Migotanie cienia może być utrzymywane na akceptowalnym poziomie przez odsunięcie lub regulację turbiny wiatrowej. W tym drugim przypadku producent turbiny wiatrowej musi wykazać, że taka regulacja jest możliwa.

Wytyczne przedstawione powyżej mogą być uwzględnione jako najlepsza praktyka poparta testami (Kategoria 2). Można wykonać także dodatkowe badania, dotyczące w szczególności liczby godzin na rok, przez które może być dopuszczone migotanie cieni, aby można było włączyć je do najlepszej praktyki uznanych metod badawczych (Kategoria 1).

ES 5.3 Miotanie lodem

Lód spadający z turbiny wiatrowej może spowodować zagrożenie dla ludzkiego zdrowia. Jest

również oczywiste, że zagrożenie jest ograniczone do okresu gdy następuje oblodzenie oraz do bezpośredniego otoczenia turbiny wiatrowej. W związku z tym, za najlepsze praktyki kategorii 1 można uznać:

1. Na obszarach, gdzie możliwe jest wystąpienie oblodzenia, muszą być ustawione znaki zabraniające przechodzenia pod turbiną wiatrową w razie oblodzenia, aż do zsunięcia się lodu.
2. Praca i przebywanie w sąsiedztwie turbiny wiatrowej musi być zakazana w czasie oraz bezpośrednio po wystąpieniu oblodzenia, uwzględniając następujące dwa ograniczenia (w metrach).

W przypadku turbin nie mających środków zapobiegających oblodzeniu, można przyjąć, że spadanie lodu jest ograniczone do następującego obszaru:

$$x_{\max, rzut} = 1.5 \sqrt{2R^2 + H^2}$$

gdzie: R = średnica wirnika (m), H = wysokość osi wirnika (m)

Dla lodu spadającego z zatrzymanej turbiny, winna być użyta poniższa granica:

$$x_{\max, opad} = U R + H / 15$$

gdzie: U = maksymalna prawdopodobna prędkość wiatru (m/s)

Maksymalna prawdopodobna prędkość wiatru winna być ustalona na podstawie wartości maksymalnych z ostatniego roku, wyznaczona zgodnie z normą projektowania turbin wiatrowych IEC 61400-11.

Niebezpieczeństwo ze strony spadającego lodu może być również ograniczone przez środki zapobiegające oblodzeniu. Jeżeli te środki zostały uwzględnione, producent turbiny wiatrowej musi być zdolny do zademonstrowania, że te środki są możliwe.

ES 5.4 Konsultacje społeczne a rozdrażnienie

Istnieją pewne dowody na związek pomiędzy udziałem ekonomicznym lub innym w projekcie turbiny wiatrowej a odczuwaniem (lub nie odczuwaniem) rozdrażnienia przez poszczególne osoby. Poziom niezadowolenia można zatem zmniejszyć podejmując środki zmierzające do bezpośredniego zaangażowania mieszkańców w bliskim otoczeniu projektowanej turbiny wiatrowej. Podejmowanie takich środków można uznać za Obiecującą najlepszą praktykę (Kategoria 3).

ES 5.5 Przepisy / Zachęty / Edukacja społeczna

Dowody wskazują, że w tych częściach świata, w których znajduje się znaczna liczba turbin wiatrowych względnie blisko domów mieszkalnych, istnieje ścisły związek pomiędzy opracowywaniem wytycznych, wprowadzaniem systemu zachęt i edukacją społeczną. Panel sugeruje, aby angażować społeczności lokalne poprzez takie strategie, jak edukacja, zachęty dla farm wiatrowych należących do wspólnot lokalnych, kompensaty za udokumentowane spadki wartości nieruchomości, wyczerpujące analizy wytycznych oraz edukacja społeczna dotycząca energii odnawialnej. To wielowątkowe podejście może być uznane za Obiecującą najlepszą Praktykę (Kategoria 3).

Rozdział 1

Wstęp do raportu

Departament Ochrony Środowiska Stanu Massachusetts (MassDEP), we współpracy z Departamentem Zdrowia Publicznego Stanu Massachusetts (MDPH), powołały panel niezależnych specjalistów, którego celem było zidentyfikowanie wszelkich udokumentowanych lub potencjalnych zagrożeń zdrowotnych, mających potencjalny związek z wystawieniem na oddziaływanie turbin wiatrowych oraz wywołanie opartej o naukowe podstawy dyskusji o turbinach wiatrowych i ludzkim zdrowiu. Podczas gdy stan Massachusetts przewiduje zwiększenie stopnia wykorzystania energii wiatru z obecnych 40 MW do 2000 MW do roku 2020, MassDEP sygnalizuje, że istnieją wątpliwości związane z wykorzystaniem energii wiatrowej. Wprawdzie paliwa mineralne ze źródeł nieodnawialnych mają negatywne skutki dla środowiska i dla zdrowia, to jednak należy pamiętać, że zakres prac Panelu koncentruje się na turbinach wiatrowych i nie ma na celu przeprowadzenia analizy porównawczej zalet energii wiatrowej w stosunku do nieodnawialnych źródeł paliw kopalnych, takich jak węgiel, olej lub gaz ziemny. Obecnie “przepisy” dotyczące turbin wiatrowych są ustalane na poziomie lokalnym przez miejscowe wydziały zdrowia i wydziały urbanistyczne. Niektórzy podnoszą problem możliwego oddziaływania turbin wiatrowych na zdrowie ze względu na hałas, infradźwięki, wibracje lub migotanie cieni powodowane przez turbiny. Celem prac i sprawozdania Panelu jest dokonanie przeglądu prac naukowych poświęconych tej tematyce i przedstawienie informacji użytecznych dla MassDEP i MDPH oraz dla lokalnych agencji, które często muszą zajmować stanowisko w tych kwestiach.

Niniejsze opracowanie zakłada, że stosowanie turbin wiatrowych niesie pozytywne skutki dla zdrowia publicznego i stanu środowiska. Dla przykładu, turbiny wiatrowe pracujące w Massachusetts produkują energię elektryczną w ilości około 2.100 – 2.900 MWh rocznie, o mocach znamionowych w MW, zależnych od konstrukcji turbiny i przeciętnej prędkości wiatru w miejscu zainstalowania. Co więcej, zastosowanie turbin wiatrowych do produkcji energii elektrycznej w sieci elektrycznej Nowej Anglii spowoduje istotny spadek konsumpcji paliw konwencjonalnych i odpowiedni spadek emisji CO₂ oraz tlenków azotu i siarki (szczegóły podano w Załączniku A). Redukcja emisji tych zanieczyszczeń będzie widoczną i pozytywną korzyścią dla zdrowia ludzi i stanu środowiska. Jednakże miejscowe oddziaływanie turbin wiatrowych, spodziewane i rzeczywiste, powoduje, że buduje się mniej turbin niż potencjalnie można w innych warunkach. Gdyby zakres niekorzystnych oddziaływań został zmniejszony, można by bardziej efektywnie wykorzystać miejscowe źródła energii wiatrowej.

Panel składa się z siedmiu osób, posiadających doświadczenie w dziedzinie zdrowia publicznego, epidemiologii, toksykologii, neurologii i leczenia zaburzeń snu, leczenia nerwic oraz inżynierii mechanicznej. Za wyjątkiem dwóch osób (dr Manwell i dr Mills), członkowie Panelu nie mają żadnych bezpośrednich doświadczeń z turbinami wiatrowymi. Panel wykonał obszerny przegląd literatury naukowej (patrz bibliografia), jak również innych opracowań, danych dostępnych w mediach oraz uwag społeczności lokalnych otrzymanych przez MassDEP.

Rozdział 2

Wprowadzenie do tematyki turbin wiatrowych

Ten rozdział przedstawia podstawowe informacje o turbinach wiatrowych, zapewniając kontekst dla dalszej dyskusji. Więcej informacji o turbinach wiatrowych można znaleźć w załącznikach, szczególnie w Załączniku A.

2.1 Budowa i działanie turbin wiatrowych

Turbiny wiatrowe wykorzystują wiatr, który powstaje na skutek różnic w nagrzewaniu różnych części ziemi przez promieniowanie słoneczne. Różnice w poziomie nagrzewania powodują powstawanie stref o niskim i wysokim ciśnieniu, powodując ruch mas powietrza. Ruch mas powietrza jest również skutkiem ruchu obrotowego ziemi. Wiele krajów zainteresowało się siłą wiatru, jako źródłem czystej energii, odnawialnej bez ograniczeń. Energia wiatrowa pozyskiwana jest „lokalnie” i do pewnego stopnia zapewnia niezależność energetyczną, a dodatkowo nie stanowi źródła emisji dwutlenku węgla. Z tych przyczyn farmy wiatrowe powstają zarówno na lądzie, jak i na morzu. Niniejszy raport koncentruje się na instalacjach lądowych i wszystkie komentarze odnoszą się do tej technologii.

Rzeczony współczesnych turbin wiatrowych przebiegał jako proces ewolucyjnego doskonalenia i wielopoziomowej optymalizacji. Ten rozdział stanowi krótki przegląd charakterystyk turbin wiatrowych i zawiera kilka uwag dotyczących optymalizacji wybranych parametrów. Załącznik A zawiera szczegółowe wyjaśnienia dotyczące energii wiatrowej.

Współczesne turbiny wiatrowe to najczęściej bardzo wysokie wieże, które nie są konstrukcjami kratownicowymi, ale konstrukcjami podobnymi do cylindrów, zwieńczonymi trzema skierowanymi pod wiatr, mocno wyprofilowanymi, długimi łopatkami. Konstrukcja wież ewoluowała ze względu na ich oddziaływanie na przyrodę, jak i z innych powodów praktycznych. Na wieżach starszego typu, o konstrukcji kratownicowej, często ptaki zakładały gniazda. Prowadziło to do zbędnego wpływu turbin wiatrowych na populację ptaków. Dodatkowo, na konstrukcje kratownicowe konieczne było wspinanie się po ich zewnętrznej stronie. Na powszechnie stosowane obecnie wieże rurowe wchodzi się od wewnątrz. Zmniejsza to zagrożenie zdrowia personelu konserwującego.

Siła wiatru dostępna dla turbiny wiatrowej zależy od prędkości wiatru do potęgi trzeciej oraz od kwadratu promienia wirnika. Jednakże nie cała dostępna siła wiatru może być wykorzystana przez turbinę wiatrową. Betz (van Kuik, 2007) wykazał, że maksymalnie może być wykorzystane 16/27 dostępnej siły (Załącznik A). W celu maksymalnego wykorzystania siły wiatru, współczesne turbiny mają bardzo duże wirniki oraz bardzo wysokie wieże. W ten sposób

„optymalizowana” jest zależność od promienia oraz od prędkości wiatru. Wraz ze wzrostem wysokości wzrasta prędkość wiatru, z powodu efektu warstwy granicznej i dlatego nowoczesne wieże są wyższe, aby wychwycić większą prędkość wiatru (więcej informacji odnośnie profili i zmienności wiatru znajduje się w Załączniku A). Należy zaznaczyć, że w przyszłości promienie wirników mogą znowu wzrosnąć, ale obecnie największe wirniki używane na lądzie mają średnicę około 100 m. To ograniczenie wymiarów obecnie wynika z promieni krzywizn dróg, którymi jadą ciężarówki dostarczające łopaty na miejsce budowy. Dodatkowym czynnikiem są również prześwity pod mostami.

Efektywność wykorzystywania siły wiatru przez poszczególne turbiny wiatrowe (czyli jak blisko dochodzą do limitu Betz’a) jest funkcją konstrukcji łopat, przekładni, generatora energii elektrycznej oraz systemu sterowania. Główną rolę odgrywają siły aerodynamiczne oddziałujące na łopaty wirnika. Najlepiej zaprojektowane maksymalizują siłę nośną a minimalizują opór aerodynamiczny w każdej sekcji łopaty, od osi do końcówki. Skręcone i stożkowe powierzchnie współczesnych łopat pozwalają na uzyskanie optymalnych warunków. Innymi czynnikami, które również należy wziąć pod uwagę to wytrzymałość konstrukcyjna, łatwość wykonania i transportu, typ materiału, koszt itp.

Oprócz tych widocznych cech, odgrywa liczba łopat oraz prędkość końcówek łopat odgrywają istotną rolę w optymalizacji osiągnięć poprzez tak zwaną zwartość. Przy ustalaniu prędkości końcówek w oparciu o liczbę łopat trzeba pójść na pewne ustępstwa, gdyż te parametry mają wpływ na ciężar, koszt i hałas. Dla przykładu, wyższa prędkość końcówek często powoduje większy hałas.

Obecnie przyjęty i najbardziej powszechny system trójłopatowy podwietrzny wynika z wcześniejszych doświadczeń i ewolucji systemu. Producenci europejscy przeszli na system trójłopatowy i zainstalowali liczne turbiny zarówno w Europie, jak i poza nią. W instalacjach lądowych system podwietrzny jest preferowany w stosunku do systemu z wiatrem, ponieważ jest cichszy. Konfiguracja z wiatrem ma pewne zalety, ale jest uciążliwa ze względu na hałas powstający podczas przechodzenia łopat przez strumień tworzący się za wieżą.

Zamiana energii kinetycznej wiatru na energię elektryczną dokonuje się w zespole gondoli wirnika (RNA), który składa się z wirnika, zespołu napędowego oraz różnych komponentów pomocniczych. Wirnik składa się z łopat, piasty oraz elementów sterowania kątem ustawienia łopat. Zespół napędowy obejmuje wał, łożyska, przekładnię (nie jest potrzebna w przypadku generatorów z napędem bezpośrednim), sprzęgieł, hamulca mechanicznego i generatora. Schemat RNA z bardziej szczegółowym opisem działania różnych części pokazano w Załączniku A.

Wirniki są tak sterowane, aby wytwarzały prąd elektryczny w sposób najbardziej

efektywny oraz aby wytrzymywały ciągle zmiany sił podczas normalnej pracy i obciążenia ekstremalne podczas burz. W związku z tym, turbiny wiatrowe ogólnie nie pracują ze swoim

największym współczynnikiem mocy przy wszystkich prędkościach wiatru. Z tego powodu moc generowana przez turbinę wiatrową jest ogólnie opisana jako względna, znana jako krzywa mocy. Typową krzywą mocy pokazano w załączniku. Poniżej prędkości włączeniowej nie jest generowana żadna moc. W zakresie od prędkości włączeniowej do znamionowej, moc znacznie wzrasta wraz z prędkością wiatru. Powyżej prędkości znamionowej wytwarzana jest stała moc, niezależnie od prędkości wiatru. Powyżej prędkości wyłączeniowej turbina jest wyłączana często przy użyciu hamulca mechanicznego.

Istnieją dwa główne rodzaje systemów regulacji wirników: zmiana kąta ustawienia łopat oraz przeciągnięcie. Turbiny regulowane przeciągnięciem mają stałe łopaty i pracują przy ustalonej prędkości. Aerodynamika łopat jest tak zaprojektowana, że siła sama się ogranicza tak długo, dopóki generator jest połączony z siecią energetyczną. W turbinach z regulowanym kątem ustawienia łopaty mogą obracać się dookoła ich osi wzdłużnej. To rozwiązanie pozwala na bardziej dokładną regulację. Turbiny z regulowanym kątem ustawienia łopat z reguły są cichsze niż turbiny regulowane przeciągnięciem, szczególnie przy wyższych prędkościach wiatru. Aż do niedawna wiele turbin stosowało regulację przez przeciągnięcie. Obecnie większość dużych turbin ma regulację kąta ustawienia łopat. Więcej szczegółowych informacji o obu metodach podano w Załącznikach A i F.

Produkcję energii z turbiny wiatrowej rozpatruje się w ujęciu rocznym. Szacunki przeprowadza się przez obliczenie przewidywanej energii, która może być wyprodukowana w ciągu godziny typowego roku (przy uwzględnieniu krzywej mocy turbiny i przewidywanego źródła wiatru) oraz zsumowania energii ze wszystkich godzin. Czasami do charakterystyki osiąarów stosuje się znormalizowany wskaźnik znany jako współczynnik wykorzystania mocy (CF). Jest to energia obecnie produkowana (lub szacunek możliwości wyprodukowania) podzielona przez ilość energii, która mogłaby być wyprodukowana, gdyby turbina pracowała ze swoją mocą znamionową przez cały rok. Załącznik A podaje więcej informacji odnośnie takich przeliczeń.

2.2 Hałas generowany przez turbiny

Ze względu na obawy związane z poziomem hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe, poniżej zawarto krótkie podsumowanie informacji o źródłach hałasu. Pełny opis różnych źródeł hałasu turbin wiatrowych znajduje się w pracy Wagnera et al. (1996).

Turbiny wytwarzają hałas mechanicznie i aerodynamicznie. Mechaniczne źródła hałasu obejmują przekładnię, generator, napędy zmiany kąta, wentylatory chłodzące oraz dodatkowe wyposażenie, takie jak hydraulika. Ponieważ emitowany dźwięk jest związany z obracaniem się wyposażenia mechanicznego i elektrycznego, często jest tonowy. Dla przykładu stwierdzono, że hałas związany z turbiną 1500 kW z generatorem pracującym z prędkościami pomiędzy 1100 a 1800 obr./min obejmuje dźwięki pomiędzy 20 a 30 Hz (Betke et al., 2004). Z drugiej strony system przestawiania łopat może generować hałas jak przy szlifowaniu, ale tylko podczas działania mechanizmu zmiany kąta. Hałas mechaniczny może być przekazywany zarówno przez powietrze, jak i przez konstrukcję, gdyż powstające drgania mogą być przekazywane do piasty i wieży, a następnie promieniowane do otaczającej przestrzeni.

Zaletami przekładni i systemu zmiany ustawienia łopat jest obniżanie poziomu generowanego hałasu z tych źródeł na przestrzeni lat. System napędu bezpośredniego będzie w dalszym ciągu usprawniany. Dodatkowo, turbiny przemysłowe zazwyczaj są izolowane, aby zapobiegać przedostawaniu się hałasu mechanicznego na zewnątrz gondoli lub wieży (Alberts, 2006).

Hałas aerodynamiczny powstaje z powodu wzajemnego oddziaływania kompleksu płyn-konstrukcja zachodzącego na łopatach. Wagner et al. (1996) podzielił źródła hałasu aerodynamicznego, jak pokazano poniżej w Tabeli 1.

Tabela 1

Źródła dźwięków aerodynamicznych w turbinach wiatrowych (Wagner et al., 1996).

Rodzaj hałasu	Mechanizm	Charakterystyka
Hałas krawędzi spływu	Interakcja turbulencji warstwy granicznej z krawędzią spływu łopaty	Szerokopasmowy, główne źródło hałasu o wysokiej częstotliwości ($770 \text{ Hz} < f < 2 \text{ kHz}$)
Hałas końcówek	Interakcja zawirowań na końcówkach z powierzchnią końcówek łopat	Szerokopasmowy
Przeciągnięcie, dźwięk odrywania się	Interakcja zawirowań z powierzchnią łopat	Szerokopasmowy
Hałas laminarnej warstwy granicznej	Nieliniowa warstwa graniczna destabilizuje interakcję z powierzchnią łopat	Tonowo
Hałas tępej krawędzi spływu	Zawirowania opływu na tępej krawędzi spływu	Tonowo
Hałas przepływu nad otworami, szczelinami i wkładkami	Zakłócenia ciągłości przepływu nad otworami i szczelinami, zawirowania spływu	Tonowo
Hałas zawirowań napływu	Interakcja łopat z zawirowaniami atmosferycznymi	Szerokopasmowy
Hałas ustalonej grubości, hałas ustalonego obciążenia	Obracanie się łopat lub obracanie się powierzchni nośnych	Niska częstotliwość zależna od częstotliwości przechodzenia łopat (poza zakresem słyszalnym)
Hałas nieustalonego obciążenia	Przechodzenie łopat przez różne prędkości, z powodu zmiany kąta ustawienia lub zmian wysokości łopaty w trakcie jej obrotu* Dla turbin pracujących z wiatrem przejście przez cień wieży	Świsł lub uderzenia, modulacja amplitudy słyszalnych dźwięków w szerokim paśmie. Dla turbin pracujących z wiatrem, dźwięk impulsowy o częstotliwości przechodzenia łopat

*van den Berg 2004.

Z tych mechanizmów najbardziej uporczywym i często najsilniejszym źródłem hałasu aerodynamicznego współczesnych turbin wiatrowych jest hałas krawędzi spływu. Również często obserwowano modulowanie amplitudy hałasu z tego źródła z powodu występowania efektów atmosferycznych oraz efektów bezpośredniego rozchodzenia się dźwięków, szczególnie o charakterze świszczącym lub uderzeniowym (van den Berg, 2004). Ponieważ łopaty turbin obracają się w zmiennym strumieniu powietrza, zmienia się aerodynamika, co z kolei prowadzi do zmian w warstwie granicznej i w ten sposób zmienia hałas krawędzi spływowych (Oerlemans, 2009). Również kierunek w którym łopaty się obracają zmieniając ustawienie wpływa na różnice w kierunkowości hałasu z krawędzi spływowych. To źródło hałasu powoduje dźwięk określany czasami jako „świsł”.

Z różnych przyczyn większość współczesnych turbin stosuje regulację ustawienia kąta łopaty. Jedną z przyczyn jest to, że przy większych prędkościach wiatru, gdy system regulacyjny ma większy wpływ, turbiny z regulacją kąta ustawienia łopat są cichsze niż mogą być porównywalne turbiny regulowane przez przeciągnięcie. Załącznik E pokazuje różnice w poziomie hałasu generowanego przez te dwa systemy.

Omawiając hałas generowany przez turbiny należy brać pod uwagę również efekt rozprzestrzeniania się dźwięku oraz efekt wielu turbin. Interesującym aspektem badania efektu rozprzestrzeniania się dźwięku jest zależność prędkości dźwięku od temperatury. Jeżeli wystąpi duży gradient temperatury (co może się zdarzyć podczas dnia z powodu nagrzewania się powierzchni ziemi lub z powodów topograficznych, jak wzgórza i doliny) droga fal dźwiękowych może się załamywać. Normalnie oznacza to, że podczas typowego dnia dźwięk „zawraca” od powierzchni ziemi. Jednakże w nocy dźwięk rozprzestrzenia się na stałej wysokości lub nawet „skręca” w dół ku powierzchni ziemi, stając się bardziej zauważalnym, niż byłby w innym wypadku.

Absorpcja dźwięku przez roślinność i odbicia dźwięku od zboczy gór stanowią inne interesujące aspekty rozchodzenia się dźwięku. Wykazano, że wiele z tych efektów miało wpływ na pole akustyczne w pobliżu kilku domów w Północnej Karolinie wystawionych na oddziaływanie instalacji turbiny wiatrowej (Kelley et al., 1985). Dwułopatowe turbiny o mocy 2 MW, pracujące z wiatrem zostały zainstalowane na szczycie górskim w Północnej Karolinie. Wytworzyło to hałas impulsowy o wysokiej amplitudzie, wygenerowany z powodu interakcji łopat oraz strumieni opływających wieże. W kilku domach (10 na 1000) odnotowano niekorzystny wpływ hałasu impulsowego o wysokiej amplitudzie. W raporcie Kelley et al. (1985) podano, że z powodu załamań występujących na danym terenie powstawało echo i zjawisko ogniskowania się dźwięku.

Na płaskim terenie hałas w zakresie słyszalnym rozchodzi się w ten sposób, że jego amplituda zanika dokładnie w miarę zwiększania odległości od źródła ($1/\text{odległość}$). Załącznik E podaje formułę dla szacowania całkowitego poziomu głośności w danej odległości od źródła. Odnotowano, że w zakresie niesłyszalnym dźwięk często zachowuje się tak, jakby jego rozchodzenie się podlegało zależności $1/(\text{odległość})^{1/2}$ (Shepherd & Hubbard, 1991).

Analizując hałas generowany przez farmy wiatrowe obejmujące wiele turbin ulokowanych blisko siebie, można szacować całkowity poziom hałasu dla farmy. Metoda obliczeń szacunkowych jest opisana w Załączniku E. Wszystkie te szacunki opierają się na informacjach dotyczących natężenia dźwięku wytwarzanego przez turbinę na wysokości piasty. Poziom natężenia dla kilku współczesnych turbin jest podany w Załączniku D.

2.2.a Pomiar i rejestracja

Jak już wspomniano, turbiny wytwarzają różne typy dźwięków, o różnej charakterystyce: tonowej lub szerokopasmowej, o stałej lub zmiennej amplitudzie oraz dźwięki słyszalne i infradźwięki. Pierwsze dwie pary charakterystyk zostały omówione wcześniej. Dźwięki słyszalne obejmują dźwięki o częstotliwościach od 20 Hz do 20 kHz. Fale w zakresie infrasonicznym, poniżej 20 Hz, mogą czasem być słyszalne, jeżeli amplituda dźwięku jest wystarczająco wysoka. Załącznik D podaje zwięzłe podstawy akustyki i progu słyszenia powiązane z całym spektrum częstotliwości.

Dźwięk jest prostym pulsowaniem ciśnienia i jako takie jest mierzony mikrofonami. Jednakże amplituda pulsowania jest zapisywana nie w jednostkach ciśnienia (takich, jak Paskal) ale w skali decybeli. Poziom ciśnienia dźwięku (SPL) jest określony przez równanie

$$\text{SPL} = 10 \log_{10} [p^2/p_{\text{ref}}^2] = 20 \log_{10} (p/p_{\text{ref}})$$

którego wynik podaje liczbę jednostek decybeli (dB). Ciśnienie odniesienia p_{ref} dla dźwięku w atmosferze wynosi 20×10^{-6} Pa (tzn. 20 μ Pa lub 20 mikropaskali). Wyjaśnienia do skali decybelowej podano w Załączniku D.

Jeżeli dźwięk jest szerokopasmowy (zawierający różne częstotliwości), korzystnie jest używać średniej, która pokaże orientacyjną amplitudę dźwięku i zawarte w nim częstotliwości. Standardowe metody uśredniania, takie jak oktawa i pasmo 1/3-oktawowe, zostały opisane w Załączniku D. Istotą metody jest dzielenie całkowitego zakresu częstotliwości na fragmenty i uśrednianie amplitudy oraz częstotliwości dźwięku w każdym z nich. Ogólną wartość ciśnienia akustycznego można obliczyć przez uśrednienie wszystkich pasm.

Przy przedstawianiu ciśnienia akustycznego używa się również filtra korygującego. Wyznaczanie wartości A-skorygowanej jest powszechnie stosowane przy pomiarach turbin wiatrowych. Ten filtr uwzględnia ludzki próg słyszenia i podaje odczyt takiej samej liczby decybeli przy różnych częstotliwościach, które mogą odpowiadać równej głośności. Oznacza to, że w niskich częstotliwościach (gdy amplitudy muszą być nieprawdopodobnie wysokie, aby były słyszane przez ludzi) będzie zastosowany wysoki przelicznik ujemny. Korekta C filtruje tylko poziomy częstotliwości poniżej około 30 Hz i ponad 4 kHz, natomiast na częstotliwości pomiędzy 0 i 30 Hz nakłada bardzo niewielki filtr. Wartości korygujące dla poziomów dźwięku A i C są pokazane w Załączniku D, gdzie pokazano przykład dla istniejącej turbiny wiatrowej.

Istnieje wiele innych metod korygowania. Dla przykładu filtr poziomu dzień–noc obciąża dodatkowo hałas „nocny” pomiędzy godzinami 22.00 a 7.00 przez dodanie dodatkowych 10 dB do dźwięków generowanych w tych godzinach.

Analizując poziom hałasu generowany przez turbiny wiatrowe i inne dźwięki antropogeniczne powstaje pytanie, jaki okres należy rozpatrywać dla ustalenia średniego poziomu. Światowa Organizacja Zdrowia stosuje okresy roczne. Inni argumentują, że specjalnie dla turbin wiatrowych, które podlegają zmianom sezonowym, jak również dobowym, należy brać pod uwagę znacznie krótsze okresy uśredniania.

2.2.b Infradźwięki i dźwięki niskiej częstotliwości (IFLN)

Termin *infradźwięki* odnosi się do fal ciśnienia akustycznego o częstotliwościach poniżej 20 Hz. W zakresie infradźwiękowym amplituda dźwięków musi być bardzo wysoka, aby były słyszane przez ludzi. Dla przykładu, próg słyszalności poniżej 20 Hz wymaga amplitudy powyżej 80 dB, aby dźwięk był słyszany, a dla 5 Hz musi to być ponad 103 dB (O’Neal, 2011; Watanabe & Moeller, 1990). Oznacza to, że jest bardzo mała różnica pomiędzy wartościami słyszalnymi a progiem bólu w zakresie infradźwiękowym: ból pojawia się przy 165 dB dla 2 Hz oraz przy 145dB dla 20 Hz (Leventhal, 2006).

Zakres *niskiej częstotliwości* zazwyczaj zawiera się w granicach 20-200 Hz (Leventhal, 2006; O’Neal, 2011). Jest to zakres słyszalny, ale znowu próg słyszalności wskazuje, że dla całego tego zakresu częstotliwości jest wymagana bardzo wysoka amplituda. Wartość dźwięku po korekcie A jest oparta na progu słyszalności ludzi i w związku z tym koryguje zmierzone wartości o - 50 dB dla 20 Hz, -10 dB dla 200 Hz oraz +1 dB dla 1000 Hz. Krzywa A poziomu dźwięku jest pokazana w Załączniku D.

Fale o niskiej częstotliwości rozchodzą się z mniejszym tłumieniem, niż fale o wyższych częstotliwościach. Pomiary wykazały, że amplituda dla fal infradźwiękowych w powietrzu może mieć

charakter cylindryczny, zanikając w stopniu odwrotnie proporcjonalnym do pierwiastka kwadratowego odległości od źródła. Normalnie gaśnięcie amplitudy fal dźwiękowych jest odwrotnie proporcjonalne do odległości (Shepherd & Hubbard, 1991).

Znalezienie w powszechnie dostępnej literaturze rzetelnych i porównywalnych danych z pomiarów hałasu infradźwiękowego i niskiej częstotliwości (IFLN) nastręcza trudności. Tabela 2 podaje kilka przykładów takich pomiarów dla turbin wiatrowych. W każdym przypadku nieznana jest rzetelność danych o infradźwiękach (w żadnym sprawozdaniu nie opisano technik pomiaru infradźwięków), chociaż można przyjąć, że hałas o niskiej częstotliwości był dokładnie uchwycony. Metoda obliczania poziomu ciśnienia akustycznego nie została podana dla każdego zestawu danych, i niektóre mogą być brane z uśrednienia wielu różnych warunków podczas pomiarów dzień/noc/wiatr, podczas, gdy inne mogą być jedynie z pomiarów przeprowadzonych w ciągu jednego dnia.

Tabela 2

Wyniki pomiarów turbin wiatrowych według literatury; wartości dB odniesione do wartości niekorygowanych

Moc znamionowa (kW)	Odległość (m)	Częstotliwość	Poziom ciśnienia akustycznego	Źródła
500	200	5 20	55 dB(G) ² 35 dB(G) ²	Jakobsen, 2005 ³
3200	68	4 20	72 dB(G) ² 50 dB(G) ²	Jakobsen, 2005 ³
1500	65	5 20 100	>70 dB(A) 60 dB(A) 35 dB(A)	Leventhal, 2006
2000 (2)	100	5 20 200	95 dB 65 dB 55 dB	van den Berg, 2004 ³
1500	98	1 10 20 100 200	90 dB 70 dB 68 dB 68 dB 60 dB	Jung, 2008 ³
-	450	10 100 200	75 dB 55 dB 40 dB	Palmer, 2010
2300	305	5 20 100	73 dB(A) 55 dB(A) - 95 50 dB(A) - 70	O'Neal, 2011 ³

¹ poszczególne dB odniesione do wartości niekorygowanych.
² korekta G uwzględnia odzwierciedlenie ludzkich reakcji na infradźwięki. Krzywa jest tak ustawiona, aby wzmocnienie 0 dB było przy 10 Hz. Pomiędzy 1 Hz a 20 Hz wzrost wynosi około 12 dB na oktawę. Odcinki poniżej 1 Hz mają pochylenie 24 dB na oktawę, a powyżej 20 Hz pochylenie wynosi -24 dB na oktawę. Ludzie mogą słyszeć 95 dB(G).
³ Wskazuje prace naukowe.

Przyjmując zarejestrowane poziomy w wartościach nominalnych, można wysnuć wniosek, że poziom infradźwięków znajduje się znacznie poniżej progu słyszalności. Dla kontrastu, dźwięki niskiej częstotliwości zaczynają być słyszalne przy około 30 Hz. Takie wyniki skłaniają wielu badaczy do wniosku, że hałas infradźwiękowy i niskiej częstotliwości nie jest istotnym problemem (Leventhal, 2009; O'Neal, 2011; Bowdler, 2009). Inni badacze, którzy próbowali wyjaśnić przyczyny skarg osób mieszkających w pobliżu turbin wiatrowych stwierdzają, że źródło problemu to ILFN (dźwięki niskich częstotliwości) (Pierpont, 2009; Branco & Alves- Pereira, 2004). Niektórzy stwierdzają, że zakres niskich częstotliwości jest bardzo poważnym problemem (Kamperman et al., 2008; Jung, 2008).

Należy wyraźnie rozróżnić hałas o modulowanej amplitudzie generowany przez turbiny wiatrowe a ILFN (dźwięki niskich częstotliwości) generowane przez te turbiny. Modulacja amplitudy hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe była szczegółowo omówiona przez Oerlemansa (2009) i van den Berga (2004). Modulacja amplitudy odpowiada za powstawanie świszczącego dźwięku, opisanego przez van der Berga jako świst-świst (który czasami przechodzi w bębnienie). Świst generowany w nowoczesnych turbinach wiatrowych powstaje z powodu zmiany hałasu krawędzi spływu, generowanego przez łopaty wirnika, kiedy przechodzą one przez ślad oraz ze względu na ukierunkowanie rozchodzenia się hałasu wywołane różnicami w odbiorze dźwięku zależnie od kąta łopat w różnych miejscach podczas obrotu o 360° . Jest to dźwięk w zakresie słyszalnym o modulacji cicho-głośno-cicho, ze zmianami zależnymi od częstotliwości przechodzenia łopat (szybkość mijania wieży przez łopaty), która często wynosi około 1 Hz. Van der Berg (2004) odnotował, że poziom modulacji amplitudy jest często wyższy w nocy, gdyż różnica prędkości wiatru na górze i na dole tarczy wirnika może być znacznie większa w nocy, w stabilnej atmosferze, niż w czasie dnia. Jest to dodatkowy argument świadczący, że w stabilnej atmosferze z lekkim wiatrem blisko ziemi szum wiatru nie zamaskuje hałasu turbiny dla słuchacza. Podsumowując, efekty atmosferyczne mogą zmienić rozchodzenie się dźwięku, kierując hałas raczej w kierunku ziemi, niż w odwrotną stronę. Słyszany świst NIE jest infradźwiękiem i wiele z jego składowych nie jest niskiej częstotliwości. Większość dźwięku ma wysoką częstotliwość i jako taki podlega większemu tłumieniu atmosferycznemu niż dźwięki o niskiej częstotliwości. Powszechne mniemanie, że świszczący dźwięk niesie się dalej przy stabilnej pogodzie nie oznacza, że jest on infradźwiękiem lub zawiera dużo niskich częstotliwości. Oznacza to po prostu, że załamywanie się dźwięku również jest różne przy stabilnej pogodzie. Należy pamiętać, że jeśli skarga odnosi się do słyszalnego świstu lub bębnienia, może ona wcale nie dotyczyć ILFN (dźwięków niskich częstotliwości), mimo że tak jest przedstawiona. W publikacji Kamperman et al. (2008) podano, że “Nie jest jasne, czy skargi dotyczące hałasu o „niskiej częstotliwości” dotyczą słyszalnej części świszczącego dźwięku o niskiej częstotliwości, sekundowej modulacji amplitudy ... świszczącego dźwięku, czy też kombinacji tych dwóch czynników”.

Rozdział 3

Skutki zdrowotne

3.1 Wstęp

Rozdział 3 daje przegląd dowodów wpływu oddziaływania turbin wiatrowych na ludzkie zdrowie. Wykonano obszerny przegląd literatury w celu znalezienia opracowań obejmujących szczegółowo reakcje ludności na turbiny, jak również reakcje społeczności i poszczególnych ludzi na hałas, wibracje i migotanie. Zbadano prawdopodobieństwo biologiczne lub podstawy oddziaływania turbin na zdrowie (hałas, wibracje i migotanie). Oprócz tradycyjnych form publikacji naukowych Panel zapoznał się również z materiałami o charakterze nienaukowym, łącznie z informacjami odnoszącymi się do „Syndromu turbin wiatrowych” i zapewnił dokładną analizę ich podstaw naukowych. Ponieważ najczęstszym powodem skarg składanych przez ludzi mieszkających w pobliżu turbin są zakłócenia snu, Panel przeprowadził głębokie badanie zależności pomiędzy hałasem, wibracjami, rozdrażnieniem i zakłóceniami snu przez hałas oraz potencjalnymi konsekwencjami bezsenności.

Oceniając ciężar dowodów na oddziaływanie zdrowotne turbin wiatrowych, Panel polegał na różnych typach opracowań. Pod uwagę wzięto przede wszystkim badania nad ludźmi. Były to zarówno studia epidemiologiczne odnoszące się specjalnie do ekspozycji na oddziaływanie turbin wiatrowych lub te, gdzie skutki ekspozycji na oddziaływanie turbin wiatrowych mogły być wyraźnie wyodrębnione. Panel przeanalizował również dane doświadczalne z badań prowadzonych na ludziach. Jeżeli badania doświadczalne na ludziach są niemożliwe do przeprowadzenia ze względów etycznych lub praktycznych (Narodowa Rada Badań (NRC), 1991), wzięto pod uwagę wyniki badań na zwierzętach, które również są bardzo ważne dla odkrycia prawdopodobieństwa i zrozumienia potencjalnych mechanizmów biologicznych ekspozycji na różne oddziaływania oraz dostarczają informacji o możliwych skutkach zdrowotnych. Literaturę poświęconą tym zagadnieniom prześledzono pod kątem ekspozycji na oddziaływanie turbin wiatrowych. We wszystkich przypadkach sprawdzono jakość danych. Niektóre badania zostały odrzucone ze względu na brak rygorów naukowych lub jeżeli ich interpretacja była niezgodna z dowodami naukowymi. Są one wyszczególnione poniżej.

W szczególnym przypadku możliwości miotania lodem przez łopaty turbiny wiatrowej, Panel przedyskutował fizykę takiego zjawiska, dla zapewnienia podstawy do określenia zasięgu potencjalnego zranienia przez lecący lód (patrz Rozdział 2).

3.2 Wystawienie ludzi na oddziaływanie turbin wiatrowych

Zasady prowadzenia badań epidemiologicznych różnią się pod względem możliwości dostarczenia dowodów przyczynowo-skutkowych (Ellwood, 1998). Typowe projekty badań obejmują próby losowe, badania masowe i badania kontrolne przypadków chorobowych oraz mogą obejmować elementy przewidywanych następstw, oszacowania historycznego lub analizę krzyżową, w której wystawienie na oddziaływanie oraz wyniki są zasadniczo zbieżne. Każdy z tych projektów ma swoje silne i słabe strony i dlatego można przewidzieć różne stopnie pewności dowodów dla związku przyczynowego pomiędzy wystawieniem na oddziaływanie turbin a wynikami, na które mogą również wpływać wybory analityczne. Dlatego też literatura wymaga szczegółowego przeanalizowania, niezależnie od typu badań, dla określenia ciężaru dowodów na związek przyczynowy.

Przegląd tej literatury rozpoczął od poszukiwań w PubMed haseł „turbina wiatrowa” lub „turbiny wiatrowe”, dla zidentyfikowania opublikowanej literatury dotyczącej wpływu turbin wiatrowych na zdrowie. Następnie czytano tytuły i streszczenia przeanalizowanych publikacji, w celu wstępnego ustalenia, czy publikacja była badaniem wpływu oddziaływania turbin wiatrowych na zdrowie, czy też mogła zawierać możliwe odniesienia do takich badań. Ponieważ znaleziono stosunkowo niewiele publikacji o charakterze naukowym, sprawdzono również wiele materiałów nienaukowych, sprawozdań i książek, w których omawiano wpływ turbin wiatrowych na zdrowie. Całą tą literaturę przeanalizowano pod kątem dodatkowych odniesień dotyczących tego tematu. Dla ustalenia pewności dowodów brano jedynie pod uwagę takie publikacje, w których badania opisano wystarczająco szczegółowo, aby można było oszacować prawidłowość wniosków. To postępowanie doprowadziło do ustalenia czterech badań, w których publikowano naukowe opracowania na temat wpływu turbin wiatrowych na zdrowie. Kilka innych publikacji o charakterze nie-naukowym opisywało zjawisko z wystarczającą dogłębnnością i dlatego publikacje te zostały włączone do prac Panelu.

3.3 Badania epidemiologiczne ekspozycji na oddziaływanie turbin wiatrowych

Opublikowane referaty naukowe z czterech badań skutków oddziaływania turbin wiatrowych na zdrowie obejmują dwie publikacje ze Szwecji (E. Pedersen et al., 2007; E. Pedersen & Waye, 2004), jedną z Holandii (E. Pedersen et al., 2009) oraz jedną z Nowej Zelandii (Shepherd et al., 2011). Podstawowym wnioskiem ujętym w pierwszych trzech z tych badań jest zaobserwowane rozdrażnienie. Rozdrażnienie *jako takie* biologicznie nie jest chorobą, ale zostało zdefiniowane w różny sposób. Na przykład, jako „odczuwanie przykrości, niezadowolenia, dyskomfortu, braku satysfakcji lub poirytowania, które występują wtedy, gdy hałas zakłóca czyjeś myśli, odczucia lub

codzienne czynności” (Passchier-Vermeer, 1993); względnie „stan umysłu charakteryzujący się poczuciem niezadowolenia i niechęci, które przedłużając się mogą prowadzić do pogorszenia się stanu zdrowia i samopoczucia” (Shepherd et al., 2010). Poziom rozdrażnienia jest zazwyczaj oceniany w ankietach i tak było w przypadku trzech badań. Badania dowodzą, że odnotowano przypadki rozdrażnienia w populacjach wystawionych przez dłużej niż rok na hałas o głośności 37 dB(A) oraz poważne rozdrażnienie przy około 42 dB(A) (Concha-Barrientos et al., 2004). W każdym z tych badań poziom rozdrażnienia był oceniany w ankietach, a respondenci byli pytani o określenie przyczyny rozdrażnienia (łącznie z turbinami wiatrowymi) w skali pięciostopniowej (nie zauważam, zauważam ale nie odczuwam rozdrażnienia, jestem lekko rozdrażniony, jestem raczej rozdrażniony, jestem bardzo rozdrażniony). Wprawdzie nie należy całkowicie pomijać rozdrażnienia, należy pamiętać, że Światowa Organizacja Zdrowia (WHO) przyjęła stanowisko, w którym wyklucza rozdrażnienie jako wynik chorobowy, ponieważ rozdrażnienie nie jest formalnie uznane za jednostkę chorobową (Concha-Barrientos et al., 2004). Mimo to rozdrażnienie może przyczyniać się do rozwoju innych chorób, które mogą już być analizowane bezpośrednio. Ponieważ literatura badająca związek pomiędzy turbinami wiatrowymi a zdrowiem jest skąpa, w niniejszym opracowaniu analizujemy literaturę poświęconą turbinom wiatrowym i rozdrażnieniu.

3.3.a Badania szwedzkie

Oba szwedzkie badania były przekrojowe i obejmowały ankiety wysyłane pocztą do potencjalnych uczestników. W pierwszym szwedzkim badaniu wytypowano 627 gospodarstw domowych w jednym z pięciu obszarów Szwecji, na których gospodarstwa domowe znajdują się w różnej odległości od turbin wiatrowych ale w porównywalnych warunkach geograficznych, kulturowych i topograficznych (E. Pedersen & Wayne, 2004). Na badanym obszarze pracowało 16 turbin wiatrowych, z których 14 miała moc 600-650 kW, 1 miała moc 500 kW i 1 miała moc 150 kW. Wieże miały wysokość od 47 do 50 m. Zainstalowane turbiny były wyprodukowane przez firmy WindWorld (13 sztuk), Enercon (2 sztuki) i Vestas (1). Ankiety były wypełniane przez jedną osobę w gospodarstwie domowym, w wieku od 18 do 75 lat. Jeżeli gospodarstwo domowe liczyło więcej niż jedną osobę, wybierano osobę której data urodzenia była najbliższa daty 20 maja. Nie jest jasne, według jakiego klucza wybrano te konkretne 627 gospodarstw domowych i dlatego z tej liczby wybrano tylko 513 potencjalnych uczestników, nie jest też jasne dlaczego w innych gospodarstwach domowych nie wytypowano potencjalnych uczestników badania. Z tych 513 potencjalnych uczestników badania ankiety wypełniło 351 osób (68,4%).

Właściwy cel przeprowadzenia ankiety było zamaskowany, uczestników pytano o ogólne warunki życia, a tylko niektóre z pytań dotyczyły turbin wiatrowych. Jednakże dalsza część ankiety

była bardziej skierowana na turbiny wiatrowe, więc nie wiadomo, w jakim stopniu uczestnicy badania mieli świadomość, że dotyczy ono turbin wiatrowych. Poziom dźwięku po korekcie A był ustalony dla każdego miejsca zamieszkania, i te poziomy zostały pogrupowane w 6 kategorii (w db(A): <30, 30–32.5, 32.5–35, 35–37.5, 37.5–40, oraz >40). Dziewięćdziesiąt trzy procent respondentów widziało turbinę ze swojego miejsca zamieszkania.

Główny wniosek z tego badania stwierdzał, że istnieje istotna zależność pomiędzy poziomem hałasu a rozdrażnieniem. Ta zależność malała po skorygowaniu o odczucia respondentów na sam widok turbiny, który może być silnym bodźcem dla rozdrażnienia, ale zależność od hałasu wciąż istnieje. Dalsze korygowanie wyniku o wrażliwość na hałas i stanowisko odnośnie turbin generalnie nie zmienia tego wyniku. Autorzy wskazują, że doniesienia o zakłóceniach snu zwiększają się wraz ze wzrostem poziomu hałasu, ale nie określają istotności tej zależności. Autorzy nie informują również o zależnościach z innymi pytaniami dotyczącymi zdrowia które były umieszczone w ankietach (takich jak ból głowy, odczuwanie zmęczenia bez powodu, bóle i sztywność pleców, szyi i karku lub odczuwanie napięcia/stresu względnie poirytowania).

68% odpowiedzi zwrotnych w takim badaniu jest zupełnie dobrym wynikiem, ale zwraca uwagę, że procent odpowiedzi był większy w najwyższych kategoriach poziomu hałasu (76% i 78% wobec 60-69% w niższych). Nie jest wykluczone, że osoby bardziej rozdrażnione przez turbiny były bardziej skłonne odsyłać ankiety. W dwóch najniższych kategoriach hałasu (<32 dB(A)) nikt nie określił, że jest rozdrażniony bardziej niż lekko, natomiast w dwóch najwyższych kategoriach odpowiednio 28% (37.5–40 dB(A)) i 44% (>40 dB(A)) respondentów zgłosiło rozdrażnienie wyższe niż lekkie (procenty nie były korygowane). Podsumowując, ponieważ rozdrażnienie mogło skłaniać do odsyłania ankiet, może to sugerować pewne zawyżenie ocen w najwyższych kategoriach. Skromny opis procesu doboru respondentów do tego badania stanowi jego ograniczenie tak samo, jak przekrojowy charakter badania. Badania przekrojowe nie dają możliwości określania zależności czasowej przyczyny i skutku; w przypadku tego rodzaju badań nie możemy wiedzieć, czy poziom rozdrażnienia występował przed uruchomieniem turbin wiatrowych. Co więcej, pomimo próby ukrycia przed respondentami nastawienia badań na turbiny wiatrowe, nie jest jasne w jakim stopniu się to udało.

Drugie szwedzkie badanie (E. Pedersen & Persson Waye, 2007) wygląda na podobne do pierwszego, ale w tym przypadku procedura selekcji została szczegółowo pokazana i była ściśle przestrzegana. Nie przedstawiono szczegółowych danych turbin zainstalowanych na badanym obszarze, ale odnotowano, że znalezione tam turbiny wiatrowe mają moc nominalną większą niż 500 kW, aczkolwiek na niektórych obszarach również znajdują się turbiny o mniejszej mocy. Późniejsza publikacja tych autorów (Pedersen et al., 2009) podaje, że w omawianym badaniu analizowano

turbiny o mocy aż do 1,5 MW i wysokości do 65 m. Na wybranych obszarach badanie przeprowadzano we wszystkich gospodarstwach domowych, albo stosowano wybór metodą próby losowej. W tym badaniu na 1309 wysłanych ankiet otrzymano zwrot 754 (57,6%) odpowiedzi. Nie podano udziału odpowiedzi dla każdej kategorii hałasu. Stwierdzono prostą zależność pomiędzy poziomem hałasu a słyszalnością hałasu turbiny, z udziałem procentowym słyszalności hałasu turbiny stale podnoszącym się w wyższych kategoriach poziomu hałasu. Jednakże mimo znaczącej nieskorygowanej zależności pomiędzy poziomem hałasu a rozdrażnieniem (podzielonym na rozdrażnienie większe niż lekkie lub jego brak) i po skorygowaniu o stosunek respondentów do turbin wiatrowych jako takich lub ich aspektów wizualnych (tzn. widoczność na horyzoncie, wskaźnik istotności turbiny w polu widzenia) z których każdy jest mocno związany z rozdrażnieniem, zależność od kategorii poziomu hałasu zniknęła. Model, z którego wyciągnięto ten wniosek założył jednakże liniowy stosunek zależności pomiędzy kategorią poziomu hałasu a rozdrażnieniem. W nieskorygowanym udziale procentowym rozdrażnionych ludzi w różnych kategoriach poziomu hałasu stwierdzono, że zależność nie może być liniowa, ale raczej przeważa przy najwyższym hałasie. Procentowy udział osób zgłaszających rozdrażnienie w najwyższej kategorii poziomu hałasu (>40 dB(A)) wynosi ok. 15% i jest wyższy, niż odsetek osób odczuwających rozdrażnienie w najniższej kategorii hałasu (<5%).

Biorąc pod uwagę bardziej dokładny opis procesu selekcji w tym badaniu, należy uznać je za bardziej rzetelne niż pierwsze szwedzkie badanie. Chociaż 58% odzew na ankietę jest całkiem dobrym wynikiem zwrotu, wysoki poziom ankiet nieodesłanych nieco podważa wiarygodność ogólnego wyniku. Autorzy nie podają podziału stopnia odpowiedzi dla poszczególnych kategorii poziomu hałasu, ale jeżeli jest podobny do pierwszych szwedzkich badań, to może sugerować, że udział osób rozdrażnionych w najwyższej kategorii hałasu jest przeszacowany. Natura badań przekrojowych jest również ograniczeniem i komplikuje interpretację wyników zależności hałas–rozdrażnienie oraz korygowania dla innych czynników. Biorąc pod uwagę brak zależności po skorygowaniu o wpływ podejścia do turbin jako takich, jeżeli przyjąć, że poziom hałasu wywołuje negatywne nastawienie do turbin wiatrowych, to utrata zależności pomiędzy hałasem a poziomem rozdrażnienia znika po odpowiedniej korekcie o takie nastawienie. Nie jest to więc argument przeciwko powiązaniu odczuwalności rozdrażnienia ze wzrastającym natężeniem hałasu turbiny, ale obrazuje sposób wywoływania problemu (głośniejszy hałas – negatywny stosunek do turbiny – rozdrażnienie). Z drugiej strony, jeżeli negatywny stosunek do turbin nie byłby wywołany przez hałas, to wyniki mogą sugerować, że poziom hałasu nie jest przyczyną rozdrażnienia. Aspekt wizualny oczywiście nie wpływa na poziom hałasu, więc brak związku pomiędzy poziomem hałasu a rozdrażnieniem w analizie skorygowanej o kąt widzenia zdecydowanie sugeruje, że to nie

poziom hałasu turbiny powoduje rozdrażnienie, ale ingerencja w krajobraz. Taki wniosek jest zbieżny z wnioskiem z wcześniejszych badań prowadzonych w Danii (T. H. Pedersen & Nielsen, 1994). Jednakże należy przypuszczać, że może istnieć związek pomiędzy hałasem turbiny a rozdrażnieniem, jeżeli poziom hałasu przekracza 40 dB(A).

Analiza danych z obu szwedzkich badań związku pomiędzy hałasem generowanym przez turbiny a poziomem rozdrażnienia przygotowana przy użyciu bardziej skomplikowanego modelu statystycznego została opublikowana odrębnie (Pedersen & Larsman, 2008). Autorzy użyli modelowania równań strukturalnych (SEMs) do jednoczesnego ujęcia wielu różnych aspektów wizualnego stosunku do turbin oraz ogólnego nastawienia do turbin. Te analizy sugerują znaczący związek pomiędzy poziomem hałasu a rozdrażnieniem nawet po uwzględnieniu innych czynników.

3.3.b Badania holenderskie

Badania holenderskie miały na celu wybór gospodarstw domowych odzwierciedlających ogólne warunki ekspozycji na turbiny wiatrowe na tle innych dźwięków. Do badań wytypowano wszystkie tereny w Holandii, które stanowiły jeden z trzech typów terenów użytkowych – tereny zabudowane, tereny wiejskie z drogami głównymi i tereny wiejskie bez dróg głównych – i na których znajdowały się co najmniej dwie turbiny wiatrowe o mocy większej niż 500 kW w odległości 500 m jedna od drugiej. Wyłączono tereny o charakterze przemysłowym i handlowym. Wszystkie adresy na wybranych obszarach zaklasyfikowano do jednej z pięciu kategorii natężenia hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe (<30, 30–35, 35–40, 40–45, oraz >45 dB(A)), opierając się na charakterystykach pobliskich turbin wiatrowych, pomiarach hałasu tych turbin oraz na standardowym modelu rozchodzenia się hałasu z turbin wiatrowych opracowanym przez ISO. W ramach tych kategorii losowo wybrano do badania indywidualne gospodarstwa, natomiast w najwyższej kategorii hałasu wybrano wszystkie gospodarstwa, z powodu małej liczby gospodarstw wystawionych na oddziaływanie hałasu turbiny w najwyższej kategorii.

Tak samo jak w badaniach szwedzkich, badania holenderskie były badaniami przekrojowymi, przeprowadzonymi analogicznie do badań szwedzkich, w modelu ankiet rozsyłanych pocztą. Z rozesłanych 1948 ankiet zwrócono 725 (37%). W stosunku do badań szwedzkich odnotowano niewielkie różnice w rozkładzie procentowy odpowiedzi w poszczególnych kategoriach hałasu turbin, jednakże inaczej, niż w badaniach szwedzkich, procent odpowiedzi w najwyższej kategorii hałasu był nico niższy. Do losowo wybranej grupy 200 osób, które na ankietę nie odpowiedziały wysłano skrócone ankietę, zawierające tylko dwa pytania dotyczącymi rozdrażnienia wywołanego przez hałas z turbin wiatrowych. Nie odnotowano różnic w rozkładzie odpowiedzi na te pytania pomiędzy nie-respondentami, a osobami, które od razu odpowiedziały na całą ankietę.

Jednym z najistotniejszych wniosków z tego badania był fakt, że wśród osób, które skorzystały ekonomicznie na turbinach ($n=100$; 14%) – i które jednocześnie należały do najwyższej kategorii hałasu – praktycznie nie było osób odczuwających rozdrażnienie (3%), mimo tego, że w takim samym stopniu zauważały one hałas jak osoby, które nie odniosły korzyści ekonomicznych. Możliwe więc, że to nastawienie do turbin wywołuje rozdrażnienie, ale może to też sugerować, że osoby czerpiące korzyści ekonomiczne z pracy turbin mogą je po prostu wyłączyć jeżeli będą denerwujące. Nie do końca jednak wiadomo jak wiele z osób czerpiących ekonomiczne korzyści z pracy turbin ma aż taki wpływ na turbiny.

Podobnie, bardzo małe rozdrażnienie występowało wśród osób, które nie widziały turbiny wiatrowej ze swojego domu, nawet, jeżeli znajdowali się oni w wyższych kategoriach hałasu (jednakże nie znajdowali się w najwyższej kategorii hałasu). W modelach, w których wprowadzano korekty na widoczność turbin wiatrowych oraz korzyści ekonomiczne, poziom hałasu ciągle był znaczącym wyznacznikiem rozdrażnienia. Jednakże, z powodu sposobu w który były w tych analizach tworzone modele dźwięku i widoczności, powiązanie pomiędzy wyższym poziomem hałasu a większym rozdrażnieniem mogło występować wyłącznie u tych, którzy mogli widzieć turbinę wiatrową, podczas gdy ciągle nie było powiązania pomiędzy poziomem hałasu turbiny wiatrowej a rozdrażnieniem wśród osób, które miały turbiny wiatrowej w polu widzenia. Dlatego też to badanie musi być przyjęte jako nieprzekonujące w odniesieniu do związku pomiędzy poziomem hałasu z turbiny wiatrowej a rozdrażnieniem *niezależnym od* skutków patrzenia na turbinę wiatrową (i odwrotnie).

Ograniczeniem badań holenderskich jest ich przekrojowość, podobnie jak w przypadku badań szwedzkich. Ponadto odsetek braku odpowiedzi w badaniach holenderskich był znacznie wyższy, niż w Szwecji. Wyniki ograniczonych szacunków podzbioru nie odpowiadających nieco łagodzą zastrzeżenia powodowane niskim współczynnikiem odpowiedzi, ale nie do końca je usuwają.

3.3.c Badania nowozelandzkie

W badaniach nowozelandzkich, jak sami autorzy podali, dobierano uczestników z dwóch demograficznie dopasowanych okolic (członkowie jednej z grup byli wystawieni na oddziaływanie turbin wiatrowych, gdyż mieszkali w ich pobliżu, członkowie grupy kontrolnej mieszkali daleko od turbin wiatrowych), mimo że autorzy nie podali danych poświadczających taki dobór. Obszar na którym znajdują się turbiny opisano jako teren pagórkowaty, z długimi wzgórzami o wysokości 250-450 metrów nad poziomem morza. Na wzgórzach usytuowano 66 turbin o wysokości 125 m. Nie podano mocy turbin. Uczestników grupy wystawionej na oddziaływanie wybrano spośród osób, które ukończyły 18 lat i starszych, mieszkających w 56 domach położonych w odległości do 2 km

od turbin wiatrowych, natomiast do grupy kontrolnej dobrano uczestników spośród osób, które ukończyły 18 lat i starszych, mieszkających w 250 domach położonych w odległości co najmniej 8 km od turbin wiatrowych. Nie wiadomo, ilu członków jednego gospodarstwa domowego mogło brać udział w badaniu, ale ostateczna próba badawcza obejmowała 39 osób z grupy wystawionej na oddziaływanie turbin i 158 osób z grupy kontrolnej. Uzyskano odpowiedzi od 34% respondentów z grupy narażonej na oddziaływanie i od 32% respondentów z grupy kontrolnej. Uczestnicy odpowiadali na pytania skróconej wersji kwestionariusza WHO poświęconego jakości życia. Pytania te były wmieszane między pytania obszerniejszej ankiety aby zamaskować cel, jakim była koncentracja na turbinach wiatrowych. Chociaż nie było statystycznie znaczących różnic demograficznych pomiędzy dwoma badanymi grupami, należy zauważyć, że wykształcenie wyższe miało 43,6% uczestników z grupy wystawionej na oddziaływanie turbin i tylko 34,2% w osób z grupy kontrolnej.

Stwierdzono, że osoby należące do grupy wystawionej na oddziaływanie turbin znacząco gorzej oceniają swoją fizyczną jakość życia (w szczególności jakość snu i poziom energii), a także gorzej oceniają środowiskową jakość życia (w szczególności nisko oceniają zdrowie środowiska oraz nie są zadowoleni z warunków swojego życia). W zakresie oceny socjalnej i psychologicznej jakości życia, obie grupy były zbliżone. Średnia ocena jakości życia była znacząco niższa w grupie wystawionej na oddziaływanie turbin. Wszystkie analizy zostały skorygowane tylko o długość czasu zamieszkiwania w danym miejscu, inne zmienne nie zostały uwzględnione.

Podobnie jak w przypadku innych badań, także to badanie miało ograniczenie z powodu przekrojowości. Analogicznie do badania holenderskiego, wskaźnik otrzymanych odpowiedzi jest raczej niski, a dodatkowo badanie nowozelandzkie nie podaje żadnych danych o osobach nie uczestniczących w badaniu. Można się zatem obawiać, że dobór uczestników badania może się znacząco różnić między tymi dwoma grupami. Różnice widoczne w poziomie wykształcenia pomiędzy grupami zdają się potwierdzać te obawy. Nie ma też gwarancji, czy zastosowano właściwe metody analizy statystycznej, biorąc pod uwagę, że w badaniu mogło uczestniczyć po kilku respondentów z jednego gospodarstwa domowego. Nie zostało to stwierdzone w opisie badania, ale powinno być uwzględnione w analizie. Ograniczeniem tego badania jest też brak odniesień do innych zmiennych, które mogą być powiązane z oceną jakości życia. Należy tu podkreślić, że brak statystycznie istotnej różnicy pomiędzy grupami nie wyklucza, że takie różnice mogły jednak istnieć i wpłynąć na różnice w wynikach pomiędzy grupami, szczególnie w przypadku tak małej próby, jak przyjęta w tym badaniu. Nie określono, czy uczestnicy mogli widzieć turbiny wiatrowe, ale prawdopodobnie większość bądź wszyscy uczestnicy z grupy wystawionej na oddziaływanie turbin mogli je widzieć, natomiast większość bądź wszyscy z grupy kontrolnej nie mogli ich widzieć, z

powodu ich lokalizacji. Uwzględniając wyniki badań szwedzkich i holenderskich oznacza to, że nawet jeśli zaobserwowane różnice w ocenie jakości życia są powiązane z turbinami wiatrowymi, istnieje możliwość, że wynikają one raczej z widoku turbin niż z faktu generowania hałasu. Ogólnie rzecz biorąc, poziom dowodów z tego badania na związek przyczynowy pomiędzy turbinami wiatrowymi a oceną jakości życia jest ograniczony.

3.3.d Dodatkowe publikacje nie-naukowe

Opracowania publikowane w literaturze naukowej z definicji są poddane ocenie niezależnej od zespołu badawczego, nie tylko przez wydawców periodyku, ale również przez dwóch albo trzech (zazwyczaj) naukowców znających się na dziedzinie oraz stosujących podobną metodologię. Taka procedura pozwala wychwycić ewentualne słabe strony publikacji, od metodologii po interpretację wyników. Dzięki temu słabe strony zostają wyeliminowane, albo publikacja zostaje odrzucona, jeżeli uchybienia podważają interpretację wyników. Literatura nie naukowa nie jest poddawana procedurze zewnętrznego recenzowania. Nie oznacza to, że cała literatura naukowa jest wysokiej jakości, ani że literatura nie-naukowa musi być gorszej jakości od naukowej, ale oznacza to, że publikacje nie-naukowe nie są poddawane ocenie ani recenzji przed ich ukazaniem się. Zdarza się, że materiały publikowane w wydawnictwach nie naukowych po prostu nie spełniały wymagań jakościowych stawianych przed publikacjami naukowymi. Należy o tym pamiętać, analizując publikacje o charakterze nienaukowym. Poniżej opisano cztery sprawozdania nienaukowe. Oprócz tych czterech opracowań, w kilku wczesnych sprawozdaniach dotyczących związku między odczuwaniem rozdrażnienia a turbinami wiatrowymi wskazano na słabe zależności pomiędzy rozdrażnieniem a A-ważonym poziomem hałasu, chociaż trzeba pamiętać, że badania te były prowadzone głównie dla małych turbin, o mocy poniżej 500 kW (T. H. Pedersen & Nielsen, 1994; Rand & Clarke, 1990; Wolsink et al., 1993).

Projekt WINDFARMperception: Wpływ wizualny i akustyczny farm wiatrowych na mieszkańców (van den Berg et al., 2008). Niniejszy raport opisuje badanie, na którym oparto opracowanie holenderskie (E. Pedersen et al., 2009). Charakterystyki turbin wiatrowych są takie, jak opisano powyżej. Oprócz danych prezentowanych w opublikowanym materiale nienaukowym, raport opisuje analizy dodatkowych danych, które zostały zebrane. Te dane dodatkowe odnoszą się do skutków zdrowotnych i ekspozycji na hałas generowany przez turbiny. Kwestionariusz ocenia poziom stresu według Ogólnego Stanu Zdrowia (GHQ), stanowiącego zwalidowaną skalę, szeroko stosowaną w tego rodzaju badaniach, która ocenia symptomy odczuwane przez kilka ostatnich

tygodni. W modelach skorygowanym o takie zmienne jak: wiek, korzyści ekonomiczne czerpane z turbin oraz płeć nie znaleziono dowodu na istnienie związku pomiędzy poziomem hałasu a stresem. Przeciwnie, odkryto znaczący związek pomiędzy poziomem hałasu i zaburzeniami snu (co najmniej raz w miesiącu), nawet przy wprowadzaniu dalszych korekt z tytułu hałasu w tle. Najwyraźniej zaobserwowano to przy poziomie hałasu turbiny >45 dB(A), ale zauważono też trend wzrostowy w częstotliwości występowania zaburzeń snu wraz ze wzrostem hałasu również w niższych kategoriach natężenia hałasu. W badaniu tym pytano uczestników również o choroby przewlekłe, w tym o cukrzycę, nadciśnienie, szumy uszne, upośledzenie słuchu, choroby serca i migrena. Chociaż nie stwierdzono związku pomiędzy hałasem generowanym przez turbiny wiatrowe a tymi dolegliwościami w skorygowanych analizach, chroniczne występowanie tych dolegliwości i brak danych o początku ich występowania w powiązaniu z czasem instalowania turbin utrudnia interpretowanie tych negatywnych wyników.

Sprawozdanie dla komisji dotyczące farmy wiatrowej Moturimu, Nowa Zelandia (Phipps, 2007). Sprawozdanie przygotowane dla komisji w Nowej Zelandii dotyczące farmy wiatrowej Moturimu opisuje badania przeprowadzone przez Robyn Phipps dotyczące wpływu akustycznego i wizualnego oddziaływania turbin na osoby mieszkające w odległości przynajmniej 2 km od farm wiatrowych w regionach Manatawu i Tararua w Nowej Zelandii. Większość respondentów była oddalona o około 3 km od farm, chociaż niektórzy mieszkali znacznie dalej, nawet w odległości 15 km. Nie podano charakterystyki i liczby turbin. Raport ten nie został opublikowany w literaturze naukowej, ale podano w nim istotne szczegóły dotyczące metodologii.

Rozesłano około 1100 ankiet do okolicznych mieszkańców, uzyskano 614 (56%) zwrotów. Uczestników proszono o ocenę w skali od 1 do 5 ich zgodności z różnymi stwierdzeniami związanymi z percepcją turbin wiatrowych. Pytania dotyczące kwestii wizualnych były formułowane jako przekazy pozytywne i negatywne (np. „Myślę, że turbiny szpecą krajobraz” i „Myślę, że turbiny są atrakcyjne”). W przypadku innych pytań nie zastosowano tej metody (np. „Obserwacja turbin wywołuje nieprzyjemne odczucia fizyczne w moim ciele”).

Ogólnie, 9% respondentów uważało się za „dotkniętych” problemem migotania turbin wiatrowych, 15% narzekało na hałas i krajobraz w stopniu, w którym rozważali złożenie skargi, a 10% respondentów faktycznie złożyło skargi. Odpowiedź na poziomie 56% jest dobrym wynikiem w przypadku badań korespondencyjnych, jednak należy się zastanowić nad powodami, dla których blisko połowa potencjalnych uczestników badania nie wzięła w nim udziału. Możliwe, że osoby, które nie odesłały odpowiedzi nie czuły się dotknięte oddziaływaniem turbin w stopniu skłaniającym ich do zadania sobie trudu i udzielenia odpowiedzi. Jeśli tak jest, przypuszczalnie obniżyłoby to

całkowity procent osób „poszkodowanych” przez turbiny. Z drugiej strony nie wiadomo, jak długo przed przeprowadzeniem badania w danym miejscu pracowały turbiny wiatrowe i można przypuszczać, że osoby wyjątkowo niezadowolone z sąsiedztwa turbin mogły się wyprowadzić przed wykonaniem badania.

Kolejną słabością opisywanego badania było to, że nie określono relacji między odsetkiem osób „niezadowolonych” a odległością od turbin, widokiem turbin lub poziomem natężenia. Raport z badania cytuje wiele opracowań dotyczących wpływu hałasu na zdrowie. Wprawdzie cytowane skutki zdrowotne rzeczywiście mogą występować, to jednak w tym opracowaniu są powiązane z poziomem hałasu znacznie przekraczającym hałas w pobliżu turbin (szczególnie w przypadku oddalenia gospodarstw domowych o więcej niż 2 km od turbiny). Raport WHO zawiera pełen przegląd tej literatury (WHO, 2009). Najniższy poziom progowy, przy którym odnotowuje się jakiegokolwiek oddziaływanie wynosi około 35 dB(A) (maksymalnie dla jednego zdarzenia lub L_{Amax}) dla niektórych form zaburzeń snu (np. wykrytych w badaniu EEG lub według czasu trwania poszczególnych faz snu), ale jest to poziom natężenia hałasu wewnątrz domu, w pobliżu śpiącej osoby. Oczywiście jest, że na zewnątrz poziom hałasu musi być wyższy. Najniższy poziom progowy, przy którym odnotowano skargi na pogarszające się samopoczucie wynosił około 35 dB(A) jako średnia roczna na zewnątrz domu w nocy ($L_{nocne, zewnetrzne}$). Ale dla skutków zdrowotnych próg, przy którym mogą wystąpić negatywne oddziaływania jest znacznie wyższy, na przykład 50 dB(A) ($L_{nocne, zewnetrzne}$) dla nadciśnienia lub powstania zawału mięśnia sercowego.

„Syndrom Turbin Wiatrowych” /Wind Turbine Syndrome/ (Pierpont, 2009): W tej pracy opisano kilka osób, które odczuwane przez siebie symptomy chorobowe przypisują turbinom wiatrowym. Takie relacje podają opis zjawiska i podsumowują kolejne badania, przeprowadzone w bardziej metodyczny sposób, ale generalnie nie stanowią dowodu na istnienie związku przyczynowo-skutkowego. W tym konkretnym przypadku istnieją elementy, które wykraczają poza podstawowe opisy symptomów i dlatego praca jest warta uwagi. Z drugiej strony opracowanie to ma wiele ograniczeń, które uniemożliwiają przyjęcie dowodów z tej pracy jako odpowiedzi na pytanie, czy występuje zależność przyczynowa pomiędzy wystawieniem na oddziaływanie turbin wiatrowych a skutkami zdrowotnymi. Biorąc to pod uwagę, określenie „Syndrom turbin wiatrowych” jest bardzo mylące, gdyż sugeruje, że to turbiny wiatrowe doprowadzają do opisanych symptomów chorobowych.

Książka opisuje symptomy chorobowe, które wystąpiły u 38 osób z 10 różnych rodzin, zamieszkujących blisko turbin wiatrowych, które następnie wyprowadziły się daleko od turbin, albo spędziły znaczący okres czasu gdzie indziej. Opracowanie dotyczy osób w wieku od

jednego roku do 75 lat, z czego 13 (34%) osób nie miało skończonych 16 lat a 17 (45%) osób nie miało skończonych 22 lat. Wszystkich pytano o symptomy chorobowe przed wystawieniem na oddziaływanie turbin wiatrowych (przypuszczalnie przed uruchomieniem turbin), w czasie, kiedy podlegali oddziaływaniu turbin wiatrowych i po wyjeździe. Opracowanie zawiera imponująco szczegółowy opis stopnia i ciężkości symptomów chorobowych, które wystąpiły u tej grupy, przy czym większość symptomów według Pierponta wiązała się z wibracyjnymi zaburzeniami narządu przedsionkowego (VVVD). Symptomy są generalnie przypisywane przez uczestników wystawieniu na oddziaływanie turbin wiatrowych, ponieważ pojawiły się dopiero po uruchomieniu turbin, albo ustąpiły po wyjeździe. Jednakże sposób doboru uczestników nie pozwala na wyciągnięcie jakichkolwiek wniosków łączących przyczyny dolegliwości zdrowotnych z oddziaływaniem turbin.

Najwięcej wątpliwości związanych z wnioskowaniem przyczynowo-skutkowym w badaniach Pierpont'a dotyczy sposobu wyboru uczestników. Aby zostać włączonym do badania, oprócz innych kryteriów, przynajmniej jedna osoba w rodzinie musiała mieć ciężkie symptomy chorobowe oraz mieszkać w pobliżu niedawno uruchomionej turbiny wiatrowej. W ujęciu epidemiologicznym jest to dobór uczestników w oparciu zarówno o kryteria ekspozycji jak i kryteria określonego wyniku, co gwarantuje wystąpienie nieobiektywnego (nie przyczynowego) związku pomiędzy turbinami wiatrowymi a symptomami. Można argumentować, że pozostali członkowie rodziny, nie mający poważnych objawów, nie zostali wybrani w oparciu o z góry założony wynik, jednak nie można przyjąć że ich odczucia są w pełni niezależne. Ich odczucia związane z objawami mogą odzwierciedlać wpływ doświadczeń członków rodziny ciężiej dotkniętych dolegliwościami. Szczególnie często zdarza się to, jeżeli odczuwane symptomy dotyczą niepokoju, zaburzeń snu, kłopotów z pamięcią i koncentracją, a członkowie rodziny dotknięci poważniejszymi objawami są poirytowani, mają napady złości i krzyczą

Kilku z uczestników, chociaż nie wszyscy, zgłaszało ustąpienie symptomów po wyprowadzeniu się z okolicy turbin wiatrowych. Jest to bardzo sugestywne i powinno być potraktowane jako przedmiot dalszych badań, jednak wysoce selektywny charakter badanej grupy z założenia osłabił wagę dowodów na istnienie związku przyczynowego. Istnieje dużo innych czynników zmieniających się po przeprowadzce, co utrudnia przypisanie zmian jednej konkretnej zmiennej. Dodatkowymi czynnikami, które uniemożliwiają wyprowadzenie związku przyczynowo-skutkowego są: mała próba badana, brak informacji o szerszej populacji, która mogła być uwzględniona w badaniu, oraz brak informacji o sposobie doboru uczestników badania. Ponadto, mimo obszernych dokumentacji medycznych, wszystkie zgłoszenia symptomów były dokonane przez samych zainteresowanych. Kolejną wadą tej publikacji jest brak danych o

odległości od turbin, oraz o poziomie hałasu i wibracji infradźwiękowej w domach uczestników.

„Szkodliwy wpływ na zdrowie przemysłowych turbin wiatrowych: sprawozdanie wstępne” /Adverse health effects of industrial wind turbines: a preliminary report/ (Nissenbaum et al., 2011): To sprawozdanie opisuje badania ankietowe nad zdrowiem psychicznym i fizycznym (SF-36), zakłóceniami snu (Kwestionariusz jakości snu Pittsburgh) oraz senności (Skala senności Epworth) wśród mieszkańców okolic jednej z dwóch farm wiatrowych w Maine (Vinalhaven lub Mars Hill). W Mars Hill znajduje się 28 ustawionych liniowo turbin General Electric o mocy 1,5 MW, usytuowanych na grzbiecie wzgórza. W Vinalhaven, na płaskiej, zalesionej wyspie, stoi grupa trzech podobnych turbin. Zidentyfikowano wszystkich mieszkańców w promieniu 1,5 km od turbin i do badania zakwalifikowano wszystkie sprawne umysłowo osoby, które ukończyły 18 lat. Do badania wytypowano także próbę wybraną spośród osób o podobnej sytuacji socjo-ekonomicznej, mieszkających w odległości od 3 do 7 km od turbin. Proces rekrutacji obejmował nawet trzykrotne wizyty w każdym domu, w celu rekrutacji uczestników badania. W gospodarstwach domowych zlokalizowanych w odległości do 1,5 km od najbliższej turbiny mieszkało 65 dorosłych osób, a w badaniu wzięło udział 38 z nich (58%; 22 kobiety, 16 mężczyzn) z 23 odrębnych gospodarstw domowych. Podobne wizyty prowadzono w domach oddalonych o 3 do 7 km od turbin, aż rekrutowano do badania podobną liczbę uczestników. W ten sposób zrekrutowano 41 dorosłych osób (18 mężczyzn, 23 kobiety) z 33 odrębnych gospodarstw domowych. Nie wiadomo, ile domów odwiedzili ankieterzy ani ilu osobom proponowano udział w badaniu, więc nie można ustalić stopnia uczestnictwa.

Analizy skorygowane o wiek, płeć i lokalizację (dwie różne farmy wiatrowe) wykazały, że osoby mieszkające w promieniu 1,5 km od turbiny wiatrowej mają gorszą jakość snu, niżej oceniają swoje zdrowie psychiczne oraz częściej odczuwają senność niż osoby, które mieszkają 3-7 km od turbiny. Ocena zdrowia fizycznego nie różniła się między grupami. Analiza, w której odległość do najbliższej turbiny została potraktowana jako zmienna ciągła, dała podobne rezultaty.

Słabością tego badania jest niewielka skala – uczestniczyło w nim mniej znacznie osób niż w opisanych wyżej badaniach szwedzkich i holenderskich. Mimo to wyniki badania sugerują istotny potencjalny wpływ na zdrowie związany z mieszkaniem w pobliżu turbin wiatrowych. Niestety, w sprawozdaniu nie uwzględniono istotnych szczegółów, co utrudnia ocenę siły dowodów. W szczególności pominięto istotne informacje na temat grupy mieszkającej w odległości 3 – 7 km od turbin wiatrowych. Podano, że jest to obszar o podobnych warunkach socjoekonomicznych i być może tak jest w rzeczywistości, jednak nie przywołano żadnych

danych na poparcie tego twierdzenia, ani odnoszących się do rejonu jako całości, ani do poszczególnych uczestników. W dodatku, proces doboru uczestników badania został opisany jako losowy, to jednak rekrutacja polegała na odwiedzaniu kolejnych domów, aż do uzyskania wystarczającej liczby uczestników. Taka metoda nie spełnia warunków doboru losowego. Mając to na uwadze, wiedza o szczegółach dotyczących sposobu doboru domów, licznie odwiedzonych osób i o różnicach pomiędzy uczestnikami a osobami, które odmówiły udziału w badaniu byłaby bardzo przydatna. Bez tej wiedzy przypisywanie któregokolwiek z zaobserwowanych powiązań z turbinami wiatrowymi (zarówno hałasu jak i widoku) jest przedwczesne.

3.3.e Podsumowanie danych epidemiologicznych

Literatura dotycząca badań epidemiologicznych nad wpływem turbin wiatrowych na zdrowie jest bardzo skąpa. Ponadto, istniejące opracowania mają ograniczenia wynikające z ich przekrojowości, bazowaniu na samoocenie symptomów, ograniczonej możliwości kontrolowania innych czynników oraz ze zróżnicowania procentu osób nie odpowiadających na ankiety. Badanie, w którym najobszerniej ujęto inne czynniki mogące mieć wpływ na zgłaszane symptomy miało bardzo niski współczynnik zwrotów odpowiedzi (E. Pedersen et al., 2009; van den Berg, et al., 2008).

Wszystkie cztery wyżej omówione publikacje naukowe wskazywały na występowanie związku między wzrostem poziomu hałasu z turbin wiatrowych a wzrostem poczucia rozdrażnienia. Takie powiązanie było również sugerowane w dwóch raportach o charakterze nienaukowym, które spełniały najmniej podstawowe kryteria pozwalające uznać je za badania. Jedyne dwa opracowania, które rozważały wpływ widoku turbin wiatrowych (o charakterze naukowym) sugerują istnienie poważnego związku pomiędzy widzeniem turbin a rozdrażnieniem. Ponadto, w badaniach nad obiema tymi zmiennymi okazało się, że wpływ każdego czynnika, zarówno dźwięku turbin jak i ich widoku ulegał zmniejszeniu, lub nawet eliminacji (w przypadku hałasu w jednym z opracowań), jeżeli oba te czynniki były rozpatrywane łącznie. Jednakże na podstawie dostępnej literatury nie można postawić takiej tezy, ponieważ opublikowane analizy nie wyodrębniają wystarczająco dokładnie wpływu widoczności i słyszenia turbin wiatrowych na zależność pomiędzy nimi. Szczególnie nie można udowodnić potencjalnego związku pomiędzy którymkolwiek z tych czynników a rozdrażnieniem jedynie w przypadku osób, które zarówno widzą jak i słyszą hałas z turbin, a nie w przypadku osób, które albo nie słyszą dźwięku turbin, albo ich nie widzą. Ponadto, badanie, w którym uczestniczyły osoby odnoszące korzyści ekonomiczne z pracy turbin wykazało, że w wśród takich osób rozdrażnienie nie występowało, niezależnie od tego, czy widzieli lub słyszeli turbinę. Nawet rozpatrując dane dotyczące wyłącznie

osób, które miały widok na turbinę, ale nie odnosiły korzyści ekonomicznych, trudno jest określić poziomu hałasu, przy którym odsetek osób odczuwających rozdrażnienie jest najwyższy. Wyższy odsetek zgłoszonych przypadków odczuwania rozdrażnienia wydaje się być bardziej wyraźny powyżej 40 dB(A). W tym przypadku 27% osób było rozdrażnionych (wskazały co najmniej 4 punkty w 5-stopniowej skali rozdrażnienia; 5 oznacza wysokie rozdrażnienie), natomiast około 18% respondentów było bardzo rozdrażnionych (5 punktów w 5-stopniowej skali). Równoważny odsetek rozdrażnionych i bardzo rozdrażnionych respondentów przy hałasie o natężeniu 35-40 dB(A) odpowiednio wynosił około 15% i 6%. Jednakże te udziały procentowe mogą być uznane za górną granicę dla specyficznego związku z poziomem hałasu ponieważ, uwzględniając bezpośredni wpływ hałasu, są one lekko przewymiarowane z powodu selektywnego udziału w badaniu, i ze względu na fakt, że wyniki nie uwzględniały skutków patrzenia na turbinę.

Tak więc, rozważając ogólne wystawienie na oddziaływanie turbin wiatrowych, wszystkie materiały sugerują istnienie związku z rozdrażnieniem. Mimo tego, że nawet analizowane prace naukowe mają słabości, polegające na przekrojowości badań i niskim współczynniku zwrotu ankiet, **Panel stwierdza, że istnieją ograniczone dowody sugerujące związek pomiędzy wystawieniem na oddziaływanie turbin wiatrowych a rozdrażnieniem.** Jednak tylko dwa badania brały pod uwagę zarówno widzenie i słyszenie turbin wiatrowych, i nawet w nich nie rozgraniczono potencjalnego wpływu widoku turbin od hałasu przez nie generowanego. Dlatego **Panel stwierdza, że nie ma wystarczających dowodów aby określić, czy istnieje powiązanie pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a rozdrażnieniem, w oderwaniu od skutków widoku turbin wiatrowych i odwrotnie.** Ustalenia Panelu należy rozpatrywać mając na uwadze możliwość sugerowaną w jednym z badań naukowych, że w przypadku osób, które czerpią korzyści ekonomiczne z pracy turbin stopień odczuwania rozdrażnienia jest bardzo niski, niezależne od tego czy widzą czy słyszą turbiny.

Postawiono także tezę, że gorsza jakość snu była związana z poziomem hałasu z turbin wiatrowych. Intuicyjnie mamy wrażenie, że wyższy poziom hałasu prowadzi do częstszych zakłóceń snu, jednak istnieje niewiele danych określających czy zjawisko to występuje przy poziomie hałasu generowanym przez turbiny wiatrowe. Taki związek sugerowano w badaniu z Nowej Zelandii, w jednym z badań szwedzkich (bez omówienia szczegółów) oraz w dwóch badaniach o charakterze nienaukowym. Dlatego też **Panel stwierdza, że istnieją ograniczone dowody sugerujące powiązanie pomiędzy hałasem turbin wiatrowych a zakłóceniami snu oraz, że dalsze badania mogą dokładnie określić jaki poziom hałasu generowany przez turbiny wiatrowe prowadzi do zakłóceń snu.**

Najpełniejsze badanie epidemiologiczne sprawdzające zależność pomiędzy hałasem a

zdrowiem psychicznym sugeruje, że nie ma zależności pomiędzy hałasem turbin wiatrowych a stopniem rozstroju psychologicznego lub problemami zdrowia psychicznego. Istnieją jeszcze dwa słabe badania przeprowadzone na mniejszą skalę, z których jedno stwierdziło istnienie takiego powiązania, a drugie nie. Dlatego też **Panel stwierdza, że dostępny aktualnie materiał dowodowy nie wskazuje na powiązanie pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych i stopniem rozstroju psychologicznego lub problemami zdrowia psychicznego.**

W jednym z badań szwedzkich zebrano dane na temat takich dolegliwości, jak: bóle głowy, przemęczenie, ból i sztywności pleców, karku lub barków, odczuwanie napięcia/stresu oraz irytacji, jednak w badaniu nie przedstawiono analizy tych danych. Badanie holenderskie nie ustaliło istnienia związku pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a cukrzycą, nadciśnieniem, szumami usznymi, problemami słuchu, chorobami krążeniowymi i migreną, chociaż nie zostało to opublikowane w formie wyników naukowych. Dlatego też **Panel stwierdza, że żaden z przeanalizowanych nielicznych dowodów z badań epidemiologicznych nie sugeruje istnienia związku pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a bólami i sztywnością, cukrzycą, nadciśnieniem, szumem usznym, problemami słuchu, chorobami krążenia i bólami głowy/migrenami.**

Te wnioski są zgodne z wnioskami prezentowanymi w publikacji naukowej autorstwa Knoppera i Ollsona (2011). Stwierdzają oni, że „Wnioski z publikacji naukowych różnią się w pewnym stopniu od wniosków zawartych w literaturze popularnej. W publikacjach naukowych, rozdrażnienie wywołane przez turbiny wiatrowe jest statystycznie powiązane z hałasem z tych turbin, jednak okazuje się, że jest znacznie mocniej skorelowane z oddziaływaniem wizualnym turbin, stosunkiem do turbin wiatrowych i wrażliwością na hałas ... Potwierdzono, że hałas z turbin wiatrowych może być dla niektórych osób drażniący i może być powiązany z niektórymi odnotowanymi negatywnymi skutkami zdrowotnymi (np. z zakłóceniami snu), szczególnie, gdy poziom hałasu przekracza 40 db(A).”

3.4 Oddziaływanie turbin wiatrowych: hałas, wibracje, migotanie cieni i miotanie lodem

Oprócz opisanej w poprzedniej sekcji analizy literatury poświęconej badaniom epidemiologicznym na ludziach wystawionych na oddziaływanie turbin wiatrowych oraz skutkom zdrowotnym takiej ekspozycji, Panel przeanalizował literaturę analizującą szczególne, fragmentaryczne skutki ekspozycji na oddziaływanie turbin wiatrowych i ich potencjalny wpływ na zdrowie. Oddziaływania uwzględnione w tej sekcji to: hałas i wibracje, migotanie cieni oraz miotanie lodem. Każde z tych oddziaływań zostało omawiane osobno, pod kątem ich udokumentowanych i potencjalnych skutków dla zdrowia. Omówiono także przypadku opisywania

skutków zdrowotnych w mediach nienaukowych.

3.4.a Potencjalne skutki zdrowotne związane z hałasem i wibracjami

Badania epidemiologiczne omówione powyżej wskazują, że hałas z turbin wiatrowych jest źródłem rozdrażnienia. W badaniach odnotowano również, że niektórzy respondenci odczuwali zakłócenia snu wywołane hałasem generowanym przez turbiny. Niniejsza sekcja omawia charakterystykę dźwięku z turbin w pasmach słyszalnych i niesłyszalnych, w świetle naszego rozumienia ich wpływu na ludzkie zdrowie.

Wiadomo, że przy zbyt wysokim poziomie hałasu dźwięk może spowodować utratę słuchu (Concha- Barrientos et al., 2004). Jednakże taki poziom hałasu znajduje się znacznie powyżej zakresu, jaki może być generowany przez turbiny. Udowodniono, że nawet poziomy słyszalnego dźwięku niższe od poziomu powodującego utratę słuchu mogą mieć różnorakie skutki zdrowotne. Szczegółowe dotyczące dowodów na tego rodzaju oddziaływanie na zdrowie zostały podsumowane w sprawozdaniu WHO, w którym podało kilka istotnych wniosków końcowych (WHO, 2009). Po pierwsze, istnieje wystarczająco wiele dowodów na występowanie skutków biologicznych hałasu podczas snu, takich jak: przyspieszone tętno, pobudzenie, zmiany stadiów snu i budzenie. Po drugie istnieje ograniczona liczba dowodów na to, że hałas w nocy powoduje zmiany poziomu hormonów i wywołuje stany kliniczne, takie jak choroby krążenia, depresja i inne choroby psychiczne. WHO w swoim sprawozdaniu podaje również szczegółowo, jakie poziomy progowe hałasu mogą wywoływać te potencjalne negatywne skutki. W przypadku skutków zdrowotnych dla których jest wystarczająco dużo danych, aby można było oszacować poziom progowy, jego wartość nigdy nie jest niższa niż 40 dB(A), mierzonych jako średnia roczna dla hałasu na zewnątrz (hałas otoczenia) w nocy. W badaniach zakładano, że respondenci śpią przy lekko uchylonych oknach.

Wartość progowa oszacowana przez WHO ma jedną wadę – jako średnia roczna może zamaskować szczególne cechy hałasu generowanego przez turbiny, a wywołującego u badanych respondentów rozdrażnianie lub zakłócenia snu. Dla przykładu, szczególny, pulsacyjny charakter dźwięku z turbin wiatrowych był podawany przez respondentów jako źródło rozdrażnienia, mimo że był cichszy niż hałas drogowy (E. Pederson, 2004). Roczna średnia hałasu eliminuje (lub spłaszcza) fluktuacje dźwięku i pomija różnice pomiędzy poziomami natężenia hałasu w dzień i w nocy. Przepisy mogą brać to pod uwagę lub mogą to pomijać.

Literatura dokumentuje również przypadki stanów klinicznych spowodowanych intensywnymi wibracjami. Są to typowe symptomy oddziaływania pneumatycznych wiertarek udarowych, drgających narzędzi ręcznych, narzędzi pneumatycznych itp. W takich przypadkach

mówimy o wibracjach rąk i ciała, bądź całego ciała. Wibracje mogą powodować zmiany kliniczne w ścięgnach, mięśniach, kościach i stawach oraz mogą wywierać wpływ na układ nerwowy. Łącznie te skutki są znane jako zespół wibracyjny bark-ręka (HAVS). Opracowane wytyczne i mają ochronić pracowników przed negatywnymi skutkami wywoływanymi przez wibracje (przegląd Europejskiej Agencji Bezpieczeństwa i Higieny Pracy, 2008; (NIOSH 1989). Amerykańskie przepisy BHP nie precyzują norm dotyczących ekspozycji na wibracje. Amerykańska Konferencja Rządowych Higienistów Przemysłowych (ACGIH) opracowała Graniczne Wartości Progowie (TLVs) dla ekspozycji na oddziaływanie wibracji narzędzi trzymanyh w ręku. Te granice ekspozycji są podane jako przyspieszenie zależne od częstotliwości (NIOSH, 1989).

3.4.a.i Wpływ hałasu z turbin wiatrowych na sen

Badania epidemiologiczne wskazują, że hałas i/lub wibracje turbin wiatrowych mogą powodować zakłócenia snu. W tej sekcji omówiono sen i jego zakłócenia. Dodatkowo podano propozycje bardziej konkretnego opracowania wpływu turbin wiatrowych na sen.

Wszystkie dźwięki potencjalnie mogą zakłócać sen. Ponieważ turbiny wiatrowe generują dźwięki, mogą one powodować zakłócenia snu. Bardzo głośne turbiny wiatrowe usytuowane w pobliżu domu prawdopodobnie mogą przerywać sen, szczególnie u osób wrażliwych (cierpiących na bezsenność, zmienność nastrojów, u osób starszych i mających „lekki sen”), natomiast względnie ciche turbiny wiatrowe nie będą przerywać snu nawet u najlżej śpiących, szczególnie jeżeli są usytuowane w odpowiedniej odległości.

Nie ma wystarczających dowodów, które dostarczyłyby szczegółowych informacji dotyczących o stopniu, w jakim poszczególne poziom progi ciśnienia akustycznego z turbin wiatrowych mogą wywoływać zakłócenia snu. Aby to ustalić, należy przeprowadzić badania fizjologiczne, badające wpływ hałasu z turbin na osoby śpiące. Korzystając z istniejących danych (np. Basner, 2011) i wytycznych (np. WHO) dotyczących hałasu w nocy, nie ograniczających się do turbin wiatrowych, można rozsądnie określić, jakie powinny być te limity. Byłoby jednak lepiej, gdyby istniały konkretne dane dotyczące szczególnego wpływu turbin wiatrowych na sen.

W tej sekcji wprowadzamy szerokie pojęcia dotyczące snu, interakcji pomiędzy snem a hałasem i potencjalnym wywoływaniem zaburzeń przez turbiny wiatrowe.

Sen

Sen jest naturalnym stanem zmiany świadomości i obniżonej aktywności fizycznej, który wpływa na wszystkie aspekty naszej fizjologii i ma duże znaczenie dla naszego zdrowia i dobrego samopoczucia.

Pomiar snu u ludzi jest wykonywany z reguły za pomocą elektroencefalografii (EEG). Badanie można przeprowadzić w laboratorium lub w warunkach domowych, dla celów klinicznych lub doświadczalnych. Jednocześnie mierzone są również inne parametry fizjologiczne, takie jak ruchy mięśni, funkcjonowaniem serca i płuc.

Nie wiadomo, jaka ilość snu jest optymalna dla konkretnej osoby, gdyż różni się ona dla każdego człowieka i każdego wieku, jednak sen w niewystarczającej ilości (deprywacja snu) prowadzi do licznych konsekwencji.

Niedostatek snu może przybierać różne formy, w tym trudności z zaśnięciem; bezsenność; nieprawidłowy przebieg faz snu, jak w przypadku zbytniego skrócenia fazy snu głębokiego (czasami zwanej fazą N3); lub częste przerywanie snu, nazywane wybudzeniami. Źródła zaburzeń snu mogą być dobrowolne (pożądane lub niepożądane) względnie niedobrowolne. Źródła dobrowolne obejmują aktywność późno w nocy lub wczesne pobudki, na przykład żeby zdążyć do pracy lub do szkoły, lub w razie wykonywania różnych czynności w czasie normalnie przeznaczonym na sen. Zaburzenia snu mogą również być spowodowane przez różne problemy niedobrowolne i niepożądane (w tym problemy związane z naszym ciałem, jak bóle, pobudzenie, zaburzenia nastroju), ze względu na potrzebę częstego oddawania moczu lub w wyniku licznych zakłóceń snu (obejmujących bezsenność, zespół bezdechu śródśennego, zaburzenia rytmu dobowego, parasomnie, zaburzenia ruchu związane ze snem itp.) lub mogą być po prostu wywołane przez spływanie głębokości snu następujące wraz z wiekiem. Zakłócenia snu mogą także być spowodowane przez liczne czynniki zewnętrzne, takie jak hałas lub inne sygnały w otoczeniu śpiącego.

Sen jest umownie podzielony na sen z szybkim ruchem oczu (faza REM) i sen nie-REM. Sen nie-REM dzielimy na kilka faz, od snu lekkiego do głębokiego. Oprócz wskazywania tych kategorii snu, odczyt EEG może być analizowany bardziej szczegółowo i dogłębnie, łącznie z badaniem częstotliwości i układu odczytu. Jest to ważne dla snu, ponieważ według obecnego stanu wiedzy niektóre długości fal mózgowych (na podstawie EEG) mogą wskazać, kto jest podatny na zaburzenia snu wywołane przez hałas i jakie momenty snu są najbardziej uwrażliwione (Dang-Vu et al., 2010; McKinney et al., 2011).

Bezsennosc można scharakteryzować jako trudności z zasypianiem lub utrzymaniem snu, których nie można wytłumaczyć innymi przyczynami (takimi jak ból lub inne zakłócenie snu), (szczegółowe kryteria diagnostyczne bezsenności – patrz ICSD, wyd.2). Około 25% całej populacji okresowo doświadcza zakłóceń snu lub bezsenności. Deprywacja snu to stan o obniżonej ilości lub jakości snu. Może prowadzić do nadmiernej senności w czasie dnia oraz do problemów związanych ze zmiennością nastrojów i zaburzeniem funkcji poznawczych (Roth et al., 2001; Rogers, 2007;

Walker, 2008). Jak można się spodziewać, stopień deprywacji snu ma bezpośredni wpływ na funkcje poznawcze, a konsekwencje niedoboru snu w życiu codziennym to na przykład wypadki drogowe, zachowania impulsywne, trudności z koncentracją i zmienność nastrojów (Rogers, 2007; Killgore, 2010). Niedostatek snu się kumuluje po każdej źle przespanej nocy. Może to prowadzić do nieznacznego upośledzenia czasu reakcji, obniżenia zdolności do podejmowania decyzji, braku czujności i narastającego rozkojarzenia. Osoba cierpiąca na zakłócenia snu zauważa te symptomy dopiero kiedy zdarzy się wypadek, lub kiedy popełni błąd, a czasami wcale nie zdaje sobie z nich sprawy (Rogers, 2007; van Dongen 2003).

Sen a turbiny wiatrowe

Biorąc pod uwagę skutki, jakie deprywacja snu wywiera na zdrowie i samopoczucie, w tym na nastrój i funkcje poznawcze, należy przyznać, że doniesienia o obniżeniu nastroju oraz o innych dolegliwościach medycznych i psychologicznych związanych z brakiem snu, mogą mieć źródło w mieszkaniu w bezpośredniej bliskości turbin wiatrowych, jeżeli to turbiny są przyczyną zaburzeń snu. Jednakże dotychczas zebrane dane dotyczące zależności pomiędzy turbinami wiatrowymi a snem są niewystarczające. Wiele czynników decyduje o tym, czy konkretny dźwięk zaburza sen, czy nie. Ogólnie mówiąc, zaburzenia snu są wypadkową czynników dotyczących osoby śpiącej i dźwięku.

Opisywane przypadki subiektywnych skarg na zaburzenia snu, szczególnie te, które nie są krytycznie i obiektywnie ocenione według metod naukowych, mają niski poziom wiarygodności dowodowej, nie tylko z powodu braku obiektywnych pomiarów, ale również z powodu odpowiedniej dokładności pozwalającej na wyciągnięcie wniosków przyczynowo-skutkowych. Dla przykładu, rozpatrzmy przypadek osoby, która źle śpi w domu (blisko turbiny wiatrowej), natomiast dobrze śpi na wakacjach (z dala od turbiny wiatrowej). Na podstawie tego przypadku można postawić tezę, że turbiny wiatrowe wywołują u tej osoby zaburzenia snu, a nawet uogólnić tę informację na innych ludzi. Jednak istnieje wiele innych czynników, nie mających żadnego związku z turbiną, które mogą wpływać na jakość snu danej osoby na wakacjach. Biorąc pod uwagę jak powszechnie odnotowywane są zaburzenia snu, takie jak bezsenność, i jak często zdarzają się inne dolegliwości wpływające na obniżenie jakości snu (na przykład depresja) jest oczywiste, że te czynniki także należy brać pod uwagę przy ocenie dowodów wskazujących na związek przyczynowy turbin wiatrowych z zaburzeniami snu u ogółu populacji. Należy również uzyskać obiektywne pomiary snu, a nie tylko subiektywne skargi.

Subiektywne relacje o dobrym lub złym śnie mogą być mylące lub niedokładne. Ludzie mogą niedoceniać lub przeceniać jakość swojego snu. W dalszych badaniach należy sprawdzić własności akustyczne turbin wiatrowych w powiązaniu z czynnikami, które mogą zakłócać sen.

Odgłos turbin wiatrowych ma swoje unikalne dźwięki oraz takie, które są wspólne z innymi źródłami hałasu (takimi, jak samochody ciężarowe, pociągi czy samoloty). Przy ocenie skutków hałasu turbin wiatrowych istotne jest zatem wprowadzenie właściwego rozróżnienia, wykorzystując do tego dane o innych rodzajach hałasu. Bez obiektywnych, fizjologicznych informacji wpływ turbin wiatrowych na sen może być przeceniony lub niedoceniony.

Należy pamiętać, że nie wszystkie dźwięki osłabiają zdolność do zasypiania i utrzymywania snu. Przeciwnie, ludzie powszechnie używają techniki zagłuszania niepożądanych dźwięków przez wprowadzanie do środowiska dźwięków hamujących percepcję hałasów niepożądanych. Czasami dźwięki takie określane są mianem „łagodzących” i charakteryzują się pewnymi własnościami akustycznymi, które powodują ich skuteczność. Różne rodzaje hałasu w różny sposób wpływają na ludzi. Wartość emocjonalna przypisana poszczególnym dźwiękom przez konkretną osobę ma ogromny wpływ na zdolność do zasypiania lub utrzymywania snu. Inne aspekty dźwięków są szczególnie pobudzające i dlatego też będą raczej przerywać sen, nawet przy niskim poziomie ciśnienia akustycznego. Na pozostałe dźwięki każdy reaguje w indywidualny sposób, zależny częściowo od wartości emocjonalnej przypisanej konkretnym dźwiękom. Na przykład hałas kojarzony z czymś niepokojącym, prawdopodobnie wywoła problemy ze snem.

Charakterystyka fizjologii snu zmienia się z nocy na noc, a także podczas życia danej osoby. U każdego sen przebiega inaczej i każdy indywidualnie reaguje na hałas (np. Dang-Vu et al., 2010; McKinney et al., 2011). Niektórzy ludzie, mimo początkowych trudności z zasypianiem przy hałasie, przyzwyczajają się do niego przy powtarzalnej ekspozycji (Basner, 2011).

Podsumowując, sen jest złożonym stanem biologicznym, ważnym dla zdrowia i dobrego samopoczucia człowieka, wpływającym na wiele funkcji fizjologicznych. Do chwili obecnej żadne badanie nie przeanalizowało wystarczająco dogłębnie wpływu turbin wiatrowych na sen.

Przyszłe kierunki: Przyszłe badania mogą przynieść korzyść w postaci sprecyzowania skutków zakłóceń snu wywołanego hałasem z turbin wiatrowych. Badania takie winny sprawdzić poziom ciśnienia akustycznego w pobliżu śpiących, oraz jednocześnie mierzyć wielokanałowo fizjologię snu dla określenia reakcji śpiącego na różne poziomy hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe. Celem badania winno być precyzyjne zrozumienie, jakie poziomy ciśnienia akustycznego z największym prawdopodobieństwem prowadzą do zaburzeń snu. Może to być również pomocne do stwierdzenia, czy śpiący mogą przyzwyczaić się do tych hałasów, czyli z upływem czasu odczuwać ich oddziaływanie w coraz mniejszym stopniu. Przydatne byłoby także, obok badania populacji jako całości, zadanie tych skutków dla wrażliwej części populacji, szczególnie dla osób z bezsennością lub zaburzeniami nastrojów lub osób starszych.

Podsumowanie danych o spaniu

Podsumowując, sen jest złożonym stanem biologicznym, ważnym dla zdrowia i dobrego samopoczucia i wpływającym na szeroki zakres funkcji fizjologicznych. **Do chwili obecnej żadne badanie nie przeanalizowało wystarczająco dogłębnie wpływu turbin wiatrowych na sen.**

3.4.b Migotania cienia i potencjalne skutki dla zdrowia

Migotanie cienia powstaje, gdy zmienia się intensywność światła na skutek ruchu obrotowego rzucających cień łopat turbin wiatrowej (bardziej szczegółowy opis tego zjawiska w Załączniku B). Cienie te kładą się na ziemi, budynkach i konstrukcjach ze zmienną częstotliwością i intensywnością. W Stanach Zjednoczonych migotanie cieni jest mniejszym problemem niż w Europie Północnej, ze względu na inną szerokość geograficzną oraz mniejszy kąt padania promieni słonecznych w Europie. Tym niemniej, również w Stanach Zjednoczonych może to być istotnie dokuczliwe dla osób eksponowanych na migotanie cieni przez dużą część dnia lub roku. Migotanie cienia może znacznie się różnić w zależności od kierunku i prędkości wiatru, położenia geograficznego i odległości od łopat turbin do najbliższej konstrukcji lub budynku. Ogólnie migotanie cieni rozchodzi się od turbin wiatrowej po obszarze o kształcie skrzydeł motyla, zmniejszając się od największych wartości migotania blisko turbin do niższych wartości migotania wraz ze wzrostem odległości od turbin (New England Wind Energy Education Project (NEWEEP), 2011; Smedley et al., 2010). Migotanie cieni może być widoczne w odległości aż do 1400 m od turbin, ale najsilniejsze jest w odległości do 400 m od turbin (NEWEEP, 2011). Dodatkowo, migotanie cieni zazwyczaj występuje rano i wieczorem, w porze wschodu i zachodu słońca, gdy cienie są najdłuższe. Co więcej, migotanie cieni może zmieniać się w różnych porach roku zależnie od położenia geograficznego turbin, tak że w niektórych miejscach migotanie występuje tylko w miesiącach zimowych, a w innych podczas miesięcy letnich. Inne czynniki wpływające na migotanie cieni i ich intensywność obejmują obiekty krajobrazu (np. drzewa, inne występujące cienie) oraz warunki pogodowe. Dla przykładu, migotanie cieni nie występuje w dni pochmurne, a występuje w dni słoneczne. Również prędkość migotania cieni (na sekundę) wzrasta z prędkością wirnika (NRC, 2007). Dodatkowo, jeżeli kilka turbin jest umieszczonych względnie blisko siebie, może wystąpić połączone migotanie z różnych łopat kilku turbin. Z kolei, jeżeli turbiny są umieszczone w różnych miejscach dookoła jednej konstrukcji, migotanie cieni może występować w tym samym miejscu o różnych porach dnia, na skutek cienia z różnych turbin, dlatego bardzo ważne jest właściwe wstępne rozplanowanie rozmieszczenia turbin (Harding et al., 2008). W Niemczech przyjęto, że dopuszczalny limit migotania cieni z turbin wiatrowych to 30 godzin na rok i 30 minut na dzień (na podstawie obliczeń astronomicznych, przy czystym niebie) (NRC, 2007). Limit ten jest

zbieżny z wytycznymi opracowanymi w Danii, w których przyjęto dopuszczalne migotanie przez 10 godzin rocznie w warunkach rzeczywistych.

3.4.b.i Potencjalne skutki zdrowotne migotania

Ponieważ niektórzy ludzie mają predyspozycje do napadów chorobowych pod wpływem pewnych rodzajów migotania światła, istniała obawa, że turbiny wiatrowe mogą potencjalnie wywoływać napady chorobowe u osób wrażliwych. Rzeczywiście, napady chorobowe powodowane stymulacją wizualną lub świetlną występują najczęściej u ludzi chorujących na niektóre rodzaje epilepsji (Guerrini & Genton, 2004), szczególnie na padaczkę uogólnioną. Nie wiadomo dokładnie jaka liczba osób jest na tyle wrażliwa na światło, żeby mogło to wywoływać ataki, ale przyjmuje się, że jest to około 5% chorujących na epilepsję, czyli około 100 000 ludzi w Stanach Zjednoczonych. Wiele z tych osób leczy się w odpowiedni sposób, co znacznie zmniejsza zagrożenie.

Na szczęście nie wszystkie migotania światła powodują napady chorobowe, nawet u osób nieleczonych ze stwierdzoną światło-wrażliwością. Aby wywołać napad chorobowy musi wystąpić jednocześnie cały szereg istotnych czynników, nawet w przypadku osób podatnych i wrażliwych na zmiany oświetlenia. Istotna jest w takim przypadku częstotliwość występowania bodźca, jego obszar oraz wzór (patrz poniżej)

(<http://www.epilepsyfoundation.org/aboutepilepsy/seizures/photosensitivity/gerba.cfm>).

Częstotliwości powyżej 10 Hz z większym prawdopodobieństwem mogą wywołać napady epileptyczne u osób wrażliwych, natomiast napady powodowane stymulacją światłem zasadniczo występują przy częstotliwościach większych niż 5 Hz. Częstotliwości migotania cieni pochodzących z turbin wiatrowych są zależne od częstotliwości wirnika i zazwyczaj mieszczą się w zakresie 0,3 – 1,0 Hz, czyli zdaniem Krajowej Rady Zasobów oraz Fundacji Badania Epilepsji (NRC, 2007) znajdują się poza zakresem progowym napadów chorobowych. Badania przeprowadzone przez Hardinga i innych (2008) wstępnie stwierdziły, że ponieważ migotanie światła może oddziaływać na całą siatkówkę oraz że nawet przy zamkniętych powiekach zmienne światło może docierać do siatkówki, to zalecana bezpieczna odległość pozwalająca na uniknięcie ryzyka napadu choroby wywołanego migotaniem cienia wynosi 4 km (Harding et al., 2008). Jednakże późniejsze analizy biorące pod uwagę zmienne warunki meteorologiczne i szybkość migotania cieni dowiodły, że nie ma zagrożenia atakiem chorobowym, jeżeli osoba wrażliwa na migotanie znajduje się w odległości równej co najmniej 1,2 razy całkowitej wysokości turbiny na lądzie, oraz 2,8 razy całkowitej wysokości turbiny ulokowanej na wodzie, które potencjalnie mogą generować częstotliwości powyżej 5 Hz (Smedley et al., 2010).

Chociaż niektóre osoby narzekały na dodatkowe dolegliwości zdrowotne, takie jak migrena, mdłości, zawroty głowy lub dezorientacja wywołane migotaniem cieni, znaleziono na ten temat tylko jedno badanie sponsorowane przez rząd niemiecki (Pohl et al., 1999). Badanie to zostało przeprowadzone przez Instytut Psychologii Uniwersytetu Christian-Albrechts w Kilonii na zlecenie Federalnego Ministerstwa Gospodarki i Technologii (BMW) oraz było wsparte przez Biuro Biologii, Energii i Środowiska Federalnego Ministerstwa Oświaty i Rozwoju (BMBF) na zlecenie Agencji Środowiska Landu Schleswig. Celem tego finansowanego przez rząd badania było ustalenie, czy okresowe zacienianie trwające dłużej niż 30 minut wywołuje znaczące skutki zdrowotne związane ze stresem. Cienie były tworzone przez system projektorów, które symulowały migotanie z rzeczywistych turbin wiatrowych.

Badaniu poddano dwie grupy osób w różnym wieku. Pierwsza grupa obejmowała 32 studentów (średni wiek 23 lata). Druga grupa obejmowała 25 osób aktywnych zawodowo (średni wiek 47 lat). W obu grupach były kobiety i mężczyźni. Uczestnicy byli losowo przydzielani do jednej z dwóch grup, dzięki czemu utworzono grupę kontrolną i grupę faktycznie poddaną doświadczeniu. Grupa poddana doświadczeniu została wystawiona na działanie symulowanego migotania przez 60 minut. Grupa kontrolna miała te same warunki oświetlenia jak grupa eksperymentalna, ale bez okresowych cieni. Główna część badania składała się z serii sześciu testów i faz pomiarowych: dwie przed włączeniem światła, następne trzy w odstępach 20 minut podczas włączonego symulowanego migotania cieni i jedna po wyłączeniu migotania światła. Mierzone zmienne obejmowały ogólne mierniki oceny występowania stresu (testy arytmetyczne, zadania na spostrzegawczość) i dotyczące dobrego samopoczucia mentalnego i fizycznego, procesów poznawczych i napięcia w autonomicznym układzie nerwowym (tętno, ciśnienie krwi, przewodność skóry i temperatura palca). Wyniki systematyczne wywołane symulowanym migotaniem były porównywalne w obu grupach wystawionych na oddziaływanie migotania. Stwierdzono, że migotanie wywołuje reakcje fizyczne oraz wpływa na zaburzenia funkcji poznawczych.

Jest więc jasne, że migotanie cieni może wywoływać dolegliwości lub być dokuczliwe dla niektórych osób, szczególnie, jeżeli osoby te nie są uczestnikami projektu wiatrowego (nie czerpią korzyści ekonomicznych ani nie pozyskują energii elektrycznej z turbiny), jeżeli ich działki graniczą z terenem, na którym pracuje turbina. Dodatkowym problemem są błyski (zjawisko blisko związane z migotaniem cieni, ale powodowane refleksami promieni słonecznych – patrz Załącznik B), jeżeli turbiny są postawione zbyt blisko autostrad lub innych dróg. Może to powodować niebezpieczne warunki dla kierowców. W związku z tym, turbiny lokowane blisko autostrad winny być tak rozplanowane, aby dla bezpieczeństwa kierowców

zredukować błyski w możliwe największym stopniu. Problem ten w znacznym stopniu redukuje powszechne stosowanie łopat nisko refleksyjnych. Środki umożliwiające zapobieganie wielu z tych potencjalnych problemów zdrowotnych są stosowane jako aktualna praktyka w pracach planistycznych, przy zastosowaniu oprogramowania takiego jak WindPro. Programy te mogą dokładnie określić stopień migotania cieni opierając się na wprowadzonych szczegółowych analizach terenu, planowanej lokalizacji turbiny, projektu turbiny (wysokość, długość, wysokość piasty, średnica wirnika i szerokość łopat) oraz rozmieszczenia domów i dróg. Wiele z tych programów komputerowych może następnie tworzyć mapy wskazujące miejsce i zasięg padania migotania cieni. Te programy mogą również podać szacowany czas w minutach na dzień i godzinach na rok przewidywanego migotania cieni, co może być użyte do planowania lokalizacji turbiny wiatrowej lub do łagodzenia skutków jej budowy. Wiele państw wymaga wykonania takich analiz przed wdrożeniem projektów nowych turbin.

3.4.b.ii Podsumowanie wpływu migotania

Podsumowując, chociaż migotanie cieni może być znaczącą dokuczliwością, szczególnie dla ludzi nie czerpiących korzyści z projektu turbiny wiatrowej, zebrane dowody sugerują, że nie ma zagrożenia napadami chorobowymi wywołanymi przez migotanie cienia powodowanego przez turbiny wiatrowe. Ponadto istnieją ograniczone dowody, dostarczone przez badanie sponsorowane przez rząd Niemiec (Pohl et al., 1999) wskazujące, że przedłużone migotanie cieni (dłuższe, niż 30 minut) może wywoływać przemijające, związane ze stresem upośledzenie funkcji poznawczych (koncentracja, uwaga) oraz funkcjonowania autonomicznego układu nerwowego (tętno, ciśnienie krwi). Nie istnieje wystarczająca dokumentacja pozwalająca na ocenę nielicznych sprawozdań dotyczących dodatkowych skutków zdrowotnych, takich jak migreny, nudności, zawroty głowy lub dezorientacja. Istnieją za to udokumentowane metody łagodzenia skutków migotania cieni z turbin wiatrowych, i te metody są przedstawione w Załączniku B.

3.4.c Miotanie lodem i potencjalne skutki zdrowotne

W pewnych warunkach pogodowych na łopatach turbin wiatrowych może się formować lód. Generalnie, turbiny wiatrowe przewidziane dla instalacji w miejscach, gdzie lód może się formować, są tak zaprojektowane, aby w przypadku znaczącego oblodzenia łopat wyłączały się. Środkami zapobiegającymi pracy podczas oblodzenia mogą być czujniki lodu i czujniki drgań. W większości turbin wiatrowych pracujących w zimnym klimacie stosowane są czujniki oblodzenia. Czujniki drgań są stosowane niemal we wszystkich turbinach wiatrowych. Mogą one spowodować

zatrzymanie turbiny, na przykład jeżeli powstające oblodzenie powoduje brak wyważenia wirnika i wynikające z tego wyczuwalne drgania konstrukcji.

Lód nabudowany na łopatach podczas postoju turbiny normalnie się z nich zsuwa. Jeżeli występuje to podczas silnego wiatru, lód może być zdmuchnięty przez wiatr na pewną odległość od turbiny. W dodatku można sobie wyobrazić, że w pewnych warunkach lód może być odrzucony przez poruszającą się łopatę turbiny wiatrowej, chociaż największe prawdopodobieństwo takiego zdarzenia występuje tylko podczas uruchamiania (gdy prędkość obrotowa jest stosunkowo mała) lub jako wynik uszkodzenia systemu sterowania. Dlatego trudno jest określić jednoznacznie ile wynosi maksymalna prawdopodobna odległość, na jaką kawałek lodu może być odrzucony od turbiny w dwóch „najgorszych przypadkach”: 1) lód odrywa się od nieruchomej turbiny podczas bardzo silnego wiatru oraz 2) lód jest nagle oderwany od łopaty podczas obracania się wirnika z normalną prędkością roboczą.

Lód stanowi zagrożenie fizyczne, które zależnie od masy grudy lodowej, jej prędkości i kąta rzucania może wywołać różne niebezpieczne skutki dla ludzi: strach, niespodziane otarcia, uszkodzenia organów, wstrząs lub nawet śmierć. Dlatego zapobieganie miotaniu lodu jest niezwykle istotne. Więcej szczegółów odnośnie miotania lodu i możliwości łagodzenia tego zjawiska są przedstawione w Załączniku C.

3.5 Skutki hałasu i wibracji na modelach zwierzęcych

Zwierzęta domowe, takie jak koty i psy, doskonale wyzuwają wszelkie problemy warunków środowiskowych. Panel szukał literatury, która opisywałaby nie laboratoryjne badania na zwierzętach lub dobrze udokumentowane przypadki zwierząt poddanych oddziaływaniu turbin wiatrowych. Nieliczne informacje prasowe o zdychaniu kóz (Wielka Brytania), oraz o poronieniach i chorobach krów (Japonia, USA) wskazują na poszlakowe dowody, ale nie podają szczegółów dotyczących podłoża chorób ani zasięgu oddziaływania.

Laboratoryjne modele badań na zwierzętach często są stosowane do przewidywania i rozwijania mechaniki przypadków chorób wywoływanych przez czynniki zewnętrzne, takie jak hałas czy chemikalia. Ze względu na brak solidnych danych epidemiologicznych, badania prowadzone na zwierzętach mogą przyczynić się do opracowania kompleksowych odpowiedzi biologicznych. Badania prowadzone na zwierzętach mają jednak poważne ograniczenie, szczególnie dla punktów końcowych badania dotyczących funkcjonowania mózgu. Korzyści ze stosowania modeli zwierzęcych obejmują łatwe wykonywanie badań doświadczalnych, takich jak wielokrotne wystawianie na oddziaływanie, typowe dobrze kontrolowane warunki prowadzenia doświadczenia

oraz genetycznie identyczne grupy zwierząt.

Ocena biologicznego prawdopodobieństwa wielu zgłaszanych skutków zdrowotnych turbin wiatrowych wymaga odpowiedniego modelu zwierzęcego, udokumentowanego danymi wskazującymi na istnienie związku przyczynowo-skutkowego. Przegląd literatury rozpoczęto od portali PubMed i ToxNet szukając słów kluczowych „turbina wiatrowa” i „turbiny wiatrowe”; lub „infradźwięki” lub „hałas o niskiej częstotliwości”; oraz „zwierzęta” lub „ssaki”. Celem poszukiwań było znalezienie opublikowanych wyników badań naukowych, w których zwierzęta laboratoryjne były wystawione na działanie hałasu lub wibracji zbliżonych do pochodzących z turbin wiatrowych. Panel zapoznał się z tytułami i streszczeniami znalezionych prac w celu dokonania pierwszej selekcji prac, które były badaniami na ssakach lub mogły zawierać interesujące odniesienia do innych badań. Znalaziono wiele badań, z których większość nie była pracami naukowymi, nie dotyczyły ssaków lub nie były badaniami doświadczalnymi, chociaż przywoływano w nich badania prowadzone na zwierzętach lub na ślimakach. Przegląd literatury pozwolił znaleźć osiem prac naukowych opisujących badania przeprowadzone na szczurach laboratoryjnych. Prace podzielono na dwie grupy – przeprowadzone w latach siedemdziesiątych i na początku lat osiemdziesiątych oraz przeprowadzone w latach 2007-2010. Najnowsze badania wykonano w Chinach i były one zlecone przez Państwową Fundację Nauk Przyrodniczych Chin. Tablica AG.1 (w załączniku G) podaje podsumowanie wyników tych badań.

Nie ma ogólnej zgody co do specyficznego oddziaływania biologicznego infradźwięków na gryzonie, chociaż przy wysokich dawkach infradźwięki zdają się wywoływać negatywny wpływ na układ sercowo krążeniowy, mózg i układ oddechowy (Sienkiewicz, 2007). We wcześniejszych badaniach nie podano natężenia infradźwięków jakiemu poddano szczury, nie opisano ogólnych patologii wynikłych z ekspozycji na infradźwięki i pominięto grupy kontrolne. Od tego czasu naukowcy koncentrowali się na mózgu i układzie krążenia jako najbardziej podatnych na oddziaływanie infradźwięków. W tych badaniach jednak brak jest udokumentowanego uzasadnienia doboru i zastosowania infradźwięków z zakresu 5-15 Hz przy 130 dB. Wydaje się to być standardowym podejściem, jednak nie jest jasne znaczenie i odpowiedniość tych częstotliwości i poziomu hałasu, zarówno dla szczurów jak i dla ludzi. Ekspozycja miała ostry charakter – była to krótkoterminowa, wysoka dawka. Badacze nie dokumentowali zachowania szczurów (w tym odruchu obronnego), patologii, toksyczności i wyników związanych z ekspozycją na oddziaływanie. Dlatego interpretacja wszystkich danych z badań na zwierzętach musi być przeprowadzona przez pryzmat ekspozycji ostrej i krótko-terminowej, które nie przekładają się jednoznacznie na skutki chronicznej ekspozycji na niskie dawki.

(Pei et al., 2007 i 2009) badał zmiany w strukturze komórkowej i funkcjonowaniu serca u

dorosłych samców szczurów z hodowli Sprague-Dawley, wystawionych na działanie infradźwięków o częstotliwości 5 Hz przy 130 dB przez 2 godziny przez 1, 7 lub 14 kolejnych dni. Wyizolowane enzymatycznie miocyty pobrano z lewej komory serca dorosłego szczura. Zastosowano technikę ustalania potencjału komórki do pomiaru przewodnictwa w kanałach jonowych dla wapnia Ca^{2+} (typu L-). Przedmiotem tych badań było określenie, czy niekorzystny efekt oddziaływania się kumuluje, co zmierzono sprawdzając napływ wapnia do miocytów. Po ekspozycji na infradźwięki u szczurów z grup 7-dniowej i 14-dniowej odnotowano statystycznie istotne zmiany w wewnątrzkomórkowej homeostazie wapnia Ca^{2+} w miocytach, co wykazano na drodze elektrochemicznej stymulacji komórek, identyfikacji molekularnej poziomu białek specyficznych dla serca oraz poprzez pomiar transportu wapnia.

Kilka prac poświęcono badaniu skutków, jakie wywierają infradźwięki na zachowanie się szczurów. Pierwsze z nich przeprowadzono w prymitywnych warunkach akustycznych w porównaniu z dzisiejszymi (Petounis et al., 1977). Badacze sprawdzali zachowanie dorosłych samic szczurów (niepodanej rasy) wystawionych na wzrastające oddziaływanie infradźwięków (2 Hz, 104 dB; 7 Hz, 122 dB; i 16 Hz, 124 dB) przez wzrastający czas (od 5 minut aż do 120 minut). Wraz ze wzrostem dawki i czasu odnotowano u zwierząt spadek poziomu aktywności (senność) i zmiany w zachowaniach poznawczych. Autorzy nie wspomnieli, że z tymi zachowaniami wiążą się objawy kliniczne obejmujące ból, co nasuwa pytanie, czy ekspozycja na wysokie dawki jest w przypadku naszych rozważań istotna. Odnosząc się do tego i podobnych badań, w których obserwowano wzmoczoną senność, wzrost zachowań ostrożnych oraz tłumienie aktywności ruchowej, Spyra et al., (1977) postawili hipotezę, że te takie reakcje są zależne od poziomu noradrenaliny w mózgu i dla potwierdzenia tej tezy przeprowadzili doświadczenie, w którym przez jedną godzinę poddawali dorosłe szczury rasy Wistar ekspozycji na wzrastające dawki infradźwięków. Stężenie noradrenaliny w shomogenizowanej tkance mózgowej zmierzili metodą fluorymetryczną. Badacze udowodnili, że poziom noradrenaliny w mózgu szczurów wystawionych na działanie infradźwięków spada wraz ze wzrostem ekspozycji, poczynając od dawki 7 Hz przy 122 dB przez jedną godzinę. Nie odnotowano obserwacji stanów klinicznych. Liu et al., (2010) postawili tezę, że skoro infradźwięki mogą wpływać na mózg, potencjalnie mogą przyczyniać się do wzrostu namnażania komórek (neurogenezy) w zawoju zębatym hipokampu szczura, szczególnie w rejonie generowania nowych komórek neuronowych u dorosłych samców szczurów z hodowli Sprague-Dawley. Stosując czas ekspozycji wydłużony do 2 godzin dziennie przez 7 dni przy 16 Hz i 130 dB, zauważono, że wystawienie na infradźwięki powstrzymuje namnażanie komórek w zawoju zębatym, ale nie wpływa na migrację i różnicowanie komórek. Badanie to nie objęło odpowiednich pozytywnych i negatywnych populacji kontrolnych, dlatego wyciągnięcie takiego wniosku jest nieuprawnione.

Kilka niepublikowanych lub nienaukowych badań koncentruje się na reakcjach behawioralnych związanych z ekspozycją na infradźwięki. Dane te nie zostały omówione, ale stanowią podstawy dla kolejnych, nowszych badań. W kolejnych, naukowych badaniach behawioralnych szczurów, dorosłe samce szczurów rasy Wistar zostały podzielone według wytrzymałości na przyspieszającej bieżni obrotowej na „wyjątkowo wytrzymałe” oraz „mało wytrzymałe” (Yamamura et al., 1990). Szczury poddawano oddziaływaniu różnych częstotliwości i ciśnienia akustycznego przy ekspozycji przez 60-150 minut. Porównując wytrzymałość szczurów na bieżni przed ekspozycją z wytrzymałością tych samych szczurów po wystawieniu na oddziaływanie infradźwięków okazało się, że wytrzymałość silniejszej grupy wystawionej na oddziaływanie 16 Hz przy 105 dB nie obniżyła się. Wytrzymałość słabszej grupy spadła po wystawieniu jej na oddziaływanie 16 Hz przy 105 dB na 10 minut, 16 Hz przy 95 dB na 70 minut i 16 Hz przy 85 dB na 150 minut. W tym przypadku istotna jest identyfikacja podgrup szczurów, które są bardziej podatne na oddziaływanie infradźwięków z powodów skłonności genetycznych. Nie przeprowadzono dalszych badań dotyczących podatności na takie oddziaływanie w ramach jednego szczepu.

Nowsze badania są ukierunkowane na mechanizmy, którymi infradźwięki mogą zakłócać normalną pracę mózgu. Jak podano wyżej, w badaniach tych bada się skutki ostrej ekspozycji, przez krótki czas w wysokich dawkach. Naukowcy powinni przynajmniej udokumentować zachowania szczurów, patologie, stany kliniczne i rezultaty wystawienia na duże dawki oraz zbadać specyficzne skutki wewnątrzkomórkowe.

Niektóre z biologicznych badań nad stresem sugerują, że przy dużym stresie następuje pobudzenie komórek mikroglejowych, jednak wydaje się, że pobudzenie to jest krótkotrwałe i tylko przejściowo wpływa na autonomiczny układ nerwowy oraz układ neuroendokrynologiczny, wywołując wiele różnych skutków. W celu zbadania skutków oddziaływania infradźwięków na uczenie się i procesy pamięciowe zależne od hipokampu, Yuan et al. (2009) zmierzili procesy poznawcze i aktywację ścieżek sygnalizacji komórkowej w celu określenia roli ścieżki neuronowej transdukcji sygnału BDNF-TRkB w wywoływanym przez infradźwięki uszkodzeniu pamięci i zdolności do uczenia się u szczurów. Dorosłe samce szczurów z hodowli Sprague-Dawley zostały wystawione na działanie infradźwięków o częstotliwości 16 Hz przy 130 dB przez 2 godziny dziennie, przez 14 dni. Warunki akustyczne były dobrze monitorowane i prawidłowo udokumentowane. Dla określenia szybkości i stabilności orientacji przestrzennej wykorzystano labirynt wodny Morrisa, natomiast do badania procesów proliferacji komórek i koncentracji białek w ścieżkach sygnalizacji komórkowej użyto technik molekularnych. Po zastosowaniu takich ilościowych metod u szczurów wystawionych na oddziaływanie infradźwięków w badaniu labiryntowym stwierdzono upośledzenie zdolności uczenia się i zapamiętywania przestrzennego

(zależnych od hipokampu) w porównaniu ze szczurami kontrolnymi nie wystawionymi na infradźwięki, a także istotne obniżenie sprawności BDNF-TRkB i spowolnienie proliferacji komórek znakowanych BrdU w zawoju zębatym mózgu.

W innym badaniu Du et al. (2010) stawiają hipotezę, że komórki mikroglejowe mogą być odpowiedzialne za stres wywoływany infradźwiękami. Aby zbadać tę hipotezę, 60 dorosłych samców szczurów z hodowli Sprague-Dawley wystawiono na 2 godziny na działanie infradźwięków o częstotliwości 16 Hz przy 130 dB w komorze infradźwiękowej. Na sekcjonowanych mózgach szczurów zbadano jądro podwzgórza przykomorowego (PVN). Pierwotne linie komórek mikroglejowych wyizolowano z całych mózgów noworodków szczurów i hodowano na pożywkach przed ich ekspozycją na infradźwięki, prowadzoną w takich samych warunkach, jak ekspozycja żywych osobników. Metody molekularne zostały wykorzystane do określenia obecności i poziomów białek wskazujących na stres biologiczny (hormon CRH wpływający na uwalnianie kortykotropiny oraz receptor CRH-1 hormonu wpływający na uwalnianie kortykotropiny) w obszarach mózgu kontrolujących odpowiedź na stres. W szczególności przeprowadzono badania, które miały określić czy komórki mikroglejowe biorą udział w reakcji na infradźwięki, jak przebiegają zmiany aktywności mikroglejowej oraz jak wygląda ekspresja CRH-R1 in vivo w jądrze podwzgórza przykomorowego oraz in vitro po dwu-godzinnej ekspozycji na infradźwięki. Zebrane dane wskazują, że ekspozycja na infradźwięki prowadzi do aktywacji komórek mikroglejowych, która rozpoczyna się po pół godzinie od wystawienia, oraz do indukcji ekspresji CRH-R1. Siła reakcji wzrastała istotnie przez 6 godzin po ekspozycji, powracając do poziomu kontrolnego w 24 godziny po ekspozycji na infradźwięki. Badanie było kontrolowane i chociaż koncentrowało się na specyficznych antagonistach analizując rolę neuronów i komórek mikroglejowych, można na jego podstawie wnioskować, że infradźwięki zastosowane w tym badaniu u szczurów mogą aktywować komórki mikroglejowe, co sugeruje istnienie mechanizmu wywołującego „stres” lub dolegliwości fizyczne po ekspozycji na infradźwięki (np. prozapalna cytokineza wywołująca reakcję chorobową).

Podsumowując, nie przeprowadzono badań, w których zwierzęta doświadczalne byłyby wystawione na warunki podobne do oddziaływania turbin wiatrowych. Badania laboratoryjne na zwierzętach nie dostarczają wystarczających danych dla wykazania wpływu hałasu o niskiej częstotliwości na układ oddechowy. Istnieją ograniczone dowody na to, że wyniki badań na szczurach mogą być transponowane na odpowiednie wyniki dla ludzi w przypadku badania oddziaływania infradźwięków. W Załączniku G przedstawiono specyficzne warunki tych badań. W każdym przypadku poziomy infradźwięków i warunki, na które były wystawione gryzonie, wywoływały u zwierząt ból. W przypadku ekspozycji na taki poziomy infradźwięków, istnieją pewne dowody potwierdzające odwracalne skutki molekularne, w tym krótkotrwałe zmiany

biochemiczne w komórkach serca i mózgu, sugerujące istnienie mechanizmu oddziaływania infradźwięków w wysokich dawkach na szczury.

3.6 Zgłoszenia występowania negatywnych skutków zdrowotnych wywołanych przez hałas i wibracje

W mediach znajduje się duża liczba artykułów opisujących przypadki negatywnego wpływu na ludzkie zdrowie hałasu i wibracji z turbin wiatrowych. W tej sekcji Panel sprawdza podstawy fizyczne i biologiczne dla tych stwierdzeń. Dodatkowo, Panel analizuje artykuły naukowe, z których te twierdzenia są wyprowadzane, pod względem zastosowanych metod i ich ograniczeń.

Odnosząc się do „syndromu turbin wiatrowych” i jego wpływu na układ przedsionkowy, niektóre źródła powołują się na Pierponta (2009), który miał dostarczyć dowody fizycznych skutków oddziaływania dźwięków niskich częstotliwości w postaci zaburzeń układu sensorycznego dotyczących wzroku, ucha wewnętrznego oraz receptorów dotyku i nacisku w różnych miejscach ciała. Podstawy dla określenia syndromu pochodzą z danych z badań przeprowadzonych dla innych celów (np. misje kosmiczne), niż ocena wpływu turbin wiatrowych na ludzkie zdrowie. Takie badanie może być cenne dla zrozumienia nowych warunków, jednakże, jeżeli dane nie są zaprezentowane w sposób kompletny, może to prowadzić do niewłaściwych wniosków. Poniżej omówiono kilka takich przypadków:

Pierpont (2009) podaje, że von Dirke and Parker (1994) wykazali, że obszar śródbrzusza rezonuje przy częstotliwościach pomiędzy 4 i 6 Hz oraz że turbiny wiatrowe wytwarzają infradźwięki w tym zakresie (na skutek tempa obrotu łopat). Jednakże w swojej pracy von Dirk zauważył, że nasze ciała wytworzyły tolerancję dla zakresu ruchu śródbrzusza przy częstotliwości 4 – 6 Hz: jest to taki sam zakres drgań, jakie generowane są podczas joggingu i biegania. Artykuł również twierdzi, że choroba lokomocyjna (która była celem badania) rozwija się tylko wtedy, gdy człowiek jest narażony na wibracje o częstotliwości pomiędzy 0,01 a 0,5 Hz. W badaniu wystawiono ludzi na wibracje siły 1 G o zmiennym kierunku. Ochotnicy byli również obracani dookoła różnych osi, aby osiągnąć poziom wibracji i częstotliwości wymagane dla przeprowadzenia badania. Interpretacja tych danych pozwala wyciągnąć wniosek, że wprawdzie obszar śródbrzuszy wpada w rezonans przy infradźwiękach takich, jak emitowane przez turbiny wiatrowe, jednak nie ma to wpływu na ludzki organizm. Ponadto, infradźwięki emitowane przez turbiny wiatrowe leżące w zakresie częstotliwości, w którym odnotowano przypadki choroby lokomocyjnej u osób badanych charakteryzują się niższą wartością bezwzględną, niż poziom wywołujący chorobę lokomocyjną (patrz Tabela 2). Wprawdzie widać pewne powiązanie, ale na obecnym etapie posiadane dowody nie pozwalają wysnuć wniosku, że obszar śródbrzuszy może wpaść w rezonans na skutek

infradźwięków z turbiny wiatrowej. Gdyby tak się stało, mogłoby to prowadzić do choroby lokomocyjnej.

Pierpont (2009) przywołuje badania wykonane przez Todda et al. (2008) jako potencjalny dowód na to, że ucho wewnętrzne może odgrywać pewną rolę w powstawaniu „Syndromu Turbiny Wiatrowej”. Praca Todd et al. (2008) wykazała, że zmysł równowagi najlepiej reaguje na częstotliwości około 100 Hz. Jest to prawdę, jednak nie wiadomo jaki to ma związek z hałasem o niskiej częstotliwości generowanym przez turbiny wiatrowe. Najlepsza reakcja na częstotliwość została określona w badaniu, w którym poruszano głowami ochotników (przez popukiwanie) w bardzo specyficznym kierunku, ponieważ omawiana część ucha wewnętrznego działa jak czujnik grawitacyjny lub akcelerometr; dlatego reaguje na ruch. Nie znamy fizycznego mechanizmu, dzięki któremu słyszalne dźwięki o częstotliwości 100 Hz generowane przez turbinę wiatrową mogłyby przedostawać się do ludzkiego ciała tak, aby powodować ruch niezbędny do wywołania reakcji ucha wewnętrznego.

Niedawno Salt i Hullar (2010) badali fizyczne cechy ucha, które mogłyby reagować na częstotliwości infradźwiękowe. Badacze opisali, jak zewnętrzne (OHC) i wewnętrzne (IHC) komórki rzęstate ślimaka ucha reagują na różne rodzaje pobudzania: komórki wewnętrzne reagują na prędkość, natomiast zewnętrzne na przemieszczenie. Wykazali, że OHC reaguje na częstotliwości niższe niż IHC oraz przedstawili mechanizm w jaki OHC działa jak wzmacniacz dla IHC. Ich zdaniem niskie częstotliwości obecne w sygnale dźwiękowym mogą zamaskować wyższe częstotliwości, przypuszczalnie dlatego, że OHC nie wzmacnia prawidłowo wyższych częstotliwości kiedy jednocześnie musi reagować na zaburzenia o niskiej częstotliwości. Jakkolwiek badacze przyznają, że „wprawdzie komórki rzęstate są bardzo czułe na niskie częstotliwości, generalnie nie reagują na infradźwięki przenoszone przez powietrze. Reagują one raczej na sygnały mechaniczne powstające na skutek ruchów głowy i zmian pozycji, gdyż odpowiadają za utrzymanie postawy i położenia oczu.” Nie wiadomo jak reagują nieliczne ścieżki łączące OHC z mózgiem (95% istniejących połączeń to połączenia pomiędzy IHC i mózgiem). W obecnym stanie wiedzy specjaliści ucha wewnętrznego nie wiedzą, czy i jak infradźwięki przenoszone w powietrzu mogą oddziaływać na ucho wewnętrzne. Jest możliwe, że OHC reaguje na infradźwięki, ale rola odgrywana przez połączenia pomiędzy OHC a mózgiem pozostaje nieznana. Ponadto nie udowodniono, że modulacja dźwięku odbieranego przez IHC może wywoływać nudności, bóle czy zawroty głowy.

Przy omawianiu dźwięków modulowanych amplitudowo zauważono, że turbiny wiatrowe generują słyszalne dźwięki o niskiej częstotliwości (20-200 Hz). Wykazano, że poziom dźwięku w tym zakresie generowany przez niektóre turbiny wiatrowe jest powyżej zakresu, w którym osoby

poddane badaniom w Korei uskarżały się na skutki psychologiczne (Jung & Cheung, 2008). O'Neal (2011) wykazał także, że poziom ciśnienia akustycznego dla częstotliwości pomiędzy 30 i 200 Hz z dwóch nowoczesnych turbin wiatrowych w odległości około 310 m od turbin jest wyższy od progu słyszalności, ale niższy niż próg, przy którym szyby mogą brzęczeć lub mogą powstawać inne widoczne wibracje. Zagadnienie wibracji jest bardziej szczegółowo omówione w kolejnej sekcji. Zauważono, że to hałas o modulowanej amplitudzie prawdopodobnie jest podłożem skarg na rozdrażnienie. Ponadto, hałas o modulowanej amplitudzie może być źródłem zakłóceń snu zgłaszanych przez respondentów w badaniach ankietowych. Jednakże nie wykazano bezpośrednich skutków zdrowotnych.

3.6.a Wibracje

Choroba wibroakustyczna (VAD) w publikacji Pierponta została uznana za potencjalny skutek zdrowotny oddziaływania turbin wiatrowych. Większość bibliografii do pracy dotyczącej VAD to publikacje Branco i Alves-Pereiry, chociaż opracowanie cytuje także prace Takahashi (2001) i Hedge'a i Rasmussena (1982). We wszystkich tych badaniach koncentrowano uwagę na takich źródłami silnych wibracji jak młoty udarowe i inne ciężkie wyposażenie. Ostatnie cytowane prace koncentrowały się na wysokim poziomie wibracji o niskiej częstotliwości i na hałasie. Rasmussen badał reakcje ludzi na drgania podłóg i krzeseł. Ruchy drgające w tym badaniu były rzędu 0,01 cm (czyli 1000 razy większe, niż ruchy stwierdzone w badaniu sejsmicznym w odległości 100 m od farmy wiatrowej – Styles et al., 2005). Takahashi wykorzystał głośniki umieszczone 2 m od badanych osób i badał tylko częstotliwości słyszalne 20-50 Hz, stosując poziom ciśnienia akustycznego rzędu 100-110 dB (a więc około 30 dB więcej, niż jakikolwiek zmierzony dźwięk turbiny wiatrowej w tym zakresie częstotliwości) a jego celem było wywołanie wibracji w różnych punktach ciała. Praca Hedge'a nie jest badaniem, ale wykazem punktów jak an wykładzie z ergonomii, dla których nie dodano żadnych odniesień. Praca Branco różni się tym, że autorka badała bardzo długie okresy ekspozycji na średnio intensywne drgania. Być może istnieją potencjalne powiązania tych zjawisk z turbinami wiatrowymi, ale obecnie nie ma na nie dowodów, jeżeli weźmiemy pod uwagę, że turbiny wiatrowe generują bardzo niskie poziomy drgań i przenoszonych w powietrzu dźwięki niskich częstotliwości.

O ile nie ma dowodów na powiązanie wibracji z chorobą wibroakustyczną, o tyle jest niewykluczone, że pewne poziomy wibracji mogą prowadzić do rozdrażnienia lub odczuwania niepokoju. Dowody na potwierdzenie takiego wniosku omówiono poniżej.

Pierpont odwołuje się do pracy autorstwa Findeisa i Petersa (2004). Opracowanie to opisuje

przypadek z Niemiec, w którym badano zgłoszenia dotyczące denerwujących dźwięków i wibracji poprzez pomiary wibracji i akustyki w budynkach. Stwierdzono, że ludzie narzekali na wibracje które nie były słyszalne. Dane zamieszczone w tekście wskazują, że źródłem zakłóceń był dźwięk powstający w konstrukcji, który promieniował przez ściany i podłogi na poziomach odpowiadających 65 dB przy 10 Hz i 40 dB przy 100 Hz. Poziom 10 Hz jest tuż poniżej poziomu słyszalności, natomiast poziom przy 100 Hz jest już ponad poziomem słyszalności. Autorzy doszli do wniosku, że zaburzenia były wynikiem drgań systemu wentylacyjnego bezpośrednio przylegającego do budynku.

Raport Findeisa i Petersa (2004) jest zbieżny z opracowaniami badającymi „nawiedzone” domy (Tandy, 1998, 1999). W tamtych badaniach zidentyfikowano w pokojach częstotliwości około 18 Hz. Badanie stawia hipotezę, że opisywane przez świadków widma było wynikiem wibracji oka (oczy są wrażliwe na częstotliwość 18 Hz) wywoływanej przez pole wibracyjne pokoju. W jednym z przypadków źródłem wibracji okazał się wentylator sufitowy, a w drugim przypadku nie zidentyfikowano źródła wibracji.

Gdy w przywołanym wyżej badaniu zidentyfikowano źródło wibracji, okazało się, że niepokój wywołał zwyczajny mechanizm reakcji fizycznych. W innych sytuacjach przyjęto, że budowle podlegają wpływom zaburzeń przenoszonych przez powietrze. Sprawozdanie NASA z 1982 roku podaje dane oszacowujące konieczny poziom ciśnienia akustycznego przy różnych częstotliwościach dla wywołania wibracji szyb, ścian i podłogi typowego budynku (Stephens, 1982). Dane zamieszczone na stronie 14 tego sprawozdania wskazują, że poziom infradźwięków 70-80 dB może indukować wibracje ścian i podłogi. Na stronie 39 podano również kilka poziomów wibracji podłogi, które były wiązane z turbiną wiatrową. Na wykresie były to najniższe poziomy wibracji w porównaniu z wibracjami wywołanymi hałasem samolotu i uderzenia dźwiękowego. Inne dane na stronie 43 pokazują wibracje i ich odbiór w całym zakresie częstotliwości infradźwięków. Także w tym przypadku dane dotyczące turbiny wiatrowej są poniżej linii percepcji.

Drugi raport techniczny (Kelley, 1985) z tego okresu opisuje zakłócenia pochodzące z turbiny wiatrowej MOD-1 w Boone, w Północnej Karolinie. Była to turbina pracująca z wiatrem zbudowana na wieży kratownicowej. Spośród 1000 domów w promieniu 2 km, w 10 domach odczuwano wibracje w pewnych warunkach wiatrowych. Przeprowadzono dokładne pomiarowy, które wykazały, że rzeczywiście w tych kilku domach odnotowano wibracje związane z hałasem impulsowym typowym dla turbin pracujących z wiatrem. Sprawozdanie zawiera kilka ustaleń, między innymi: 1) zakłócenia odczuwane w domach były związane z impulsowymi dźwiękami wytwarzanymi przez turbinę (z powodu interakcji strumienia i łopaty) a nie przez fale sejsmiczne, 2) sygnał impulsowy dostarczał energię ośrodkom drgań takim jak pokoje, podłogi i

ściany, gdzie te podłogi i ściany stanowiły jedyny ośrodek w zakresie infradźwiękowym, 3) ludzie raczej odczuwali zakłócenia, niż je słyszeli, 4) szczytowe wartości vibracji zmierzono w zakresie częstotliwości 10-20 Hz (rezonans podłóg/ścian) i wywnioskowano, że wzbudzona została ściana zwrócona na turbinę, 5) fakt, że dotkniętych tym zjawiskiem było tylko 10 domów z 1000 (rozlokowanych w różnych kierunkach dookoła turbiny), miał być powiązany ze skomplikowanymi ścieżkami rozchodzenia się dźwięku, oraz 6) mimo że poświęcono wiele uwagi kształtowi impulsu i wykazano, że był on przyczyną vibracji konstrukcji, w raporcie stwierdzono, że sygnały nie-impulsowe z energią o odpowiedniej częstotliwości mogą przenikać przez konstrukcję. Raport opisuje przypadek ze stanu Oregon, gdzie przepływ spalin w kominie elektrowni z turbinami gazowymi wpadał w rezonans z niską modulacją dźwięku, doprowadzając osoby mieszkające w pobliżu elektrowni do rozdrażniania. Ponownie okazało się, że konstrukcje pobliskich budynków były wzbudzane, w tym przypadku przez nie-impulsowe pole akustyczne. Jest to ważne spostrzeżenie, ponieważ współczesne turbiny wiatrowe nie generują dźwięków impulsowych z dużą zawartością impulsów akustycznych o częstotliwości około 20 Hz, jak miało to miejsce w przypadku turbiny w Północnej Karolinie. Nowoczesne turbiny generują dźwięk o modulowanej amplitudzie około 1 kHz jak również infradźwięki szerokopasmowe (van den Berg, 2004). Infradźwięki szerokopasmowe, które również były generowane przez turbinę z Północnej Karoliny, nie stanowiły źródła zakłóceń, podobnie jak dźwięki o modulowanej amplitudzie. Tak więc, mimo że można porównywać turbiny do elektrowni z turbinami gazowymi i do systemów wentylacyjnych, w których impulsowanie dźwięków było inne, nie można sformułować bezpośredniego wniosku dotyczącego wpływu współczesnych turbin wiatrowych na wywoływanie vibracji w domach.

Najnowsze opracowanie autorstwa Bolina i in. (2011) stanowi przegląd obszernej literatury na temat niskich częstotliwości poświęconej współczesnym turbinom wiatrowym i stwierdza, że wszystkie pomiary wewnętrznych i zewnętrznych poziomów dźwięku nie zakładają takiego samego wzmocnienia i dzwonienia o częstotliwościach związanych z rezonansem konstrukcji podobnym do odkrytego w Północnej Karolinie. Dźwięk wewnątrz budynku jest z reguły słabiej słyszalny niż na zewnątrz. Bolin et al. (2011) zauważyli, że pomiary wskazują, że generowane przez turbiny wiatrowe dźwięki niskich częstotliwości mierzone wewnątrz budynków z reguły mieszczą się w krajowych normach (np. w duńskiej normie dopuszczającej poziom 44 dB(A) na zewnątrz budynku). Jednakże nie wyklucza to sytuacji, w której zmierzone poziomy przekroczą normy. Badacze proponują przeprowadzenie dalszych badań poszczególnych budynków mieszkalnych, jeżeli zmierzona różnica pomiędzy C-ważonym i A-ważonym poziomem ciśnienia akustycznego na zewnątrz przekracza 15 dB. Podobne kryterium przyjęto w raporcie

Kampermana i in. (2008), który jednak nie wyczerpuje znamion pracy naukowej.

Ścisłe powiązane z wibracjami jest brzęczenie szyb. Ten temat jest opisany w sprawozdaniu NASA omówionym powyżej (Stephens, 1982) a także w artykułach Junga i Cheunga (2008) oraz O'Neal'a (2011). W tych pracach stwierdzono, że brzęczenie szyb jest często powodowane przez wibracje o częstotliwości pomiędzy 5 a 9 Hz, a pomiary w pobliżu turbin wiatrowych wskazują, generowana energia mieści się w tym zakresie, więc może powodować brzęczenie szyb. Nie wiadomo, czy brzęczące szyby mogą z kolei generować w pomieszczeniu własne pole akustyczne o amplitudzie wystarczająco wysokiej do wywołania zakłóceń odczuwalnych dla człowieka.

Zbadano zapis sejsmiczny wibracji w Północnej Karolinie. W tym badaniu wykluczono fale sejsmiczne jako mające zbyt niską amplitudę do wzbudzenia wibracji w pomieszczeniu. Dwa niezależne zestawy pomiarów przeprowadzonych w pobliżu farm wiatrowych przez nadzwyczaj czułe stacje sejsmiczne miały ocenić potencjalny wpływ aktywności sejsmicznej (Styles, 2005, Schofield, 2010). Jedno badanie przeanalizowało zarówno fale podróżujące w głąb ziemi jak i akustycznych fal powierzchniowych, wykazując, że dominującym źródłem ruchów sejsmicznych są fale Rayleigh'a propagujące się bezpośrednio przez wieżę, i że infradźwięki rozchodzące się w powietrzu nie odgrywają roli w tworzeniu mierzalnych ruchów sejsmicznych. Obydwa sprawozdania wskazują, że w odległości około 100 metrów od farm wiatrowych (>6 turbin) maksymalny indukowany ruch wynosi 120 nanometrów (przy około 1 Hz). Nanometr to 10^{-9} metra. Oznacza to przesunięcie gruntu o $1,2 \times 10^{-7}$ m. Do wykrycia tych minimalnych ruchów użyto nadzwyczaj czułych urządzeń pomiarowych. Aby wyobrazić sobie skalę tego ruchu, przypominamy, że średnica ludzkiego włosa wynosi około 10^{-6} m. Te wyniki dowodzą, że ruchy sejsmiczne wzbudzone przez jedną lub dwie turbiny są tak niewielkie, że nie mogą indukować żadnych reakcji fizyczne w konstrukcjach.

Hessler i Hessler, (2010) przeanalizowali różne krajowe normy dotyczące hałasu i omówili je w odniesieniu do turbin wiatrowych. Artykuł zawiera kilka odniesień do dźwięków o niskiej częstotliwości. Stwierdzono, że „istnienie powiązania pomiędzy skargami zdrowotnymi a turbinami wiatrowymi jest wywodzone jedynie z dowodów zeznaniowych, nie popartych istotnymi badaniami epidemiologicznymi ani żadnymi dowodami naukowymi.” Artykuł sugeruje, żeby przyjąć próg 65 dB(C) jako miernik dla hałasu o niskiej częstotliwości. To proponowane kryterium nie jest elastyczne i nie może być dostosowane do różnych środowisk, takich jak tereny wiejskie lub miasto. Z tego względu bardziej odpowiednie jest proponowane przez Bolina i in. sprawdzanie, czy różnica pomiędzy C-ważonym i A-ważonym poziomem ciśnienia akustycznego na zewnątrz pomieszczenia nie przekracza 15 dB. Wartość 15 dB jest oparta na wcześniejszych skargach związanych z turbinami

spalinowymi. Artykuł Bolina ostrzega również, że uzyskanie dokładnych pomiarów niskiej częstotliwości dla turbin wiatrowych jest trudne ze względu na obecność wiatru. Nawet zaawansowane wiatrochrony nie mogą wyeliminować z otoczenia hałasu wiatru o niskiej częstotliwości.

Leventhal (2006) odnotował, że jeżeli jednocześnie bada się osoby słyszące i niesłyszące, klatki piersiowe uczestników badania rezonują przy dźwiękach w zakresie 50-80 Hz. Jednakże, żeby uczestnicy niesłyszący zgłosili rezonowanie klatki piersiowej, amplituda dźwięku musi być o 40-50 dB wyższa, niż próg słyszalności dla człowieka. Prowadzi to do wniosku, że rezonans klatki piersiowej nie powinien być kojarzony z dźwiękami niesłyszalnymi. Takie poziomy można uzyskać, jeżeli pomieszczenie wibruje na skutek drgań konstrukcji. Jednakże zjawisko to nigdy nie było badane w powiązaniu z nowoczesnymi turbinami wiatrowymi.

Informacje o rezonansie budynków i doniesienia własne o stwierdzonych skutkach chorobowych wywołanych przez nowoczesne turbiny wiatrowe znalazły się w raporcie niezależnych konsultantów, opisującym pomiary ciśnienia akustycznego dokonane wewnątrz i na zewnątrz budynku mieszkalnego w Falmouth, w stanie Massachusetts na wiosnę 2011 roku (Ambrose i Rand, 2011). Pomiary zostały wykonane w odległości około 500 m od pojedynczej turbiny o mocy 1,65 MW regulowanej przecignięciem, przy względnie wysokich prędkościach wiatru: 20-30 m/s na wysokości piasty. Autorzy odnotowali pogorszenie stanu zdrowia gdy poziom hałasu wewnątrz budynku mierzony w dB wynosił od 18 do 24 dB(A), (przy odpowiadającym poziomie hałasu dB(G) na poziomie 51-64). Konsultanci podali, że odczuwali negatywne skutki wewnątrz i na zewnątrz budynku, ale lepiej się czuli przebywając na zewnątrz, gdzie poziom hałasu mieścił się w zakresie 41-46 dB(A) (przy odpowiadającym poziomie dB(G) w zakresie 54-65). Jest to zadziwiające, gdyż pomiary ważne wywołujące reakcje u ludzi i wartości ważne były na zewnątrz wyższe. Jednak rzeczywiste poziomy dB(L) były wyższe wewnątrz budynku.

Autorzy przedstawili kilka danych wskazujących, że wartość G-ważonego sygnału ciśnienia akustycznego często przekracza 60 dB(G), czyli uśrednioną wartość progową dla aktywacji komórek OHC zaproponowaną przez zespół Salt i Hullar (2011). Jednakże nie przedstawiono metody pozyskania tych danych, a przedział czasu w jakim te dane są przedstawiane (<0,015 sekund lub 66 Hz) jest zbyt krótki dla prawidłowego uchwycenia zawartości niskiej częstotliwości.

Analiza danych różniła się od przyjętych ogólnie zasad postępowania, aby podkreślić słabości w normalnych procedurach związanych z wychwytywaniem modulacji amplitudy i dźwięków niskich częstotliwości. To odstępstwo od norm jest użytecznym krokiem w ustaleniu techniki pomiarowej o jaką wnioskuje raport HGC Engineering (HGC, 2010), który stwierdza, że jednostki odpowiedzialne za kreowanie polityki w tym zakresie powinny „rozważyć przyjęcie lub

zaaprobować sprawdzoną procedurę pomiarową, która może być wykorzystana do kwantyfikacji hałasu o częstotliwościach infradźwiękowych”.

Pomiary dokonane przez Ambrose i Rand (2011) wykazują różnice w poziomie A- i C-ważonych poziomów dźwięku mierzonych na zewnątrz pomieszczeń w wysokości około 15 dB przy dużej prędkości wiatru (Bolin i inni rekomendują tę wartość jako próg wskazujący na konieczność przeprowadzenia dalszych badań we wnętrzu budynku). Jednoczesne pomiary przeprowadzone wewnątrz i na zewnątrz budynku wskazują, że przy bardzo niskich częstotliwościach (2-6 Hz) poziomy ciśnienia akustycznego wewnątrz budynku są większe niż na zewnątrz. Należy jednak pamiętać, że badanie Ambrose and Rand (2011) nie odnosi się do przenikania konstrukcji wynikającego z częstotliwości przechodzenia łopat, do opóźnienia czasowego i wynikającego z niego dzwonienia stwierdzonego w domach w Boone (Kelley, 1985). Może to wskazywać, że wpływ na konstrukcję nie wynika z modulacji amplitudy, a raczej wynika ze znacznie subtelniejszych procesów. Co ważne, wprawdzie przy niższych częstotliwościach występuje zjawisko amplifikacji, ale poziomy wewnętrzne (nie korygowane) są znacznie niższe, niż jakiegokolwiek poziomy które do tej pory były uznane za powodujące reakcje fizyczne (łącznie z aktywacją komórek OHC) u ludzi.

Pomiary ujawniły, że dźwięk 22,9 Hz był amplitudowo modulowany przy częstotliwości odpowiadającej przechodzeniu łopat. Nie zidentyfikowano źródła tego dźwięku, i nie stwierdzono czy dźwięk ten ulegał zmianom zależnie od prędkości wiatru, więc nie można było określić, czy ten dźwięk był generowany aerodynamicznie. Poziom tego dźwięku jest wyższy niż próg aktywacji komórek rzęsatych zewnętrznych (OHC). Dźwięk 22,9 Hz nie wnikał w strukturę budynku i wykazywał normalne osłabienie przy przejściu z zewnątrz do środka budynku. Aby określić, czy można generalizować wyniki wskazujące na potencjalną możliwość aktywacji komórek rzęsatych zewnętrznych (OHC), konieczne jest określenie źródła tego dźwięku, które może być typowe tylko dla turbin z regulacją przeciągnięciem lub nawet typowe wyłącznie dla tego specyficznego rodzaju turbin.

Podsumowując, pomiary przedstawione w tym raporcie są nietypowe na tle literatury dotyczącej pomiarów turbin wiatrowych, a metody analizy danych nie zostały dogłębnie opisane. Poza tym, raport nie przedstawia żadnego prawdopodobnego mechanizmu przenikania fal dźwiękowych do organizmu człowieka, poza proponowanym przez zespół Salt i Hullar (2011). Z tego względu wyniki można uznać za sugestywne, ale jednak wymagające potwierdzenia zarówno pomiarów jak i opartych na naukowych podstawach mechanizmów oddziaływania na ludzkie zdrowie.

3.6.b Podsumowanie zgłoszonych przypadków

W tej sekcji omówione zostały potencjalne skutki zdrowotne powiązane z hałasem i wibracjami generowanymi przez turbiny wiatrowe. Przeanalizowano zarówno infradźwięki jak i dźwięki niskich częstotliwości. Sugestie, że infradźwięki i dźwięki niskich częstotliwości generowane przez turbiny wiatrowe wpływają na zmysł równowagi u ludzi nie znalazły potwierdzenia empirycznego. W popularnych mediach jest wiele doniesień na temat sposobów oddziaływania na zmysł równowagi, jednak wszystkie odnoszą się do sytuacji, w których wibracje w bezpośredni sposób przenikają ciało lub kiedy amplitudy fal są rzędu wartości wyższych, niż generowane przez turbiny wiatrowe. Najnowsze badania wykryły jedną potencjalną drogę oddziaływania na układ słuchu, poprzez komórki rzęstate zewnętrzne, które mogą wyczuwać infradźwięki. Nie ma jednak dowodów, że odbieranie infradźwięków przez komórki rzęstate zewnętrzne może prowadzić do jakichkolwiek symptomów zgłaszanych przez osoby wnoszące skargi. Przenikanie infradźwięków i dźwięków niskich częstotliwości do organizmu człowieka na skutek drgań konstrukcji budynków jest możliwe, ale nie zostało powiązane ze współczesnymi turbinami wiatrowymi. Ponadto należy pamiętać, że badania wskazują, że tego typu przenikanie ma przemijający charakter i w dużej mierze zależy od siły i kierunku wiatru oraz dotyczy bardzo niewielkiej liczby domów mieszkalnych otaczających turbiny.

Zmierzono także aktywność sejsmiczną w pobliżu turbin, generowaną w wyniku drgań przenoszonych poprzez wieże, i okazało się, że poziom takiej aktywności jest zbyt niski aby mógł wywołać wibracje u ludzi.

Słyszalny hałas generowany przez turbiny wiatrowe, w szczególności charakteryzujący się modulowaną amplitudą odgłos spływu powietrza z łopaty istnieje naprawdę, jego poziom zmienia się w zależności od warunków atmosferycznych, może zmieniać charakter od świstu po dudnienie, i w każdym domu może być odbierany w różny sposób, zależnie od sposobu rozchodzenia się dźwięku w danym terenie. Takie słyszalne dźwięki zostały uznane przez osoby składające skargi za źródło i powód rozdrażnienia oraz zaburzeń snu. Niektórzy autorzy sugerowali wprowadzenie przepisów ograniczających natężenie hałasu w porze nocnej oraz przyjęcie krótszych czasów uśredniania (krótszych niż średnia roczna), jako środków redukujące poziom rozdrażnienia wynikający z tego źródła. Niektórzy przypuszczają, że za rozdrażnienia odpowiedzialne są dźwięki niskich częstotliwości o modulowanej amplitudzie. Proponują oni, aby różnica pomiędzy A- i C-ważonym poziomem ciśnienia akustycznego mierzonego na zewnątrz budynku była stosowana do identyfikowania sytuacji, w których zawartość dźwięków niskich częstotliwości odgrywa istotną rolę. Sugerują oni także, że ta różnica może być wykorzystana przy tworzeniu katów prawnych, jako środek redukujący odczuwanie rozdrażnienia przez osoby mieszkające w pobliżu turbin.

Rozdział 4

Wnioski

Opierając się na wynikach szczegółowego przeglądu literatury naukowej i innych dostępnych sprawozdań oraz na analizie wartości dowodów naukowych, Panel przedstawia wnioski odnośnie trzech czynników związanych z działaniem turbin wiatrowych: hałasem i wibracjami, migotaniem cieni oraz miotaniem lodu. Poniżej prezentowane wnioski dotyczą każdego z tych trzech obszarów.

4.1 Hałas

4.1.a Generowanie hałasu i wibracji przez turbiny wiatrowe

1. Turbiny wiatrowe podczas pracy mogą wytwarzać niepożądany dźwięk (określany jako hałas). Właściwości dźwięków zależą od typu turbiny wiatrowej. Rozchodzenie się dźwięków jest głównie funkcją odległości, ale może na nie wpływać również położenie turbiny, otaczający teren i warunki atmosferyczne.
 - a. Turbiny podwietrzne i zawietrzne mają różne charakterystyki dźwiękowe, co wynika głównie z interakcji łopat ze strefą redukcji prędkości wiatru za wieżą w przypadku turbin pracujących z wiatrem.
 - b. Turbiny regulowane przez przeciągnięcie oraz regulowane kątem ustawienia łopat wykazują różnice w zależności wytwarzanego przez nie hałasu od prędkości wiatru
 - c. Na rozchodzenie się dźwięku wpływa załamywanie dźwięku z powodu gradientu temperatury, odbicia od zboczy górskich i absorpcji atmosferycznej. Różny sposób rozchodzenia się dźwięku stanowi przyczynę, dla której hałas jest różnie odbierany przez osoby mieszkające w różnych miejscach.
 - d. Słyszalny hałas o modulowanej amplitudzie generowany przez turbiny wiatrowe („świsł”) jest odbierany subiektywnie jako mocniejszy w nocy (i czasem staje się bardziej „łomoczący”) z wielu powodów: i) w stabilnej atmosferze gradient wiatru jest większy, ii) w stabilnej atmosferze dźwięk może się załamywać w dół, a nie do góry, iii) hałas otoczenia blisko ziemi jest mniejszy zarówno z powodu stabilnej atmosfery, jak i dlatego, że hałas generowany przez człowieka często jest mniejszy w nocy.
2. Poziom natężenia dźwięków współczesnej turbiny wiatrowej o typowej wielkości użytecznej jest rzędu 103 dB(A), ale czasem może być większy lub mniejszy, zależnie od projektu oraz mocy nominalnej turbiny. Wrażenie głośności spada gwałtownie wraz z odległością od turbiny wiatrowej. Typowo, w odległości 400 m, poziom ciśnienia akustycznego nowoczesnej turbiny

wiatrowej jest mniejszy niż 40 dB(A), czyli według przeglądanych badań epidemiologicznych znajduje się poniżej poziomu wywołującego rozdrażnienie.

3. Infradźwięki to drgania o częstotliwości poniżej 20 Hz. Infradźwięki o amplitudzie ponad 100-110 dB mogą być słyszane i odczuwane. Badania wykazały, że wibracje poniżej tej amplitudy nie są wyczuwane. Najwyższe poziomy infradźwięków mierzone obok turbin i odnotowane w literaturze wynosiły poniżej 90 dB przy 5 Hz i mniej przy wyższych częstotliwościach w miejscach oddalonych o 100 m.
4. Infradźwięki z turbiny wiatrowej nie powodują „ciągłego świstu” i nie są z tym zjawiskiem powiązane.
5. Fale ciśnienia we wszystkich częstotliwościach (słyszalnych lub infradźwiękowych) mogą powodować wibracje w strukturach lub substancjach. Aby wibracje mogły wystąpić, amplituda (wysokość) fali musi być wystarczająco wysoka, a wibracje mogą wystąpić tylko w przypadku struktur lub substancji, które mają zdolność do odbierania fal (częstotliwość rezonansowa).

4.1.b Skutki zdrowotne hałasu i wibracji

1. Przeważająca część opracowań dotyczących badań epidemiologicznych badających reakcje ludzi na turbiny wiatrowe opiera się na relacjach osób zgłaszających problem „rozdrażnienia”, a reakcje te wydają się być funkcją niektórych charakterystyk hałasu, widoku turbiny i stosunku do projektu turbin wiatrowych.

a. Nieliczne dowody epidemiologiczne sugerują istnienie związku pomiędzy wystawieniem na oddziaływanie turbin wiatrowych a rozdrażnieniem.

b. Nie ma wystarczających dowodów epidemiologicznych na potwierdzenie, że istnieje powiązanie pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a odczuwaniem rozdrażnienia w przypadku, kiedy turbiny wiatrowe są niewidoczne i odwrotnie.

2. Istnieją nieliczne dowody z badań epidemiologicznych sugerujące powiązanie pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a zakłóceniami snu. Innymi słowy, jest możliwe, że hałas turbin wiatrowych może powodować zakłócenia snu.

3. Bardzo głośne turbiny wiatrowe mogą powodować zakłócenia snu, szczególnie u osób wrażliwych, znajdujących się w pewnej odległości, natomiast zakłócenie snu przez bardzo ciche turbiny wiatrowe jest nieprawdopodobne, nawet w tej samej odległości. Nie istnieją wystarczające dowody do opracowania konkretnych progów ciśnienia akustycznego, przy których turbiny wiatrowe mogą powodować zakłócenia snu. Dalsze badania mogłyby ustalić te poziomy.

4. Nie określono wystarczająco jasno, czy odczuwanie rozdrażnienia przypisywane pracy turbin wiatrowych prowadzi do problemów ze snem lub stresu. Badania, które nie dotyczyły turbin

wiatrowych dowiodły, że zakłócenia snu mogą niekorzystnie wpływać na nastrój, funkcje poznawcze i ogólny stan zdrowia oraz samopoczucie.

5. Nie ma wystarczających dowodów na to, że hałas turbin wiatrowych *bezpośrednio (tzn. niezależnie od skutków w postaci rozdrażnienia lub zakłóceń snu)* powoduje problemy zdrowotne lub choroby.

6. Twierdzenia, że infradźwięki generowane przez turbiny wiatrowe bezpośrednio wpływają na układ przedsionkowy (zmysł równowagi) nie zostały udowodnione naukowo. Dostępne dowody wskazują, że poziom infradźwięków w pobliżu turbin nie może wywierać wpływu na układ przedsionkowy.

a. Zmierzone poziomy infradźwięków generowanych przez nowoczesne turbiny wiatrowe pracujące pod wiatr w odległości tak bliskiej jak 68 m są znacznie poniżej poziomu percepcji nie-słuchowej (odczuwanie wibracji w częściach ciała, ucisk w klatce piersiowej itp.).

b. Jeśli infradźwięki przenikają przez konstrukcje budowlane, ludzie wewnątrz tych budynków mogą odczuwać wibracje. Tego typu wibracje strukturalne mogą prowadzić do złego samopoczucia i powodować ogólne rozdrażnienie. Pomiarów nie wykazały żadnych dowodów na występowanie tego zjawiska w przypadku nowoczesnych turbin wiatrowych pracujących pod wiatr.

c. Pomiarów sejsmicznych (fal przenoszonych przez ziemię) wykonanych obok turbin wiatrowych i farm turbin wiatrowych wykazały, że tak małe drgania nie mogą przenikać do konstrukcji.

d. Możliwe, że istnieje mechanizm przenikania infradźwięków do układu przedsionkowego (poprzez komórki rzęstate zewnętrzne w uchu wewnętrznym), ale nie jest on jeszcze w pełni wyjaśniony. Wykazano, że poziom infradźwięków w pobliżu turbin wiatrowych jest wystarczająco wysoki, aby mógł być wyczuwany przez komórki rzęstate zewnętrzne (OHC). Jednakże nie istnieją dowody dokumentujące, że oddziaływanie infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe na zmysł równowagi wpływa na pracę mózgu.

e. Nieliczne dowody z badań laboratoryjnych gryzoni (szczurów) wskazują na krótkoterminowe zmiany biochemiczne w układzie krążenia i w komórkach mózgu, jako reakcję na krótką ekspozycję na emisję 16 Hz przy 130 dB. Te poziomy przekraczają zmierzone poziomy infradźwięków z nowoczesnych turbin wiatrowych o ponad 35 dB.

7. Nie ma dowodów na istnienie zespołu skutków zdrowotnych wywołanych oddziaływaniem turbin wiatrowych, który może być określony jako „Syndrom Turbin Wiatrowych”.

8. Najlepiej udokumentowane badania epidemiologiczne sugerują brak związku pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a objawami rozstroju nerwowego lub problemami ze zdrowiem psychicznym. Przeanalizowano także dwa gorzej udokumentowane badania: jedno odnotowało istnienie takiego związku, a drugie nie. Dlatego doszliśmy do wniosku, że dotychczas zebrane dowody wskazują na brak związku pomiędzy hałasem generowanym przez turbiny wiatrowe a objawami rozstroju nerwowego lub problemów ze zdrowiem psychicznym.
9. Żaden z nielicznych przeanalizowanych dowodów epidemiologicznych nie sugeruje istnienia związku pomiędzy hałasem z turbin wiatrowych a bólem i sztywnością, cukrzycą, nadciśnieniem, zawrotami głowy, upośledzeniem słuchu, chorobami sercowo-naczyniowymi oraz bólami głowy/migrenami.

4.2. Migotanie cieni

4.2.a Powstawanie migotania cieni

Migotanie cieni powstaje przez przechodzenie obracających się łopat turbiny wiatrowej pomiędzy słońcem a obserwatorem.

1. powstawanie migotania cieni zależy od pozycji obserwatora w stosunku do turbiny wiatrowej oraz od czasu dnia i pory roku.
2. Częstotliwość migotania cieni wywoływanych przez turbinę jest proporcjonalna do prędkości obrotowej wirnika, liczby łopat i dla typowych dużych turbin przeważnie mieści się w granicach od 0,5 do 1,1 Hz.
3. Migotanie cieni ma zasięg mniejszy niż 1400 m od turbiny.

4.2.b Skutki zdrowotne migotania cieni

1. Dowody naukowe sugerują, że migotanie cieni nie stanowi ryzyka wywołania napadu padaczkowego w wyniku stymulacji świetlnej.
2. Istnieją nieliczne dowody naukowe wskazujące na związek pomiędzy rozdrażnieniem z powodu długotrwałego migotania cieni (przekraczającego 30 minut na dzień) a potencjalnymi, przemijającym skutkami dla zdrowia fizycznego i osłabieniem funkcji poznawczych.

4.3 Miotanie lodem

4.3.a Geneza zjawiska

Lód może spadać lub być miotany z łopat turbiny wiatrowej podczas lub po uformowaniu się lub zakumulowaniu lodu na łopatach.

1. Odległość, na jaką kawałek lodu może odlecieć od turbiny jest zależna od prędkości wiatru, warunków pracy i kształtu bryły lodu.
2. W większości przypadków lód spada w odległości od turbiny równej wysokości jej wieży, a w wyjątkowych, bardzo rzadkich przypadkach ta odległość przekracza dwukrotną całkowitą wysokość turbiny (wysokość wieży plus długość łopaty).

4.3.b Skutki zdrowotne miotania lodem

1. Jest wystarczająco dużo dowodów na to, że spadający lód może być stwarzać zagrożenie fizyczne i należy podjąć środki zapewniające ochronę ludzi przed uderzeniem takim lodem.

4.4 Inne postulowane wnioski

Oprócz specyficznych wniosków sformułowanych powyżej dla hałasu i wibracji, migotania cieni i miotania lodu, Panel wnioskuję, co następuje:

1. Należy zapewnić dostateczny udział społeczeństwa w projektach i wskazać bezpośrednie korzyści z projektu energii wiatrowej (takie jak pozyskiwanie elektryczności przez osoby mieszkające w pobliżu turbin wiatrowych), gdyż powoduje to ogólne zmniejszenie rozdrażnienia oraz lepszą społeczną akceptację takich projektów.

Rozdział 5

Najlepsze praktyki dotyczące ograniczania wpływu turbin wiatrowych na zdrowie

Ogólnie mówiąc termin “najlepsza praktyka” odnosi się do polityki, wytycznych lub zaleceń opracowanych dla konkretnej sytuacji. Termin ten oznacza, że praktyka jest oparta na najlepszej informacji dostępnej w czasie jej tworzenia. Najlepsza praktyka może być ulepszona na skutek dostępu do nowych informacji i badań. Panel uznał, że najlepsze praktyki są rozwijane i wdrażane w krajach, które są zależne od energii wiatrowej i chronią zdrowie obywateli.

W niektórych przypadkach waga wyników badań dla konkretnej praktyki jest większa, niż w innych. Odpowiednio najlepsze praktyki* mogą być podzielone na kategorie według dostępnych źródeł, jak podano w Tabeli 3:

Tabela 3
Opis trzech kategorii najlepszych praktyk:

Kategoria	Nazwa	Opis
1	Najlepsza praktyka poparta badaniami naukowymi	Program, działanie lub strategia mające najwyższy stopień skuteczności, wsparte obiektywnymi i wyczerpującymi badaniami i opracowaniami.
2	Najlepsza praktyka poparta testami	Skuteczny program, działanie lub strategia, wykazujące prawidłowe wyniki, w pewnym stopniu wsparte przez subiektywne oraz obiektywne źródła danych.
3	Obiecująca najlepsza praktyka	Program, działanie lub strategia skuteczne w obrębie jednej organizacji, które może stać się ogólną najlepszą praktyką. Obiecująca najlepsza praktyka musi mieć jakieś podstawy obiektywne dla stwierdzenia jej skuteczności oraz musi być możliwa do wdrożenia w innych organizacjach.

* Podział na kategorie oparto na sugestiach zawartych w “Identifying and Promoting Promising Practices.” Federal Register, Vol. 68. No 131. 131. lipiec 2003.

www.acf.hhs.gov/programs/ccf/about_ccf/gbk_pdf/pp_gbk.pdf

5.1 Hałas

Dowody wskazujące na istnienie wpływu hałasu turbin wiatrowych na zdrowie ludzi są nieliczne. Istnieje ograniczona liczba dowodów na związek pomiędzy hałasem z turbiny wiatrowej a rozdrażnieniem i zakłóceniami snu, w zależności od poziomu ciśnienia akustycznego i położenia. Jednakże nie ma badań poziomu ciśnienia akustycznego odpowiadającego odczuwaniu hałasu przez ludzi. Kraje mające większe doświadczenie z energią wiatrową i prowadzące politykę ochrony zdrowia opracowały wytyczne dla minimalizowania możliwych negatywnych skutków hałasu. Te wytyczne uwzględniają porę dnia, przeznaczenie terenu oraz prędkość wiatru. Tabela 4 poniżej podsumowuje wytyczne niemieckie (w kategoriach terenów przemysłowych, handlowych i mieszkalnych) oraz duńskie (w kategoriach zabudowy rzadkiej i mieszkalnej). W tabeli podano poziom hałasu dla pory nocnej i jest rozumiany jako określany w bezpośredniej bliskości domków lub zabudowań. Dodatkowo WHO (Światowa Organizacja Zdrowia) zaleca dla terenów mieszkalnych w porze nocnej maksymalny poziom ciśnienia akustycznego 40 dB(A). Zalecane ograniczenia odpowiadające tym wartościom mogą być obliczone w programach takich jak WindPro lub podobnych. Takie obliczenia są normalnie wykonywane w ramach studiów wykonalności. Panel określił wytyczne pokazane poniżej jako Obiecujące Najlepsze Praktyki (Kategoria 3), niosące w sobie element Najlepszych praktyk popartych testami (Kategoria 2).

Tabela 4

Obiecująca Najlepsza Praktyka dla poziomu głośności w nocy w zależności od przeznaczenia terenu

Przeznaczenie terenu	Poziom głośności, dB(A) limit w nocy
Przemysłowy	70
Handlowy	50
Tereny wiejskie, użytkowanie mieszane	45
Tereny rzadko zaludnione, wiatr 8 m/s*	44
Tereny rzadko zaludnione, wiatr 6 m/s*	42
Tereny mieszkalne, wiatr 8 m/s*	39
Tereny mieszkalne, wiatr 6 m/s*	37

**mierzony 10 m nad poziomem gruntu, na zewnątrz budynku lub zabudowań*

Okres czasu, przez który są mierzone lub obliczane te limity hałasu również jest różny. Dla przykładu, często cytowana Światowa Organizacja Zdrowia zaleca poziom hałasu w nocy 40 dB(A) jako wartość średnioroczną (i nie podaje specjalnych danych dla turbin). Duńskie limity hałasu w powyższej tabeli są obliczane dla okresu 10 minut. Te limity są zgodne z poziomami hałasu, które badania epidemiologiczne łączą z mało istotnymi zgłoszeniami rozdrażnienia.

Panel rekomenduje włączenie limitów hałasu takich, jak podane w tabeli, jako części stanowej polityki dotyczącej budowy nowych turbin wiatrowych. Dodatkowo należy przewidzieć odpowiednie zakresy i procedury dla przypadków, w których poziom hałasu może przekraczać te wartości. W pracach należy wziąć pod uwagę zyski i straty wynikające z oddziaływania na zdrowie i środowisko różnych źródeł energii, państwowe i stanowe cele niezależności energetycznej, potencjalny zasięg oddziaływania itp.

Panel rekomenduje również, aby jednostki odpowiedzialne za zakup turbin wiatrowych zapoznawały się ze specyfikacjami głośności turbin i czynnikami wywołującymi oraz kontrolującymi poziom hałasu. Turbiny regulowane przez zmianę kąta ustawienia łopat i regulowane przez „przeciągnięcie” mają różne charakterystyki hałasu, szczególnie przy dużych prędkościach wiatru. Dla określonych turbin jest możliwe obniżanie hałasu w nocy poprzez odpowiednie środki regulacyjne (np. zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika). Jeżeli rozważane są środki kontroli poziomu hałasu, producent turbiny wiatrowej wykazać, że taka kontrola i regulacja jest możliwa.

Panel rekomenduje ciągły program monitorowania i badania dźwięku wydawanego przez turbiny wiatrowe zainstalowane na terenie stanu. Norma IEC 61400-11 zapewnia wytyczne dla pomiaru hałasu z turbin wiatrowych (International Electrotechnical Commission, 2002). Ogólnie, Panel zaleca bardziej szczegółowe szacowanie hałasu z turbin wiatrowych na terenach zamieszkałych. Opracowania winny być wykonywane z uwzględnieniem prowadzonych nieustannie międzynarodowych badań nad hałasem z turbin wiatrowych i jego skutkami. Takie oszacowania mogą być przydatne dla uaktualniania wytycznych lokalizacyjnych i dla podnoszenia najlepszych praktyk do wyższej kategorii. Zalecane jest przeprowadzenie dokładnych badań obok domów, gdzie różnice między A-ważonymi a C-ważonymi wynikami pomiarów zewnętrznych przekraczają 15 dB.

5.2 Migotanie cieni

Opierając się na wynikach badań naukowych oraz doświadczeniach terenowych związanych z migotaniem cienia, w Niemczech wprowadzono wytyczne obejmujące poniższe:

1. Migotanie cieni winno być obliczane dla maksymalnych wartości astronomicznych (tzn. nie biorąc pod uwagę zachmurzenia itp.).
2. Do obliczeń można wykorzystywać dostępne w sprzedaży oprogramowanie takie jak

WindPro lub podobne. Takie obliczenia winny stanowić część studium wykonalności dla nowych turbin wiatrowych.

3. Migotanie cienia nie może występować częściej, niż 30 minut na dzień i nie więcej, niż 30 godzin w ciągu roku w badanym miejscu (np. domy mieszkalne).
4. Migotanie cienia może być utrzymywane na akceptowalnym poziomie przez odsunięcie lub regulację turbiny wiatrowej. W tym drugim przypadku producent turbiny wiatrowej musi wykazać, że taka regulacja jest możliwa.

Wytyczne przedstawione powyżej mogą być uwzględnione jako najlepsza praktyka poparta testami (Kategoria 2). Można wykonać także dodatkowe badania, dotyczące w szczególności liczby godzin na rok, przez które może być dopuszczone migotanie cieni, aby można było włączyć je do najlepszej praktyki uznanych metod badawczych (Kategoria 1).

5.3 Miotanie lodem

Lód spadający z turbiny wiatrowej może spowodować zagrożenie dla ludzkiego zdrowia. Jest również oczywiste, że zagrożenie jest ograniczone do okresu, gdy następuje oblodzenie oraz do bezpośredniego otoczenia turbiny wiatrowej. W związku z tym, za najlepsze praktyki kategorii 1 można uznać.

1. Na obszarach, gdzie możliwe jest wystąpienie oblodzenia, muszą być ustawione znaki zabraniające przechodzenia pod turbiną wiatrową w razie oblodzenia, aż do zsunięcia się lodu.
2. Praca i przebywanie w sąsiedztwie turbiny wiatrowej musi być zakazana w czasie oraz bezpośrednio po wystąpieniu oblodzenia, uwzględniając następujące dwa ograniczenia (w metrach):

W przypadku turbin nie mających środków zapobiegających oblodzeniu, można przyjąć, że spadanie lodu jest ograniczone do następującego obszaru:

$$X_{\text{max, rzucenie}} = 1,5 \times 2R \times H$$

gdzie R = promień wirnika (m), H = wysokość piasty (m)

Dla lodu spadającego z zatrzymanej turbiny, winna być użyta poniższa granica:

$$X_{\text{max, spadek}} = U \times R \times H / 15$$

gdzie U = maksymalna prawdopodobna prędkość wiatru (m/sek)

Maksymalna prawdopodobna prędkość wiatru winna być ustalona na podstawie wartości maksymalnych z ostatniego roku, wyznaczona zgodnie z normą projektowania turbin wiatrowych IEC 61400-11 wydaną przez Międzynarodową Komisję Elektrotechniczną.

Niebezpieczeństwo ze strony spadającego lodu może być również ograniczone przez środki zapobiegające oblodzeniu. Jeżeli te środki zostały uwzględnione, producent turbiny wiatrowej musi być zdolny do zademonstrowania, że te środki są możliwe.

5.4 Konsultacje społeczne a rozdrażnienie

Istnieją pewne dowody na związek pomiędzy udziałem ekonomicznym lub innym w projekcie turbiny wiatrowej a odczuwaniem (lub nie odczuwaniem) rozdrażnienia przez poszczególne osoby. Poziom niezadowolenia można zatem zmniejszyć podejmując środki zmierzające do bezpośredniego zaangażowania mieszkańców w bliskim otoczeniu projektowanej turbiny wiatrowej. Podejmowanie takich środków można uznać za Obiecującą najlepszą praktykę (Kategoria 3).

5.5 Przepisy / Zachęty / Edukacja społeczna

Dowody wskazują, że w tych częściach świata, w których znajduje się znaczna liczba turbin wiatrowych względnie blisko domów mieszkalnych, istnieje ścisły związek pomiędzy opracowywaniem wytycznych, wprowadzaniem systemu zachęt i edukacją społeczną. Panel sugeruje, aby angażować społeczności lokalne poprzez takie strategie, jak edukacja, zachęty dla farm wiatrowych należących do wspólnot lokalnych, kompensaty za udokumentowane spadki wartości nieruchomości, wyczerpujące analizy wytycznych oraz edukacja społeczna dotycząca energii odnawialnej. To wielowątkowe podejście może być uznane za Obiecującą najlepszą Praktykę (Kategoria 3).

Załącznik A:

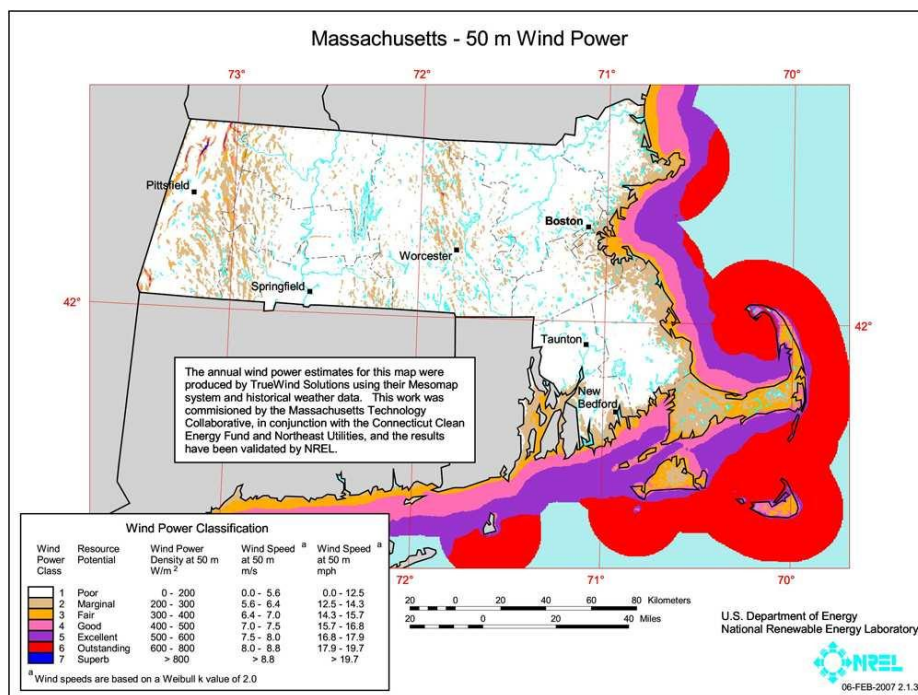
Turbiny wiatrowe – wprowadzenie do energii wiatrowej

Chociaż energia wiatrowa dostarczająca elektryczność na skalę przemysłową jest stosunkowo nową technologią, sama koncepcja sięga daleko w przeszłość. Turbiny wiatrowe wywodzą się z mechanicznych wiatraków, które pojawiły się najpierw w Persji w VII wieku (Vowles, 1932) a następnie, w Średniowieczu dotarły do północnej Europy. W XVIII i XIX wieku ich konstrukcja została znacząco rozwinięta, a pod koniec XIX wieku podjęto pierwsze próby pozyskiwania w ten sposób energii elektrycznej. W pierwszej połowie XX wieku rozwój tej techniki był powolny, a nowoczesne turbiny zaczęły się pojawiać w latach siedemdziesiątych. Było to związane rozwojem innych technologii, takich jak elektronika, komputery, sterowniki, materiały kompozytowe i możliwość symulacji komputerowej, co doprowadziło do skonstruowania pracujących niezależnie turbin wiatrowych o dużych rozmiarach, które przez ostatnie dwadzieścia lat znacznie się rozprzestrzeniły.

Wiatr jest najważniejszym czynnikiem zewnętrznym w energii wiatrowej. Może być określony jako „paliwo” turbiny wiatrowej, nawet jeżeli nie jest zużywany w procesie. Wiatr determinuje ilość produkowanej energii i dlatego jest określany jako jej źródło. Wiatr może być bardzo znaczącym źródłem energii, w zależności od lokalizacji i rodzaju terenu. W Stanach Zjednoczonych rejonem o względnie dużych zasobach energii wiatrowej są Wielkie Równiny. W Massachusetts wiatry wiejące na lądzie są raczej słabe, za wyjątkiem szczytów i grzbietów górskich. Wiatry są z reguły silniejsze na wybrzeżu i najczęściej ich siła wzrasta nad morzem, w strefie przybrzeżnej. Średnia prędkość wiatru jest największa przy brzegu, z następnie wzrasta wraz z odległością. Zasoby wiatru w stanie Massachusetts są pokazane na poniższym rysunku:

Rysunek AA.1: Mapa zasobów wiatru w Massachusetts (źródło: Państwowe Laboratorium Energii Odnawialnej)

http://www.windpoweringamerica.gov/images/windmaps/ma_50m_800.jpg



Niniejsza sekcja podsumowuje podstawowe charakterystyki wiatru w takim zakresie, w jakim jest to związane z produkcją energii przez turbiny wiatrowe. Bardziej szczegółowe informacje znajdują się w opracowaniu Manwell et al., 2009. Charakter wiatru ma również wpływ na projekt turbiny i dla tego określa się go jako „zewnętrzny warunek konstrukcyjny”. Ten aspekt wiatru jest omówiony bardziej szczegółowo w następnej sekcji.

AA.1 Natura wiatru

Wiatr ma swoje źródło w energii słonecznej, powstaje w wyniku różnic w stopniu nagrzania różnych części ziemi. Różnice te powodują powstawanie strefy o niskim i o wysokim ciśnieniu, co z kolei generuje ruchy mas powietrza. Ruch powietrza jest również skutkiem obracania się ziemi. Rozważania dotyczące wiatru w kontekście jego powiązania z turbinami wiatrowymi obejmują między innymi: (i) wiatr geostroficzny, (ii) meteorologię atmosferycznej warstwy granicznej, (iii) zmiany prędkości i wysokości wiatru, (iv) nierówności powierzchni oraz (v) turbulencje.

Wiatr geostroficzny to teoretyczny wiatr, który powstaje w górnej warstwie atmosfery i

jest wynikiem dokładnej równowagi siły gradientu ciśnienia oraz ruchu obrotowego ziemi (efekt Coriolisa). Wiatr gradientowy jest podobny do wiatru geostroficznego, ale uwzględnia ruch odśrodkowy. Wynika to z zakrzywionych izobar (linii stałego ciśnienia) w atmosferze. Właśnie tego typu wiatry powstające w górnej części atmosfery są źródłem większości energii, która może być wykorzystana przez turbiny wiatrowe. Energia z górnej atmosfery jest przenoszona ku niższym warstwom, blisko powierzchni ziemi, poprzez różne mechanizmy, najczęściej przez turbulencje, które powstają mechanicznie (ze względu na nierówności powierzchni) i termicznie (ze względu na wznoszenie się ciepłych mas powietrza i opadanie zimnego powietrza).

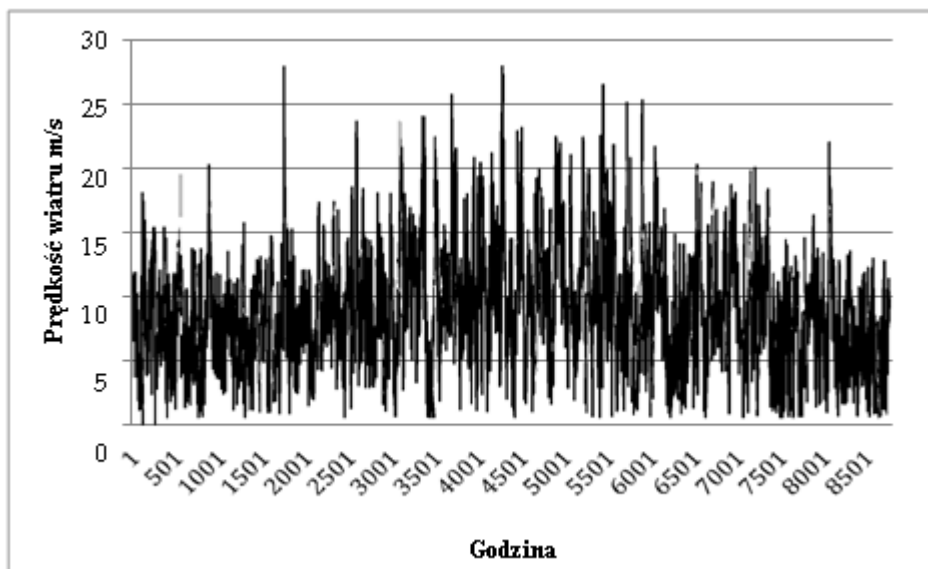
Chociaż wiatr wiejący blisko powierzchni jest napędzany wiatrami z dużej wysokości, pozostaje jednak pod wpływem topografii terenu (gór i pasm górskich) oraz warunków terenowych (takich jak pokrywa leśna czy obecność budynków).

AA.2 Zmienność wiatru

Jedną z osobliwych cech wiatru jest jego zmienność, zarówno przestrzenna jak i czasowa. Czasowa zmienność obejmuje: (i) zmienność krótkoterminową (podmuchy i turbulencje wiatru), (ii) zmienność średnioterminową (tzn. z godziny na godzinę), (iii) zmienność dobową (zmiany w ciągu doby), (iv) zmienność sezonową, (v) zmienność roczną (z roku na rok). Wiatr może zmieniać się także przestrzennie zarówno w zależności od miejsca, jak i od wysokości nad ziemią.

Rysunek AA.2 ilustruje zmienność średniej godzinowej prędkości wiatru w ciągu jednego roku w jednym miejscu.

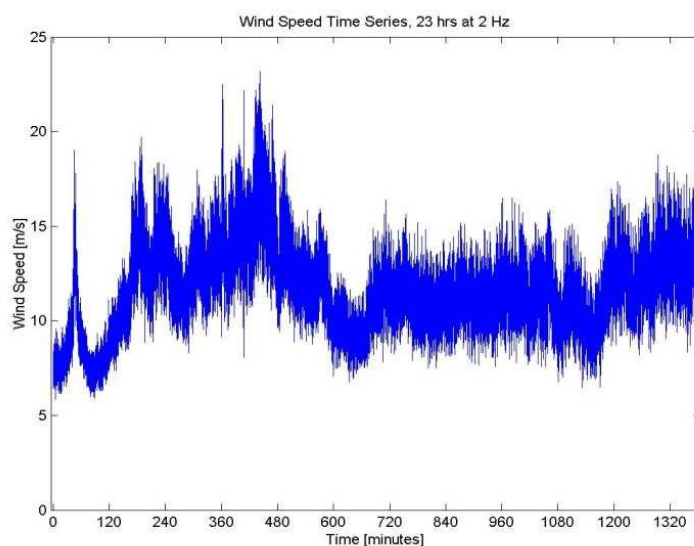
Rysunek AA.2: Typowa prędkość godzinowa wiatru w ciągu roku



Jak można zauważyć, w tym przypadku godzinowa średnia prędkość wiatru różni się znacząco w ciągu roku w zakresie od zera do prawie 30 m/s.

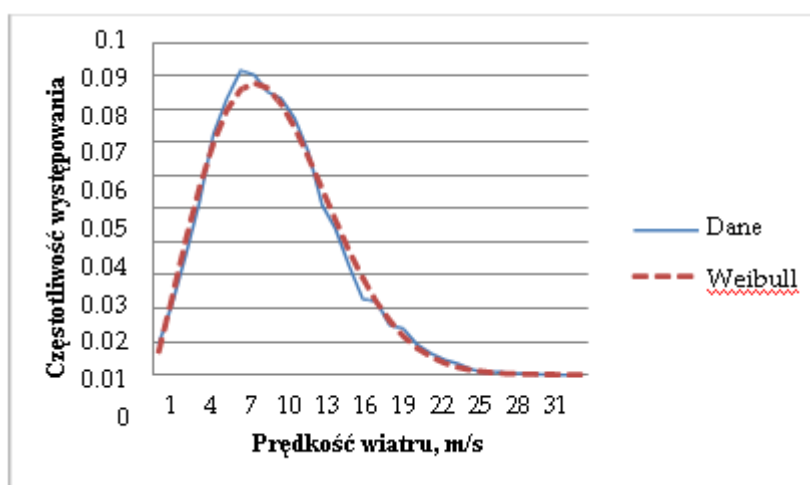
Rysunek AA.3 pokazuje prędkość wiatru w innej miejscowości, gdzie prędkość ta była rejestrowana dwa razy na sekundę przez 23 godziny. Także w tym przypadku widać znaczącą zmienność. Większość zmian pokazanych na tym rysunku wiąże się z krótkoterminowymi fluktuacjami lub turbulencjami. Turbulencje mają pewien wpływ na produkcję energii, ale ich wpływ jest bardziej istotny podczas projektowania turbiny ze względu na powodowane przez nie zmęczenie materiału. Turbulencje są omówione bardziej szczegółowo w dalszej sekcji.

Rysunek AA.3: Typowe dane wiatru, rejestrowane przy częstotliwości 2 Hz przez 23 godziny



Pomimo znacznej zmienności czasowej wiatru, jego ogólna charakterystyka ma znacznie mniejszą zmienność. Dla przykładu, roczna średnia prędkość wiatru w danym miejscu zasadniczo mieści się w granicach $\pm 10\%$ wartości średniej długoterminowej dla tego miejsca. Ponadto, rozkład prędkości wiatru, czyli częstość występowania wiatrów w różnych zakresach prędkości również jest podobna do rocznej. Ogólny kształt takiego rozkładu jest również podobny w różnych miejscach, nawet jeżeli średnie dla tych miejsc są różne. Modele statystyczne, takie jak rozkład Weibulla, mogą być stosowane do modelowania występowania różnych prędkości wiatru w większości miejsc na świecie. Dla przykładu, liczba wystąpień prędkości wiatru w różnych zakresach, według danych pokazanych na rysunku AA.2, jest zilustrowana na rysunku AA.4 razem z takimi wystąpieniami modelowanymi przez rozkład Weibulla.

Rysunek AA.4: Typowa częstotliwość występowania prędkości wiatru, według danych rzeczywistych oraz według modelu statystycznego



Prawdopodobieństwo rozkładu wg funkcji Weibulla jest podane równaniem:

$$p(U) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

Gdzie c = współczynnik skali Weibulla (m/s) i k = współczynnik kształtu Weibulla (bezwymiarowy)

Dla celów modelowania wystąpień prędkości wiatru, współczynniki skali i kształtu mogą być określone w przybliżeniu, jak niżej:

$$k = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{U}} \right)^{1.086} \quad (2)$$

$$c = \bar{U} \cdot 0.568 \cdot 0.433 / k^{1/k} \quad (3)$$

gdzie $\bar{U}$ jest długoterminową średnią prędkością wiatru (m/s, oparta na średnich 10-minutowych, lub godzinnych) oraz jest standardową odchyłką prędkości wiatru opartą na tych samych średnich 10-minutowych lub godzinowych.

AA.3 Energia wiatru

Dostępna energia wiatru może być wyprowadzona z podstawowych praw mechaniki płynów. Przede wszystkim energia na jednostkę masy cząsteczki powietrza jest określona jako połowa kwadratu prędkości, U (m/s). Wielkość przepływu masowego powietrza (kg/s) przez daną powierzchnię A (m²) prostopadle do kierunku wiatru wynosi $\dot{m} = \rho AU$, gdzie ρ jest gęstością powietrza (kg/m³). Energia wiatru na jednostkę powierzchni, P/A , (W/m²) wynosi więc:

$$P/A = \dot{m}/A \cdot \frac{1}{2} U^2 = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (4)$$

AA.4 Uskok wiatru

Uskok wiatru to zmiana prędkości wiatru związana ze zmianą wysokości i kierunku wiatru. Uskok wiatru ma wpływ na wytwarzanie energii, na konstrukcję turbin i na powstawanie hałasu. Zmiany prędkości wiatru wraz z wysokością są modelowane typowo prawem energii:

$$U_2 = U_1 \sqrt{h_2 / h_1} \quad (5)$$

gdzie U_1 = prędkość na wysokości h_1 , U_2 to prędkość wiatru szacowana dla wysokości h_2 , a α jest wykładnikiem prawa energii. Wartość wykładnika potęgowego mieści się typowo w zakresie od 0,1 dla powierzchni płaskich do 0,4 dla bardzo nierównych powierzchni (takich jak lasy lub tereny zabudowane).

Na uskok wiatru może również wpływać stabilność atmosfery. Opracowano równania pozwalające na włączenie parametrów stabilności do analizy, ale to zagadnienie wykracza poza zakres niniejszego raportu.

AA.5 Zależność konstrukcji turbiny od charakteru wiatru

Jak wskazano wcześniej, wiatr jest szczególnie ważny dla pracy turbin wiatrowych, gdyż jest źródłem energii. Jest także źródłem znaczących obciążeń konstrukcji, którym turbina musi być zdolna się przeciwstawić. Część z tych obciążeń występuje podczas pracy turbiny, inna część podczas postoju. Dla przykładu, wyjątkowo silne wiatry oddziałują na turbinę podczas postoju. Silne wiatry o nagłych zmianach kierunku w czasie pracy turbiny również mogą wywoływać duże obciążenia. Turbulencje podczas normalnej pracy skutkują zmęczeniem materiału. Poniżej podajemy podsumowanie kluczowych aspektów wiatru, wpływających na konstrukcję turbin wiatrowych. Więcej informacji znajduje się w pracy autorstwa Manwell et al., 2009.

AA.5.a Turbulencje

Turbulencje wiatru mogą mieć istotne znaczenie dla konstrukcji turbin wiatrowych jak również dla ich pracy i dlatego należy je uwzględnić w procesie projektowania turbiny. Termin „turbulencje” odnosi się do krótkotrwałych zmian w prędkości i kierunku wiatru. Ujawniają się jako widoczne losowe fluktuacje, nakładające się na względnie stały główny przepływ powietrza. Turbulencje w rzeczywistości nie mają charakteru losowego. Mają one czasem bardzo wyraźną charakterystykę, przynajmniej w sensie statystycznym.

Turbulencje są opisywane wieloma miernikami. Obejmują one: (i) intensywność turbulencji, (ii) prawdopodobną funkcję gęstości (pdf) turbulencji, (iii) autokorelację, (iv) integralne skale czasowe i zakresy oraz (v) funkcje gęstości spektralnej mocy. Omówienie fizyki turbulencji nie wchodzi w zakres niniejszego przeglądu.

AA.5.b Porywy wiatru

Poryw wiatru jest nieciągłym wzrostem i spadkiem prędkości wiatru, prawdopodobnie związanym ze zmianą kierunku wiatru, co może mieć istotne znaczenie przy projektowaniu turbiny wiatrowej. Porywy najczęściej są związane z turbulencjami.

AA.5.c Huragany

Podczas projektowania turbiny wiatrowej należy uwzględnić możliwość wystąpienia huraganu. Z reguły huragany występują przy okazji silnych burz. Występują one stosunkowo rzadko, ale wystarczająco często, aby projekty musiały uwzględniać to zjawisko. Modele statystyczne, takie jak rozkład Gumbela (Gumbel, 1958), są stosowane dla określenia prawdopodobieństwa wystąpienia takich wiatrów co najmniej raz na każde 50 lub 100 lat. Takie okresy są nazwane okresami powrotu.

AA.5.d Grunt

Kolejnym ważnym elementem w projektowaniu i instalowaniu turbiny wiatrowej jest grunt. Rodzaj gruntu wpływa w szczególności na projekt fundamentu turbiny wiatrowej. Omówienie gruntów nie wchodzi w zakres niniejszego przeglądu.

AA.6 Aerodynamika turbin wiatrowych

Sercem turbiny wiatrowej jest wirnik. Jest to urządzenie, które uzyskuje energię kinetyczną z wiatru i przekształca ją w formę mechaniczną. Poniżej podsumowujemy aerodynamikę wirników turbin wiatrowych. Więcej szczegółów można znaleźć w opracowaniu Manwella et al., 2009.

Wirnik turbiny wiatrowej składa się z łopat, które są zamocowane do piasty. Piasta jest przykręcona do wału (wał główny), który drugim końcem przekazuje energię do generatora, gdzie jest przekształcana w elektryczność. Maksymalna moc jaką wirnik może uzyskać z wiatru jest ograniczona przede wszystkim siłą wiatru, który przechodzi poprzez obszar określony jako przepływ wirnika. Współcześnie większość turbin wiatrowych stosuje wirnik z osią poziomą. W ten sposób oś obrotów wirnika jest (nominalnie) równoległa do powierzchni ziemi. Tak więc powierzchnia omiatana przez wirnik jest okrągła. Przyjmując promień wirnika jako R (m), maksymalna siła P (W) dostępna z wiatru wynosi:

$$P = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (6)$$

Na początku dwudziestego wieku Betz (między innymi, patrz [4]) wykazał, że maksymalna moc, jaką można uzyskać z wiatru jest mniejsza od mocy wiatru; w rzeczywistości jest to $16/27$ tej wartości. Praca Betz'a doprowadziła do zdefiniowania współczynnika mocy C_p , który wyraża stosunek rzeczywistej mocy osiągananej przez wirnik do mocy wiatru. Po uwzględnieniu sprawności innych elementów układu napędowego, wyrażonych jako η , całkowita moc wyjściowa turbiny wiatrowej P_{WT} może być określona przez wzór:

$$P_{WT} = C_p \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (7)$$

Maksymalna wartość współczynnika mocy, znana jako limit Betz'a wynosi $16/27$.

Pierwotne analizy Betz'a były oparte na podstawowych zasadach mechaniki cieczy, łącznie z teorią pędu. Obejmowały również następujące założenia: (i) jednorodny, nieściśliwy, ustalony przepływ płynu; (ii) brak oporów tarcia; (iii) wirnik z nieskończoną liczbą (bardzo małych) łopatek; (iv) równa siła ciągu w przestrzeni wirnika; (v) strumień nie obracający się; (vi) ciśnienie statyczne strumienia napływu i wypływu z dala od wirnika jest równe z niezakłóconym ciśnieniem statycznym otoczenia.

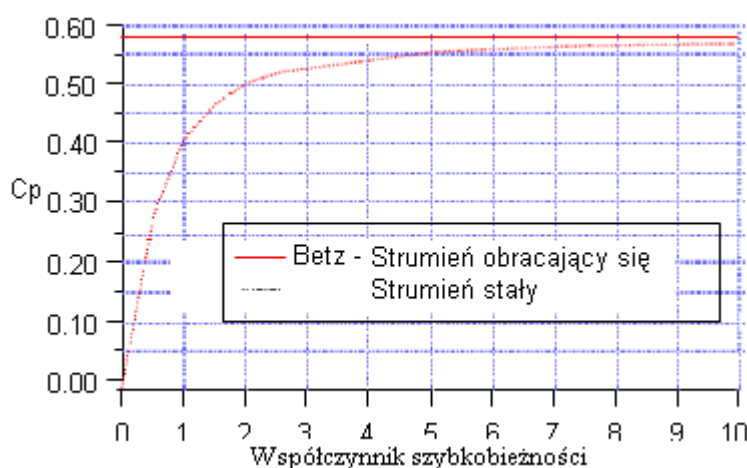
W rzeczywistości wirniki pracujące w osi poziomej powodują wirowanie strumienia. Część energii wiatru jest zużywana na to obracanie i dlatego nie zostanie przekształcona w moc mechaniczną. W wyniku tego, maksymalny współczynnik mocy w rzeczywistości jest mniejszy niż

limit Betza. Wyprowadzenie maksymalnego współczynnika mocy dla obracającego się strumienia jest zależne od kilku czynników: (i) prędkości obrotowej wirnika turbiny Ω w radianach/sekundę; (ii) współczynnika szybkobieżności $\lambda = \Omega R/U$; (iii) współczynnika prędkości miejscowych $\lambda_r = \lambda r/R$; (iv) prędkości obrotowej strumienia ω ; (v) współczynnika indukcji osiowej α który odnosi prędkość wolnego strumienia wiatru do prędkości wiatru w wirniku oraz do prędkości wiatru daleko od strumienia ($U_{\text{wirnika}} = (1 - \alpha) U_{\text{wolny strumień}}$ oraz $U_{\text{strumienia}} = (1 - 2\alpha) U_{\text{wolny strumień}}$) oraz (vi) współczynnika indukcji kątowej $\alpha' = \omega/2\Omega$. Zgodnie z tą analizą, maksymalny możliwy współczynnik mocy jest podany przez wzór:

$$C_{P,\max} = \frac{8}{27} \int_0^1 \alpha' (1 - \alpha)^3 r^3 dr \quad (8)$$

Maksymalny współczynnik mocy dla wirnika z obracającym się strumieniem w porównaniu z limitem Betza jest pokazany na rysunku AA.5.

Rys. AA.5: Maksymalny teoretyczny współczynnik mocy dla strumienia stałego i obracającego się



Żadna z powyżej omówionych analiz nie wskazuje, jak łopaty wirnika wyglądają w rzeczywistości. W tym celu opracowano metodę obliczeniową nazwaną teorią pędu elementu łopaty (BEM). To podejście zakłada, że łopaty mają przekrój płata skrzydła samolotu. Rysunek AA.6 pokazuje typowy płatek skrzydła, łącznie z częścią nomenklatury.

Rysunek AA.6 Nomenklatura aerodynamiczna



Metoda BEM przyrównuje siły na łopatach związane z przepływem powietrza nad płatem z siłami związanymi ze zmianą pędu powietrza przechodzącego przez wirnik. Punktem wyjściowym do tej analizy jest ocenienie siły nośnej na płacie. Nośność jest siłą prostopadłą do przepływu. Jest ona określona wzorem:

$$\tilde{F}_L = C_L \frac{1}{2} \rho U^2 c \quad (9)$$

gdzie: $\tilde{F}_L$ = siła na jednostkę długości, N/m

C_L = współczynnik nośności

c = długość cięciwy (odległość od krawędzi natarcia do krawędzi spływu płata, m)

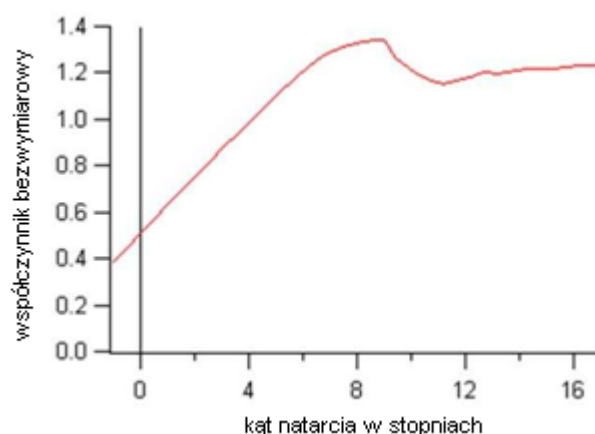
Teoria cienkich płatów przewiduje, że dla bardzo cienkiego, idealnego płata współczynnik nośności jest podany wzorem:

$$C_L = 2 \sin \alpha \quad (11)$$

gdzie α jest kątem natarcia, który jest kątem pomiędzy przepływem a cięciwą płata.

Współczynnik nośności dla płatów rzeczywistych obejmuje faktyczne warunki, ale pochylenie, szczególnie dla małych kątów natarcia, jest zbliżone do idealnego płata. Dla większych kątów natarcia (ponad 10-15 stopni) współczynnik nośności zaczyna się zmniejszać, a nawet osiąga zero. Jest to znane jako przeciągnięcie. Typowa krzywa zależności współczynnika nośności od kąta natarcia jest pokazana na rysunku AA.7.

Rysunek AA.7: Typowa nośność płata w zależności od kąta natarcia



Zawsze występuje siła oporu związana z przepływem cieczy. Ta siła jest proporcjonalna do przepływu. Siła oporu (na jednostkę długości) jest wyrażona wzorem:

$$\tilde{F}_D = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 \quad (12)$$

gdzie C_D = współczynnik oporu aerodynamicznego.

Podczas projektowania łopat dla turbiny wiatrowej dąży się głównie do zminimalizowania oporu aerodynamicznego w stosunku do nośności w punkcie projektowym. W wyniku tego z reguły otrzymuje się współczynnik nośności w przybliżeniu 1,0 a współczynnik oporu około 0,006, chociaż te wartości mogą być różne w zależności od płata.

Teoria pędu elementu łopaty, jak zaznaczono powyżej, wiąże kształt łopaty z jej osiąganiami. Stosuje się więc następujące podejście. Łopata jest dzielona na elementy, a wirnik jest dzielony na pierścienie. Jednocześnie opracowuje się dwa równania: jedno wyraża współczynnik nośności i oporu (a więc siły) na elementy łopaty jako funkcję danych aerodynamicznych płata oraz kąta natarcia wiatru. Drugie wyraża siły na pierścieniach jako funkcję wiatru przechodzącego przez wirnik, charakterystyki wirnika oraz zmian pędu. Niektóre z głównych ustaleń: (i) siły na elementy łopaty są zależne wyłącznie od charakterystyki nośność/opór aerodynamiczny płatu, (ii) nie ma przepływu wzdłuż łopaty, (iii) siły nośna i oporu są prostopadłe i równoległe w stosunku do „wiatru względnego” oraz (iv) siły są rozłożone na składowe prostopadłe do wirnika („ciąg”) i styczne („moment obrotowy”).

Stosując teorię BEM można wykazać, że w przypadku idealnego wirnika kąt wiatru względnego ϕ jako funkcji współczynnika szybkobieżności i położenia promieniowego łopaty jest dany wzorem:

$$\frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{r} \quad (13)$$

Podobnie, długość cięciwy jest podana przez wzór:

$$c = \frac{8r}{BC_L} (1 - \cos \theta_p) \quad (14)$$

gdzie B = liczba łopat

Z powyższych równań można wyciągnąć kilka użytecznych wniosków. Przede wszystkim, w idealnym przypadku łopaty winny być skręcone. W rzeczywistości kąt skręcenia różni się od kąta wiatru względnego o kąt natarcia i odpowiadający kąt ustawienia θ_p , jak niżej:

$$T = p \quad (15)$$

Można również zauważyć, że kąt skręcenia początkowo wzrasta powoli w kierunku od końcówek do środka, a następnie wzrasta znacznie szybciej. Po drugie, cięciwa łopaty również wzrasta w kierunku od końcówek do środka, początkowo powoli, a następnie coraz szybciej. W idealnym przypadku łopata turbiny wiatrowej jest zarówno znacząco skręcona jak i ma kształt stożka. Rzeczywiste łopaty nie są projektowane w tak optymalnym kształcie z powodu różnych względów praktycznych.

Inne ważne spostrzeżenie wiąże się z całkowitą powierzchnią łopat w porównaniu z obszarem omiatanym. Współczynnik projektowanego pola powierzchni łopat jest znany jako masywność σ . Przy danym kącie natarcia, masywność będzie się zmniejszała w miarę wzrastania współczynnika szybkobieżności. Dla przykładu, przyjmując współczynnik nośności C_L jako 1,0, masywność wirnika zaprojektowanego optymalnie dla współczynnika szybkobieżności 2,0 wynosi 0,43, podczas gdy dla wirnika zaprojektowanego optymalnie dla współczynnika szybkobieżności 6,0 masywność może wynosić 0,088. Oczywiście jest zatem, że aby zużyć jak najmniej materiału (a tym samym zminimalizować koszty) na łopaty, należy je projektować tak, aby współczynnik szybkobieżności był możliwie najwyższy.

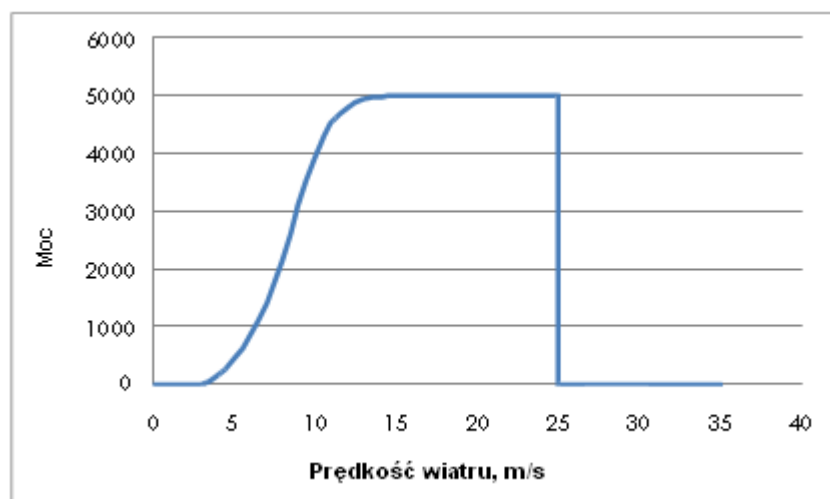
W doborze projektowanego współczynnika szybkobieżności dla turbiny oprócz masywności bierze się pod uwagę także inne czynniki. Z jednej strony wyższe współczynniki szybkobieżności powodują konieczność zastosowania przekładni z niższym współczynnikiem obrotów dla danej turbiny. Z drugiej strony efekt oporu aerodynamicznego i szorstkość powierzchni łopaty będą bardziej istotne w przypadku wirnika o wyższym współczynniku szybkobieżności. Może to spowodować

obniżenie osiągow. Inną sprawą jest wytrzymałość materiałów. Całkowite siły działające na wirnik są niemal takie same, niezależnie od masywności, w związku z czym naprężenia mogą być większe. Kończącym problemem do rozpatrzenia jest hałas. Wyższe współczynniki szybkobieżności ogólnie powodują zwiększenie hałasu generowanego przez łopaty.

Przy projektowaniu wirnika turbiny wiatrowej należy brać pod uwagę liczne inne kwestie, takie jak straty na końcówkach, typ zastosowanego płata, łatwość produkcji i transportu, typ sterowania, dobór materiałów itp. Czynniki te nie są rozpatrywane w niniejszym opracowaniu.

Rzeczywiste wirniki turbin wiatrowych są projektowane z uwzględnieniem wielu czynników, nie tylko ich sprawności aerodynamicznej. Dodatkowo, wirnik musi być sterowany tak, aby generował prąd elektryczny najbardziej skutecznie i aby wytrzymywał ciągłe fluktuacje sił podczas normalnej pracy i ekstremalne obciążenia podczas burz. Dlatego też wirnik turbiny wiatrowej zazwyczaj nie pracuje ze swoim najwyższym współczynnikiem mocy przy wszystkich prędkościach wiatru. Z tego powodu moc wyjściowa turbiny wiatrowej ogólnie jest raczej opisana krzywą, znaną jako krzywa mocy, niż pokazanym wcześniej równaniem takim, jak P_{WT} . Rysunek AA.8 pokazuje typową krzywą mocy. Jak na nim widać, poniżej prędkości załączenia (w przykładzie 3 m/s) nie jest produkowana żadna moc. Pomiędzy prędkością załączenia a nominalną prędkością wiatru (w tym przykładzie 14,5 m/s) moc wzrasta z sposób istotny wraz z prędkością wiatru. Ponad prędkością nominalną produkcja energii elektrycznej jest stała, niezależna od prędkości wiatru. Powyżej prędkości wyłączenia (w tym przykładzie 25 m/s) turbina jest wyłączana.

Rysunek AA.8: Typowa krzywa mocy turbiny wiatrowej



AA.7 Mechanika i dynamika turbin wiatrowych

Wcześniej omówiliśmy aspekty aerodynamiczne turbin wiatrowych i ich wpływ na projektowanie, osiągi i wygląd. Następnym ważnym zagadnieniem jest żywotność turbiny. Ten temat obejmuje jej zdolność do wytrzymania sił, które będą działały na turbinę, odkształcenia różnych elementów oraz na drgania mogące powstać podczas pracy.

Zagadnienia, które należy rozważyć, obejmują: (i) wytrzymałość, (ii) ruch względny komponentów, (iii) drgania, (iv) obciążenia, (v) reakcje, (vi) naprężenia, (vii) ruch nieustalony, powodujący zmęczenie materiału, oraz (viii) własności materiału.

Na turbiną mogą działać różne obciążenia: statyczne (nieobrotowe), ciągłe (obrotowe), cykliczne, nieustalone, impulsowe, stochastyczne lub indukowane rezonansowo. Źródła obciążeń mogą obejmować aerodynamikę, ciążenie, interakcje dynamiczne lub sterowanie mechaniczne. Żeby zrozumieć charakter różnych obciążeń oddziałujących na turbinę, należy zapoznać się z podstawami statyki, dynamiki, drugą zasadą dynamiki Newtona, zależnościami obrotowymi (kinematyką), wytrzymałością materiałów (łącznie z prawem Hooke'a i określaniem naprężeń z momentów i geometrii), sił/momentów żyroskopowych oraz drgań. Szczególnie ważne są też belki wysięgnikowe, gdyż łopaty wirnika oraz wieże mają podobną charakterystykę.

Turbiny wiatrowe często są zarówno źródłem, jak i obiektem wibracji. Chociaż ten temat jest bardzo skomplikowany, warto pamiętać, że częstotliwość własna prostych mas oscylujących m i sprężyn, ze stałą sprężyny k jest wyrażana wzorem:

$$\sqrt{k/m} \quad (16)$$

Podobnie, częstotliwość własna rotacyjna, dookoła osi obrotu jest wyrażana wzorem:

$$\sqrt{k/J} \quad (17)$$

Gdzie k_θ jest stałą rotacyjną sprężyny, a J momentem bezwładności masy.

Ciało ciągłe, takie jak łopata turbiny wiatrowej, w rzeczywistości ma nieskończoną liczbę częstotliwości własnych (aczkolwiek tylko kilka pierwszych jest istotnych), a z każdą częstotliwością własną związany jest kształt charakteryzujący jego wygięcie. Drgania jednolitej belki wysięgnikowej można stosunkowo prosto opisać przy użyciu równania Eulera (patrz Manwell i in., 2009). Elementy niejednolite wymagają bardziej skomplikowanych metod do ich analizy.

AA.7.a Ruch wirnika

Różne ruchy występujące w wirniku mogą być ważne dla projektowania lub pracy turbiny. Obejmują one kierunki płaszczyznowe, krawędziowe i skrętne.

Ruchy płaszczyznowe są to ruchy prostopadłe do płaszczyzny wirnika i są przyjmowane jako dodatnie w kierunku naporu. Siły płaszczyznowe są źródłem największych aerodynamicznych momentów skręcających i odpowiednio najważniejszych naprężeń.

Ruchy różnicowe lub krawędziowe są w płaszczyźnie wirnika i uznaje się je za dodatnie gdy są w kierunku momentu. Fluktuacje ruchu w tym kierunku odbijają się w mocy.

Ruchy skrętne dotyczą skręcania łopaty dookoła jej osi wzdłużnej. Moment skręcający w łopacie musi być obliczony w projekcie mechanizmu sterowania kątem ustawienia.

Najważniejszym obciążeniem wirnika jest napór. Jest to całkowita siła działająca na wirnik w kierunku wiatru (płaszczyznowa). Jest ona związana z zamianą energii kinetycznej wiatru w energię mechaniczną. Napór T , (N) jest wyrażany wzorem:

$$T = C_T \frac{1}{2} \rho R^2 U^2 \quad (18)$$

gdzie C_T jest współczynnikiem naporu. Dla idealnego wirnika, w którym czynnik indukcji osiowej a jest równy $1/3$ (odpowiednio do limitu Betza), jest łatwo wykazać, że współczynnik naporu jest równy $8/9$. Dla tego samego wirnika współczynnik naporu może być wyższy niż $1,0$, ale nie może to nastąpić, gdy $C_p = C_{p \text{ Betz}}$.

Ten napór powoduje wzrost płaszczyznowego momentu zginającego w gnieździe łopaty. Dla przykładu dla idealnego wirnika, gdy $a = 1/3$ i przyjmując bardzo małą piastę, można wykazać, że płaszczyznowy moment zginający M_β w gnieździe łopaty będzie ujęty wzorem:

$$M_\beta = \frac{T R}{B} \quad (19)$$

gdzie B = liczba łopat

Z momentu zginającego łatwo przejść do obliczenia maksymalnego naprężenia zginającego w łopacie. Dla przykładu zakładamy, że łopata jest $2t$ m gruba u nasady, ma symetryczny profil i że siła naporu jest prostopadła do cięciwy. Naprężenie gnące będzie:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M_\beta t}{I_\beta} \quad (20)$$

(Należy pamiętać, że w przypadku rzeczywistej łopaty asymetria i kąty mogą skomplikować obliczenia, ale zasada jest ta sama).

Innym istotnym obciążeniem jest moment obrotowy, Q (Nm). Moment obrotowy jest wyrażony wzorem:

$$Q = C_Q \frac{1}{2} \rho R^3 U^3 \quad (21)$$

gdzie C_Q = współczynnik momentu obrotowego, który także jest równy C_P/λ .

Należy zauważyć, że moment obrotowy jest również wyrażony wzorem:

$$Q = P/\omega \quad (22)$$

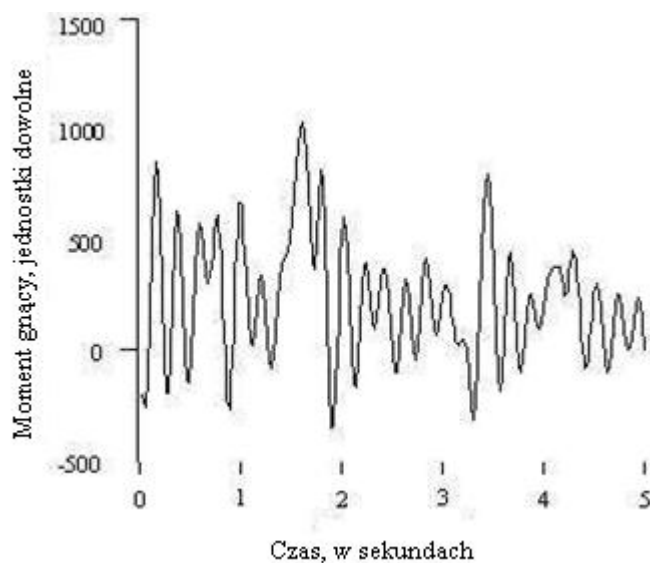
gdzie P = moc (W)

Dynamika wirnika turbiny wiatrowej jest bardzo skomplikowana i nie pozwala na proste zilustrowanie. Istnieje jedno podejście, opracowane przez Stoddard'a (Eggleston i Stoddard, 1987) i podsumowane w pracy autorstwa Manwell et al., (2009), które jest względnie zrozumiałe, ale nie będzie tutaj omawiane. Ogólnie reakcja dynamiczna wirnika turbiny wiatrowej musi być symulowana przez modelowanie komputerowe, takie jak FAST (Jonkman, 2005) opracowany przez Państwowe Laboratorium Energii Odnawialnej.

AA.7.b Zmęczenie

Zmęczenie jest ważnym zjawiskiem we wszystkich turbinach wiatrowych. Nazwa odnosi się do degradacji materiałów na skutek zmiennych naprężeń. Takie naprężenia powstają ciągle w turbinach wiatrowych ze względu na naturalną zmienność wiatru, obracanie się wirnika oraz odchylanie zespołu gondoli wirnika (RNA) w celu nadążania za zmiennym kierunkiem wiatru. Zmęczenie powoduje skrócenie żywotności wielu materiałów i musi być uwzględnione podczas projektowania. Rysunek AA.9 pokazuje typową historię przebiegu momentu gnącego, który może zwiększać zmienne obciążenia o podobnym wyglądzie.

Rysunek AA.9: Typowy moment gnący łopaty turbiny wiatrowej



Zdolność materiału do wytrzymania zmiennych naprężeń o różnych wielkościach jest pokazana jako typowa na krzywej S-N. Na takiej krzywej poziom naprężeń jest pokazany na osi y i jest rysowany w trakcie trwania cykli aż do rozerwania próbki. Jak widać na powyższym rysunku, zmiany naprężeń o wielu wielkościach występują często. Szereg cykli o różnych zakresach odpowiada za kolejne zniszczenia, a każdy cykl pogłębia szkody, zgodnie z „zasadą Minera”. W tym przypadku wartość zniszczenia d , na skutek n cykli, w czasie których naprężenie jest takie, że N cykli doprowadzi do zniszczenia jest ustalana jak niżej:

$$d = n/N \quad (23)$$

Zasada Minera określa, że suma wszystkich zniszczeń D , z cykli o wszystkich wielkościach musi być mniejsza niż 1,0 w przeciwnym razie nastąpi rozerwanie:

$$D = \sum n_i / N_i < 1 \quad (24)$$

Zasada Minera sprawdza się najlepiej, gdy cykle są względnie proste. Jeżeli cykle następujące kolejno po sobie mają zmienną amplitudę, stosuje się zliczanie cykli algorytmem „płynącego deszczu” (Downing and Socie, 1982).

AA.8 Komponenty turbin wiatrowych

Turbiny wiatrowe składają się z dwóch głównych podsystemów – zespołu gondoli wirnika oraz konstrukcji wsporczej. Każdy z nich składa się z wielu elementów. Poniżej podajemy nieco

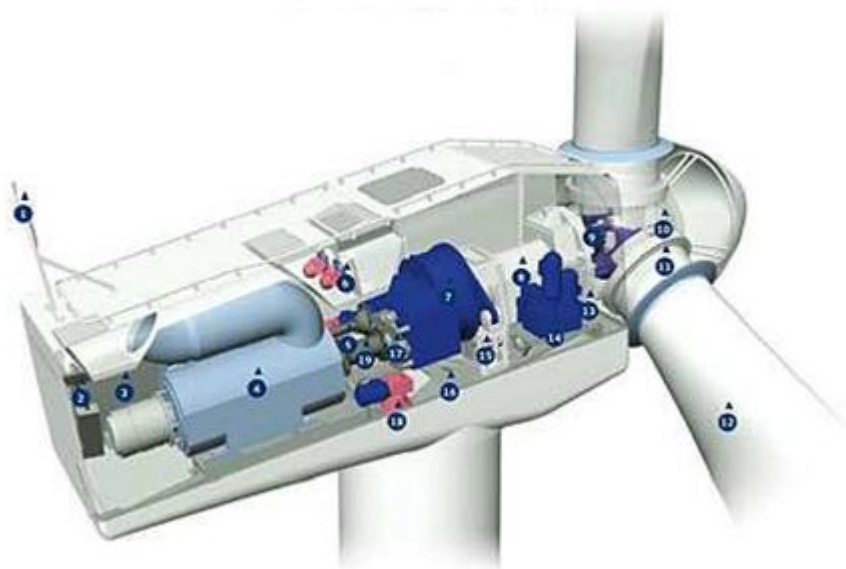
szerszy opis tych podsystemów. Bardziej szczegółowe informacje, szczególnie dotyczące zespołu gondoli wirnika można znaleźć w pracy (Manwell et al., 2009).

AA.8.a Zespół gondoli wirnika

Zespół gondoli wirnika (RNA) obejmuje większość komponentów związanych z przekształcaniem energii kinetycznej wiatru w energię elektryczną. Są tam dwie główne grupy komponentów oraz wiele komponentów pomocniczych. Głównymi grupami są wirnik oraz zespół napędowy. Wirnik obejmuje łopaty, piastę i komponenty sterowania kątem ustawienia. Zespół napędowy obejmuje wały, łożyska, przekładnię (jeżeli jest zastosowana), sprzęgła, hamulec mechaniczny i generator. Inne komponenty obejmują płytę montażową, łożyska i napęd odchylania, system chłodniczy oleju, kontrola temperatury, inne komponenty elektryczne oraz części układu sterowania. Przykład typowego zespołu gondoli wirnika jest pokazany na rysunku AA.10.

Rysunek AA.10: Typowy zespół gondoli wirnika

Specyfikacja techniczna



(źródło: Vestas http://re.emsd.gov.hk/english/wind/large/large_to.html)

- 1 – Ultradźwiękowy czujnik wiatru
- 2 – podnośnik obsługowy
- 3 – VMP górny sterownik z konwerterem
- 4 – generator OptiSpeed

- 5 – siłownik zmiany kąta ustawienia
- 6 – chłodnice oleju i wody
- 7 – przekładnia
- 8 – wał główny
- 9 – system zmiany kąta ustawienia
- 10 – piasta łopat
- 11 – łożysko łopaty
- 12 – łopata
- 13 – system blokowania wirnika
- 14 – zespół hydrauliczny
- 15 – ramię reakcyjne
- 16 – fundament maszyny
- 17 – mechaniczny hamulec tarczowy
- 18 – przekładnia zmiany kąta ustawienia
- 19 – sprzęgło tarczowe kompozytowe

AA.8.b Wirnik

Głównymi komponentami wirnika są łopaty. Współcześnie większość turbin wiatrowych ma trzy łopaty i są one ustawione do pracy pod wiatr. Przewiduje się, że w przyszłości niektóre turbiny wiatrowe, szczególnie te przewidziane do pracy na morzu, będą miały dwie łopaty i będą ustawione do pracy z wiatrem. Z różnych powodów (łącznie z tym, że turbiny pracujące z wiatrem mają tendencję do głośniejszej pracy) ich stosowanie na lądzie, szczególnie na terenach zamieszkałych, jest mniej prawdopodobne.

Kształt łopat jest dobierany zgodnie z zasadami omówionymi powyżej. Kolejnym ważnym czynnikiem jest wymagana wytrzymałość łopat. Ze względów wytrzymałościowych często grubszy profil jest zastosowany bliżej nasady łopaty, a nie blisko końcówki. Łopaty większości nowoczesnych turbin wiatrowych są wykonane z kompozytów. Głównie są to laminaty z włókien szklanych z dodatkiem włókien węglowych dla dodatkowego wzmocnienia. Spoiwem jest poliester lub epoksyd.

Przy nasadzie łopaty materiał kompozytowy jest połączony ze stalowym gniazdem, które może następnie być przykręcone do piasty. Większość współczesnych turbin o wydajności użytkowej jest wyposażona w sterowanie kątem ustawienia łopat. Jest to mechanizm wbudowany pomiędzy piastą a łopatom tak, że zarówno zabezpiecza mocowanie łopaty, jak i umożliwia jej obrót dookoła osi wzłużnej.

Piasta wirnika turbiny wiatrowej jest wykonana ze stali. Jest zaprojektowana w ten sposób, aby z jednej strony była połączona z wałem zespołu napędowego, a z drugiej strony z łopatom.

AA.8.c Zespół napędowy

Zespół napędowy składa się z wielu komponentów, łącznie z wałami, sprzęgłami, przekładnią (zazwyczaj), generatorem i hamulcem.

AA.8.d Wały

Wał główny zespołu napędowego jest przeznaczony do przekazywania momentu obrotowego z wirnika do przekładni (jeżeli jest) lub bezpośrednio do generatora, jeżeli nie ma przekładni. Ten wał może również być potrzebny do przenoszenia częściowo lub w całości ciężaru wirnika. Przykładowy moment obrotowy będzie się zmieniał wraz z wielkością wytwarzanej mocy, ale zasadniczo wynika ze stosunku moc do prędkości obrotowej. Jak omówiono uprzednio, głównym zagadnieniem branym pod uwagę przy projektowaniu aerodynamicznym wirnika turbiny wiatrowej jest współczynnik szybkobieżności. Typowy projektowy współczynnik szybkobieżności wynosi 7. Przykładowo, dla turbiny wiatrowej o średnicy 80 m, zaprojektowanej do pracy z największą sprawnością przy prędkości wiatru 12 m/s, prędkość obrotowa wirnika, a więc i wału głównego wyniesie 20 obr/min.

AA.8.e Przekładnia

Turbiny wiatrowe są przeznaczone do wytwarzania energii elektrycznej, ale większość konwencjonalnych generatorów jest zaprojektowana do pracy z wyższymi obrotami, niż wirniki turbiny wiatrowej (patrz powyższe). Dlatego powszechnie są używane przekładnie dla zwiększenia prędkości obrotowej wału napędzającego generator w stosunku do obrotów wału głównego. Przekładnie składają się z obudowy, kół zębatach, łożysk, wielokrotnych wałków, uszczelnień i układu smarowania. W turbinach wiatrowych są stosowane zarówno przekładnie z równoległymi wałami, jak i przekładnie planetarne. Często przekładnie są wielostopniowe, ponieważ maksymalne dopuszczalne przełożenie na jednym stopniu zazwyczaj jest mniejsze niż 10:1. Dobór przekładni wymaga kompromisu. Przekładnie o wałach równoległych są ogólnie tańsze niż planetarne, ale są cięższe. Przekładnie mają ogólnie wysoką sprawność i dlatego moc wyjściowa jest niemal równa mocy wejściowej. Moment obrotowy wałów jest dlatego równy mocy dawanej przez prędkość obrotową wału.

AA.8.f Hamulec

Niemal wszystkie turbiny mają hamulec mechaniczny ulokowany w zespole napędowym. Normalnie hamulce są zaprojektowane do zatrzymania wirnika we wszystkich wyobrażalnych

warunkach, chociaż w niektórych przypadkach mogą one służyć tylko jako hamulec postojowy wirnika. Hamulce mechaniczne w turbinach wiatrowych o skali użytkowej są często typu szczęki/tarcza, chociaż możliwe jest zastosowanie innych typów. Hamulce mogą być usytuowane zarówno po wolnoobrotowej, jak i szybkoobrotowej stronie przekładni. Zaletą umieszczenia po stronie szybkoobrotowej jest mniejszy moment obrotowy wymagany do zatrzymania wirnika. Z drugiej strony moment hamowania musi następnie przejść przez przekładnię, prawdopodobnie prowadząc do jej przedwczesnego zużycia. W obu przypadkach hamulec musi być tak zaprojektowany, aby zaabsorbować całą energię rotacyjną wirnika, która jest przetwarzana w ciepło podczas zatrzymywania wirnika.

AA.8.g Generator

Generatory elektryczne działają przez obracanie się uzwojeń w polu magnetycznym. Pole magnetyczne jest wywoływane przez jedną lub więcej par biegunów magnetycznych umieszczonych naprzeciwko siebie poprzez oś obrotu. Pole magnetyczne może być wywoływane zarówno przez elektromagnesy (jak w konwencjonalnych generatorach synchronicznych), przez indukcję wirnika (jak w generatorach indukcyjnych), bądź przez magnesy stałe. W systemie prądu zmiennego liczba par biegunów oraz częstotliwość sieci określają nominalną prędkość roboczą generatora. Dla przykładu w systemie 60 Hz prądu zmiennego, jak w Stanach Zjednoczonych, generator z dwoma parami biegunów miałby nominalną prędkość obrotową 1800 obr/min. W większości generatorów prądu zmiennego, pole obraca się, podczas, gdy prąd jest generowany w części stałej (stator).

Większość dzisiejszych przemysłowych turbin wiatrowych używa generatorów indukcyjnych pierścieniowych (WRIG). Ten typ generatora może pracować we względnie szerokim zakresie prędkości (rzędu 2:1). Generatory indukcyjne pierścieniowe są stosowane razem z elektroniczną przetwornicą mocy w obwodzie wirnika. Przy takim zestawieniu około 2/3 mocy jest wytwarzane w statorze w normalny sposób. Pozostała 1/3 część mocy jest wytwarzana w wirniku i przekształcana w prąd zmienny o prawidłowej częstotliwości przez elektroniczną przetwornicę mocy. WRIG w takim zestawieniu jest często określany mianem podwójnie zasilanego generatora indukcyjnego (DFIG).

Część turbin wiatrowych używa generatorów z magnesami stałymi. Tego rodzaju generatory często mają wiele par biegunów. Dzięki temu generator może mieć tą samą nominalną prędkość obrotową co wirnik turbiny wiatrowej, tak, że wał główny może być połączony bezpośrednio, bez zastosowania przekładni. Większość magnesów stałych jest zaprojektowana do współdziałania z elektroniczną przetwornicą mocy. Te przetwornice umożliwiają różną prędkość

roboczą turbiny, zapewniając wytwarzanie prądu elektrycznego o stałej częstotliwości i odpowiedniego dla sieci elektrycznej do której turbina jest przyłączona.

AA.8.h Płyta fundamentowa

Płyta fundamentowa jest stalową ramą, na której wspierają się komponenty zespołu napędowego i inne elementy gondoli wirnika turbiny. Zapewnia ona prawidłową współosiowość wszystkich komponentów.

AA.8.i Układ odchylania

Większość dzisiejszych turbin posiada układ odchylania. Ten układ ustawia gondolę wirnika turbiny w kierunku wiatru, zgodnie ze zmianami kierunku wiatru. Przede wszystkim zainstalowane jest łożysko tulejowe łączące gondolę z górną częścią wieży, umożliwiając obrót gondoli w stosunku do wieży. Do górnej części wieży jest przymocowana również przekładnia skośna o wielkiej średnicy, często na zewnątrz obwodu łożyska tulejowego. Silnik odchylania połączony z małą przekładnią jest zamocowany na płycie montażowej. Gdy silnik odchylania zostaje uruchomiony, mała przekładnia napędza przekładnię skośną, powodując zmianę położenia gondoli w stosunku do wieży. Sterownik odchylenia zapewnia, że ruch następuje we właściwym kierunku i trwa aż do momentu, gdy gondola jest ustawiona w osi wiatru. Hamulec odchylania utrzymuje gondolę w ustalonym położeniu, aż do momentu otrzymania nowego kierunku ze sterownika.

AA.8.j Układ sterowania

Turbina wiatrowa ma układ sterowania, który przez cały czas zapewnia prawidłową pracę turbiny. Układ sterowania ma do spełnienia dwie ważne funkcje: kontroli oraz sterowania dynamicznego. Kontrola polega na ciągłym monitorowaniu warunków zewnętrznych i parametrów roboczych turbiny oraz jej uruchomieniu lub zatrzymaniu w razie potrzeby. Układ sterowania dynamicznego zapewnia płynną pracę różnych regulowanych komponentów, takich, jak skok łopat lub moment obrotowy generatora elektrycznego. Układ sterowania może być zarówno zintegrowany, jak i co najmniej skomunikowany z systemem monitorowania warunków który nadzoruje parametry różnych ważnych elementów.

AA.8.k Konstrukcja wsporcza

Konstrukcją wsporczą turbiny wiatrowej jest każda część turbiny poniżej głównego łożyska. Konstrukcja wsporcza turbiny umieszczonej na lądzie można myślowo podzielić na dwie

główne części: wieżę i fundament. Wieża turbiny wiatrowej jest normalnie wykonana ze stalowych stożkowych rur. Rury są łączone śrubami na miejscu montażu, tworząc prostą strukturę o wymaganej wysokości. Fundament turbiny wiatrowej jest częścią konstrukcji wsporczej, która styka się z gruntem. Typowo fundamenty są wykonywane ze zbrojonego betonu. Jeżeli turbina jest instalowana na skałach, fundament może być połączony ze skałą prętami, które są zabetonowane we wcześniej wywierconych otworach.

AA.8.1 Materiały na turbiny wiatrowe

Głównymi rodzajami materiałów zastosowanych w różnych komponentach turbiny wiatrowej są stal, miedź, kompozyty oraz beton.

AA.9 Montaż

Montaż turbin wiatrowych może być znaczącym przedsięwzięciem. Obejmuje poniższe:

- Pełna ocena warunków miejscowych
- Dokładne przygotowanie do montażu
- Wykonanie fundamentów
- Dostawa komponentów na miejsce
- Montaż komponentów w podzespoły
- Podnoszenie dźwigiem podzespołów na ich miejsce
- Instalacja wyposażenia elektrycznego
- Próby końcowe

Więcej szczegółów można znaleźć w pracy (Manwell et al., 2009).

AA.10 Produkcja energii

Przeznaczeniem turbin wiatrowych jest produkcja energii. Produkcja energii zazwyczaj jest rozpatrywana w ujęciu rocznym. Wielkość energii, jaką turbina wyprodukuje w ciągu roku, E_y jest funkcją zasobów wiatru w miejscu, gdzie jest zainstalowana turbina oraz krzywą mocy turbiny wiatrowej. Oszacowania są zazwyczaj dokonywane przez obliczenie przewidywanej energii, jaka może być wytworzona przez każdą godzinę w statystycznym roku, a następnie zsumowanie energii ze wszystkich tych godzin, jak pokazano poniżej:

$$E_y = \sum_{i=1}^{8760} P_{WT} U_i \quad t \quad (25)$$

gdzie U_i jest prędkością wiatru przez i godzin przez rok, $P_{WT}(U_i)$ jest średnią mocą (opierając się na krzywej mocy) podczas i godzin, a Δt jest długością okresu czasu, którym się zajmujemy (tutaj jedna godzina). Jednostką energii jest Wh, ale ilość wyprodukowanej energii jest często wyrażana raczej w kWh lub MWh.

Czasem jest nieporęczniej charakteryzować osiągi turbiny wiatrowej przez rzeczywistą produkcję energii. Dlatego też używany jest znormalizowany termin, znany jako współczynnik wykorzystania CF. Jest on ustalany przez podzielenie rzeczywistej ilości produkowanej energii (bądź przewidywanej do wyprodukowania) przez ilość energii, jaka mogłaby być wytworzona, gdyby turbina pracowała ze swoją mocą znamionową P_R przez cały rok. Oblicza się ją z poniższego równania:

$$CF = \frac{E_p}{8760 P_R} \quad (26)$$

AA.11 Zmienne aspekty działania turbin wiatrowych

Jest wiele niestabilnych aspektów działania turbiny wiatrowej, które są ważne dla omówienia reakcji społecznej na turbiny wiatrowe. Obejmują one w szczególności zmiany pola wiatru, które mogą zmieniać charakter dźwięku emitowanego podczas pracy wirnika. Te niestabilne aspekty obejmują poniższe:

1. Gradient wiatru – gradient wiatru jest to zmiana prędkości wiatru w jakimś wymiarze przestrzennym. Gradient wiatru najczęściej jest zjawiskiem pionowym i jest wzrastaniem prędkości wiatru wraz z wysokością. Gradient wiatru może w pewnych okolicznościach również wystąpić poprzecznie przez wirnik. Pionowy gradient wiatru jest często modelowany prawem sił, jak omówiono wcześniej. Są jednak pewne sytuacje, w których taki model nie może być zastosowany. Jednym z przykładów jest bardzo stabilna atmosfera, w której wiatr przy ziemi jest względnie lekki, ale na wysokości wirnika jest wystarczający dla pracy turbiny. W takich warunkach wirnik może emitować dźwięki, ale względnie lekki wiatr indukuje dźwięk przy ziemi, który maskuje ten z wirnika. Gradient wiatru może również powodować cyklicznie zmieniający się rodzaj dźwięku wydawanego przez łopaty podczas ich obrotu. Następuje to z powodu zmian wielkości i kierunku wiatru względem łopat przecinających strefy z różną prędkością wiatru.
2. Zacienienie lub blokada wieży - przepływ wiatru obok wieży jest nieuchronnie inny, niż przez puste miejsce. Efekt tego jest bardziej słyszalny w turbinach

wiatrowych z wirnikami pracującymi z wiatrem, ale również występuje w wirnikach pracujących pod wiatr. Efekt wieży może wywołać wyraźną zmianę dźwięku jedynie przez obrót każdej łopaty.

3. Turbulencje – Turbulencje oznaczają zmiany w wielkości i kierunku wiatru w różnych skalach czasu i długości. Występowanie turbulencji może wpływać na charakter dźwięku.
4. Zmiany kierunku wiatru – Turbiny wiatrowe są projektowane do odchylania się w reakcji na zmianę kierunku wiatru. Proces odchylania trwa określony czas, podczas którego wiatr napiera na wirnik z różnych kierunków, aż do czasu zakończenia procesu ustawiania. Dźwięki powstające podczas procesu odchylania mogą mieć nieco inny charakter, niż po jego zakończeniu.
5. Przeciągnięcie – W pewnych warunkach część lub cały profil łopaty może wpaść w przeciągnięcie. Występuje to wtedy, gdy kąt wiatru względnego jest wystarczająco duży, aby profil zaczął tracić nośność. Mogą być wytwarzane również dodatkowe turbulencje. Charakter dźwięków wytwarzanych przez wirnik może być inny, niż podczas normalnej pracy. Można również odnotować, że niektóre turbiny celowo osiągają przeciągnięcie dla ograniczenia siły silnego wiatru. W tych warunkach mogą one również zmienić swój dźwięk w porównaniu do normalnej pracy.

AA.11.a Okresowość zmiennych aspektów działania turbin wiatrowych

Z powodu obracania się wirnika oraz natury wiatru, występuje tendencja do pewnych właściwości działania turbin, które z natury są okresowe. Najbardziej dominujące mają częstotliwości związane z prędkością obrotową wirnika i częstością przechodzenia łopat, która jest po prostu prędkością obrotową razy liczba łopat. Dla przykładu, dominującymi częstotliwościami trójłopatowej turbiny wiatrowej obracającej się z prędkością 20 obr/min mogą być 0,33 Hz lub 1 Hz. Innymi ważnymi częstotliwościami mogą być pierwsze harmoniczne częstotliwości obracania się i częstotliwości przechodzenia łopat.

AA.12 Turbiny wiatrowe i ograniczanie zanieczyszczania środowiska

Turbiny wiatrowe mają pozytywny wpływ na ludzkie zdrowie, ponieważ zapobiegają emisji zanieczyszczeń, które mogłyby powstawać, gdyby wytwarzana przez turbiny elektryczność była produkowana przez inne generatory. O ile średnia emisja różnych zanieczyszczeń na wyprodukowanie 1 MWh w konwencjonalnych generatorach jest względnie łatwa do oszacowania, trudniej jest oszacować rzeczywisty wpływ turbin wiatrowych. Wynika to z faktu, że energia

elektryczna rozprowadzana przez sieć energetyczną jest wytwarzana w różnych typach generatorów i dostawa części całkowitej potrzebnej mocy przez turbiny wiatrowe różnie wpływa na działanie tych generatorów.

Ogólnie elektryczność w dowolnej wielkiej sieci przemysłowej pochodzi z trzech różnych typów generatorów: elektrowni podstawowych, pośrednich oraz z elektrowni „szczytowych”. Paliwo lub źródła energii dostarczane do tych generatorów są różnorodne, jak węgiel, olej opałowy, gaz ziemny, uran (elektrownie atomowe) lub woda (elektrownie wodne). Elektrownie podstawowe zaspokajają podstawowe zapotrzebowanie na energię i typowo są opalane węglem lub są to elektrownie atomowe. Elektrownie dla średniego obciążenia zazwyczaj są opalane olejem opałowym lub gazem ziemnym. Elektrownie szczytowe zasilane są gazem ziemnym, lub są to elektrownie wodne. Większość elektrowni może pracować w każdym żądanym czasie. O tym, która elektrownia jest uruchomiona decyduje operator systemu, uwzględniając położenie najbliższe do spodziewanego obciążenia i szacując (oferowany) koszt MWh z każdej elektrowni działającej w systemie. Oblicza się to ze sprawności cieplnej paliwa (kg/MWh) dla danej elektrowni w wymaganym czasie oraz kosztu paliwa (\$/kg). Elektrownie o mniejszej sprawności lub z wyższymi kosztami jednostkowymi paliwa mają relatywnie wysoką cenę ofertową. (Należy zauważyć, że z drugiej strony turbiny wiatrowe mogą mieć zerowe koszty ofertowe, gdyż nie zużywają one paliwa).

Jeżeli pracuje duża liczba turbin wiatrowych, tak, że mają one znaczny udział w dostawie całkowitej mocy elektrycznej, udział pozostałych rodzajów elektrowni się różni od przedstawionego powyżej (bez turbin wiatrowych). Jeżeli jednak udział turbin wiatrowych jest niewielki, udział pozostałych generatorów nie zmienia się. Niektóre elektrownie mogą ograniczyć swoją produkcję energii i w ten sposób zużywać mniej paliwa. Można wyliczyć emisję zanieczyszczeń ze wszystkich pracujących elektrowni i podobnie można wyliczyć, jaka byłaby przewidywana emisja zanieczyszczeń, gdyby odjąć udział turbin wiatrowych w generowaniu prądu. Różnica w ilości wytwarzanych zanieczyszczeń to zmniejszenie emisji, które zawdzięczmy turbinom wiatrowym.

Poprawne wykonanie takiej analizy wymaga oszacowania rzeczywistego wpływu turbin wiatrowych na udział różnych typów elektrowni i poziom ich wykorzystania w każdej godzinie roku. Jest to zadanie bardzo złożone, ale zostało wykonane dla morskiej farmy wiatrowej projektowanej dla miasta Hull w Massachusetts. Ten projekt obejmował cztery turbiny 3,6 MW o łącznej mocy 14,4 MW. Zanieczyszczeniami uwzględnionymi w studium były CO₂, NO_x i SO_x. Wyniki tego studium są szczegółowo opisane w pracy (Rached, 2008) i podsumowane w tabeli AA.1. Wyniki podane w tabeli są znormalizowane dla turbiny wiatrowej o mocy nominalnej 1

MW oraz średniej prędkości wiatru w tej lokalizacji. (W studium Rached'a przyjęto, że jeden MW (nominalny) turbiny wizytowej przy założeniu średniej prędkości wiatru w saniej lokalizacji może wytworzyć 2.580 MWh/rok).

Tabela AA.1:

Redukcja emisji zanieczyszczeń w projekcie wiatrowym o mocy 14,4 MW (według Rached 2008)

CO ₂ (kg/MWh/rok)	SO _x (kg/MWh/rok)	NO _x (kg/MWh/rok)
1 970 000	3 480	1 490

Prostsza, lecz mniej dokładną metodą oszacowania zredukowanej emisji zanieczyszczeń jest zastosowanie współczynników krańcowych dla zanieczyszczeń, jak zaproponowano w polityce dotyczącej gazów cieplarnianych stanu Massachusetts (MEPA, 2007). Stosując tą metodę, Rachel wyliczył, że zredukowana emisja zanieczyszczeń na MW (nominalny) dla tych trzech czynników na rok wyniosłoby odpowiednio 1 320 000 kg CO₂, 2 080 kg SO_x i 701 kg NO_x.

W analizie opisanej powyżej największa część zredukowanej emisji zanieczyszczeń wynika ze zmniejszenia zużycia gazu ziemnego. Gdyby większa część energii w stanie Massachusetts była produkowana przez energię wiatrową, nastąpiłoby znaczące zmniejszenie zużycia oleju opałowego i węgla. Spowodowałoby to większą redukcję emisji na jednostkę wytwarzaną przez turbiny wiatrowe.

Załącznik B

Turbiny wiatrowe – migotanie cieni

AB.1 Migotanie cieni i błyskanie

Migotanie cieni występuje, gdy poruszające się łopaty wirnika turbiny wiatrowej rzucają poruszające się cienie, powodujące efekt migotania. To migotanie może drażnić ludzi mieszkających blisko turbiny. Podobnie jest ze światłem słonecznym, które odbijając się od błyszczących powierzchni łopat powoduje efekt „błyskania”. To zjawisko następuje w ograniczonych momentach w ciągu roku, w zależności od wysokości położenia słońca α_s ; wysokości turbiny H , promienia wirnika R oraz wysokości, kierunku i odległości położenia punktu obserwacyjnego. W danym czasie maksymalna odległość od turbiny, do której dociera migotanie cieni jest wyrażona wzorem:

$$x_{\text{cień, max}} = H R \frac{h_{\text{widok}}}{\tan \alpha_s} \quad (27)$$

gdzie h_{widoku} jest wysokością punktu obserwacyjnego.

Wysokość położenia słońca zależy od szerokości geograficznej, dnia roku oraz pory dnia i jest podana poniższym równaniem (Duffie and Beckman, 2006):

$$\alpha_s = 90^\circ - \cos^{-1}(\cos(\phi) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(\phi) \sin(\delta)) \quad (28)$$

gdzie δ = deklinacja osi ziemskiej, ϕ szerokość geograficzna oraz ω = kąt godzinowy
Deklinacja jest obliczana z następującego wzoru:

$$\delta = 23.45 \sin(360(284 + n)/365) \quad (29)$$

gdzie n = dzień roku.

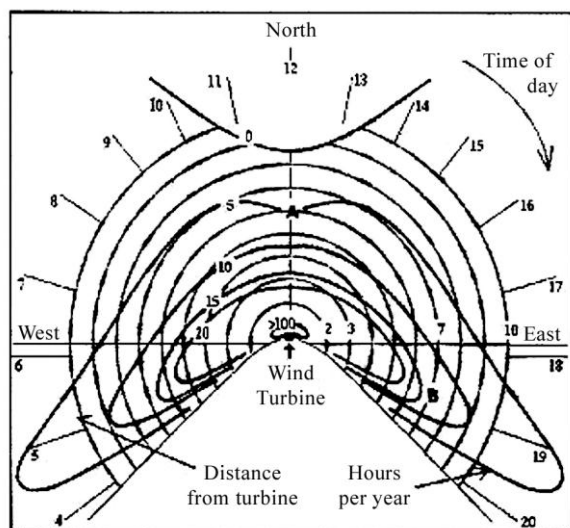
Kąt godzinowy oblicza się dla godzin od południa (czas słoneczny, ujemny przed południem, dodatni po południu), podzielonych przez 15 dla przekształcenia w stopnie.

Innym odnoszącym się kątem, jest azymut słońca. Wskazuje on kąt słońca w stosunku do stałego kierunku odniesienia (zazwyczaj północ) w konkretnym czasie. Dla przykładu, słońce zawsze jest na południu w południe słoneczne tak, że azymut w tym czasie wynosi 180° . Azymut słoneczny jest ważny, gdyż określa kąt cienia turbiny wiatrowej w stosunku do wieży. Szczegółowe obliczenia azymutu słonecznego podano w opracowaniu Duffie and Beckman (2006).

Przykładowo, rozpatrzmy miejsce znajdujące się na szerokości geograficznej 43° . Przyjmijmy, że jest to 1 marca (dzień 60) i godzina 3:00 po południu. Przyjmijmy również, że wysokość wieży turbiny wynosi 80 m, promień wirnika 30 m, a wysokość punktu obserwacyjnego 2 m. Deklinacja wynosi $-8,3^\circ$, wysokość słońca $24,4^\circ$, a azymut słoneczny $50,2^\circ$ południowo-zachodni. Maksymalny zasięg cieni wynosi 238 m od turbiny. Kąt cieni wynosi $50,2^\circ$ północno-wschodniej.

Poszczególne lokalizacje są charakteryzowane typowo przez wykresy takie, jak pokazany na rysunku AB.1 dla miejscowości w Danii (EWEA, 2004). Wykres podaje liczbę godzin w roku, w których występuje migotanie cieni w funkcji kierunku i odległości (mierzone w jednostkach wysokości piasty). W pokazanym przykładzie przewidziano dwa punkty obserwacyjne. Jeden z nich (A) znajduje się wprost na północ od turbiny w odległości 6 razy większej od wysokości piasty. Drugi (B) jest położony na południowy wschód w odległości 7 razy większej od wysokości piasty. Rysunek pokazuje, że w pierwszym punkcie obserwacyjnym migotanie cieni z turbiny będzie można obserwować przez 5 godzin na rok. W drugim punkcie obserwacyjnym migotanie wystąpi przez 12 godzin na rok.

Rysunek AB.1: Wykres obliczonego migotania cieni (EWEA, 2004)



A, B są punktami obserwacyjnymi.

Należy zwrócić uwagę na to, że powyższe równanie zakłada czyste niebo i brak deszczu, chmur itp.

AB.2 Możliwości łagodzenia zjawiska

Większość nowoczesnych turbin wiatrowych pozwala na komputerowe sterowanie pracą turbiny w czasie rzeczywistym, w celu jej wyłączania w czasie największego migotania cieni, jeżeli jest to konieczne. W dodatku oprogramowanie komputerowe pozwala na wstępne analizy lokalizacyjne, aby poznać specyficzne dla tego projektu oddziaływania migotania cieni i ująć je w procesie projektowania turbiny wiatrowej (jak to omówiono w poprzednim paragrafie). Takie planowanie może być specyficzne dla danego miejsca, aby uniknąć potencjalnych problemów związanych z usytuowaniem geograficznym lub z warunkami pogodowymi.

Przy określaniu bezpiecznej odległości dla zredukowania migotania cieni, często występują specyficzne uwarunkowania zależne od tego, czy znajdują się tam domy mieszkalne lub drogi oraz od układu topograficznego. Może to być szczególnie ważne na obszarach bardziej zalesionych i z istniejącymi zacienieniami, które mogą zmniejszać dokuczliwość migotania cieni generowanego przez turbinę, lub też z drugiej strony na otwartych przestrzeniach równinnych, takich jak pola uprawne, może to być bardziej dokuczliwe i wywoływać rozdrażnienie wynikające z migotaniem cieni. Ogólnie szacuje się do określania strefy zagrożenia migotaniem cieni odległość 10 razy większą od średnicy wirnika, tak że średnicy 90 m

odpowiada strefa oddziaływania 900 m. Jednakże tylko w określonych częściach tej strefy w rzeczywistości występuje prawdopodobieństwo migotania cieni przez znaczący czas. Inne modele rozpatrują sytuacje, w których co najmniej 20% słońca jest zasłaniane przez łopaty i przewidują włączenie szerokości łopat do obliczeń. Program komputerowy WindPro przyjmuje odległość 2000 m jako granicę szacowania (NEWEEP, 2011) dla obliczeń zasięgu migotania cieni wywoływanego przez turbinę. Na tych podstawach przyjmuje się, uwzględniając efekty atmosferyczne, że prawdopodobieństwo znacznego migotania cieni występuje w maksymalnej odległości 1400 m od turbiny.

W Massachusetts nie ma obecnie stanowych przepisów dotyczących migotania cieni (również w kilku innych stanach Nowej Anglii), ale stosuje się wytyczne krajowe i lokalne. Te wytyczne zostały opracowane przez Departament Zasobów Energetycznych w marcu 2009 i ustalono w nich, że „turbiny wiatrowe winny być lokalizowane w ten sposób, aby zminimalizować oddziaływanie zacieniania lub migotania” oraz, że „na wnioskodawcy spoczywa obowiązek wykazania, że jego skutki nie mają znacznego negatywnego wpływu na okolicznych mieszkańców lub przyległych użytkowników”. Lokalne przepisy obejmują rozporządzenie z Worcester, MA, zgodnie z którym „Właściciel obiektu oraz jego operator muszą podjąć odpowiednie działania dla zminimalizowania migotania cieni w każdym zamieszkałym budynku w posiadłościach właścicieli nie uczestniczących w projekcie”. Wymagany jest również raport z oszacowania przewidywanego migotania cieni, a także plan pokazujący „obszar przewidywanego migotania cieni turbiny wiatrowej”. Podobnie przepisy z Newburyport, MA, wymagają, aby turbiny wiatrowe nie wywoływały istotnych oddziaływań cieni lub migotania, a dla planowanego projektu jest wymagane przeprowadzenie stosownej analizy (NEWEEP, 2011).

Rozporządzenie dotyczące obiektów energii wiatrowej w stanie Maine określa, że projekty turbin wiatrowych powinny „uniknąć nieuzasadnionych negatywnych efektów migotania cieni w każdym zamieszkałym budynku w posiadłościach właścicieli nie uczestniczących w projekcie”. Poza powyższymi wytycznymi, nie ma żadnych specyficznych ograniczeń dla migotania cieni. Jednakże w New Hampshire rozporządzenie dotyczące Systemów Małych Elektrowni Wiatrowych wymaga, żeby turbiny wiatrowe „były zlokalizowane w taki sposób, aby nie powodowały znaczącego migotania cieni (...) znaczące migotanie cieni jest zdefiniowane jako migotanie ponad 30 godzin w ciągu roku na powierzchni ścian zamieszkałych budynków”. Podobnie do Maine, wiele stanów w USA adoptowało niemiecki model 30 godzin na rok dopuszczalnego migotania cieni, co jest oparte na sponsorowanych przez rząd badaniach omówionych powyżej. Mimo to w niektórych stanach, na przykład w miejscowości Hutchinson w Minnesocie, obowiązują surowsze wytyczne, nawet zakazujące migotania cieni na istniejących obiektach mieszkalnych, a dopuszczające do 30 godzin na rok migotania cieni na drogach i posiadłościach na terenach zabudowanych. Do wydania pozwolenia na realizację projektu konieczne jest przeprowadzenie odpowiedniej analizy komputerowej (NEWEEP, 2011).

Większość stanów zaleca stosowanie programów komputerowych takich jak WindPro we wszystkich nowych projektach, dla zredukowania potencjalnych dokuczliwości migotania cieni dla posiadłości mieszkalnych lub potencjalnego zagrożenia dla bezpieczeństwa kierowców na obciążonych drogach lub autostradach.

Załącznik C

Turbiny wiatrowe – miotanie lodem

AC.1 Spadanie lub miotanie lodem przez turbinę wiatrową

W pewnych warunkach pogodowych na łopatach turbiny wiatrowej może tworzyć się lód. Normalnie turbiny wiatrowe przewidziane do użycia w miejscach, gdzie może formować się lód, są zaprojektowane tak, aby wyłączały się, jeżeli na łopatach znajdzie się znacząca ilość lodu. Sposoby zapobiegania pracy turbiny w przypadku nagromadzenia się lodu obejmują czujniki oblodzenia i czujniki drgań. Czujniki oblodzenia są stosowane w większości turbin wiatrowych w zimnym klimacie. Czujniki drgań są stosowane niemal we wszystkich turbinach. Mogą one zatrzymać turbinę na przykład w przypadku, gdy lód na łopatach powoduje niewyważenie wirnika i wynikające z tego wyczuwalne drgania konstrukcji.

Lód powstający na łopatach normalnie spada z nich podczas postoju turbiny. Jeżeli zdarzy się to podczas silnego wiatru, lód może być zdmuchnięty przez wiatr na pewną odległość od wieży. W dodatku w pewnych okolicznościach lód może być rzucony przez obracającą się łopatę turbiny wiatrowej, chociaż najbardziej prawdopodobnie może to nastąpić tylko podczas uruchamiania (gdy prędkość obrotowa jest wciąż względnie mała) lub w wyniku uszkodzenia systemu sterowania. Dlatego należy rozważyć ustalenie maksymalnej prawdopodobnej odległości, w jakiej może upaść kawałek lodu z turbiny w razie wystąpienia dwóch „najgorszych scenariuszy”: 1) lód spada z zatrzymanej turbiny podczas bardzo silnego wiatru, i 2) lód jest nagle oderwany od łopaty podczas obracania się wirnika z normalną prędkością roboczą.

W obu przypadkach odległość, jaką może przebyć lód podlega prawom Newtona oraz zasadom mechaniki płynów. Obliczenia są całkiem proste, jeżeli pominie się oddziaływanie powietrza (oraz wiatru). Dla przykładu w przypadku kawałka lodu spadającego z turbiny, spadnie on bezpośrednio poniżej miejsca odpadnięcia od łopaty. Sytuacja jest nieco bardziej skomplikowana, ale wciąż łatwa do przewidzenia, jeżeli bryła lodu jest w ruchu podczas odpadania. Przykładowo założmy, że lód początkowo znajduje się na końcówce łopaty ustawionej pionowo do góry. Po odpadnięciu lód będzie kontynuował ruch poziomy z prędkością, jaką miał znajdując się na łopacie. Jednocześnie jednak zacznie spadać w dół ku ziemi, tak że kawałek lodu będzie miał dwie składowe prędkości aż do momentu uderzenia o ziemię. Czas t_g (s) do spadnięcia lodu na ziemię (przyjmując poziomą powierzchnię) wynosi $t_g = \sqrt{2h/g}$, gdzie h = wysokość (m) na której lód odpadł od łopaty, a g = przyspieszenie ziemskie ($9,81 \text{ m/s}^2$). Odległość na x (m), na którą może polecieć lód wyliczamy ze wzoru $x = t_g R$, gdzie Ω jest prędkością obrotową wirnika (rad/s), a R jest długością łopaty (m).

Takie analizy są jednak nadmiernie uproszczone. Mogą one nie doszacować odległości, jaką może pokonać lód jeżeli odpadnie ze stojącej turbiny przy silnym wietrze, lub przeszacować tę odległość w przypadku nagłego oderwania od obracającej się łopaty. Należy więc wziąć pod uwagę efekt powietrza oraz siłę, jaką wywrze na spadający lód. Dla ruchu w kierunku pionowym (z) równanie ruchu jest następujące:

$$F_z = ma_z \quad (30)$$

gdzie F_z jest siłą wypadkową (N), m jest masą (kg) oraz a_z jest przyspieszeniem (m/s^2). Siła składa się z dwóch głównych komponentów. Jednym jest ciężar W (N). Wynika on z ciążenia ziemskiego i działa w przeciwnym kierunku, niż z . Inną składową jest opór aerodynamiczny, który działa w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu. Można to wyrazić równaniem:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A V_z^2 \quad (31)$$

gdzie ρ jest gęstością powietrza ($1,225 \text{ kg/m}^3$ w normalnych warunkach), A jest polem powierzchni rzutowej (m^2) kawałka lodu, C_D jest współczynnikiem oporu lodu, a V_z jest prędkością lodu w kierunku z .

Przyspieszenie jest pochodną prędkości, tak więc równanie ruchu w kierunku pionowym można ująć:

$$\frac{dV_z}{dt} = \left(W - \text{sign}(V_z) \frac{1}{2} C_D \rho A V_z^2 \right) / m \quad (32)$$

gdzie $\text{sign}(\dots)$ wskazuje kierunek ruchu wzdłuż osi z . Ogólnie można przyjąć, że kawałek lodu odrywa się od łopaty z prędkością początkową ΩR przy dowolnym kącie θ w stosunku do poziomu. Odpowiednio mamy do czynienia z dwoma składowymi prędkościami, jedną w kierunku z (jak uprzednio) V_z , drugą w kierunku x – V_x . Takie ujęcie zakłada, że oś x jest pozioma, leży w płaszczyźnie wirnika oraz, że jest skierowana w kierunku końcówki łopaty w jej apogeum.

Początkowo te prędkości wynoszą:

$$V_{z,0} = R \sin \theta \quad (33)$$

$$V_{x,0} = R \cos \theta \quad (34)$$

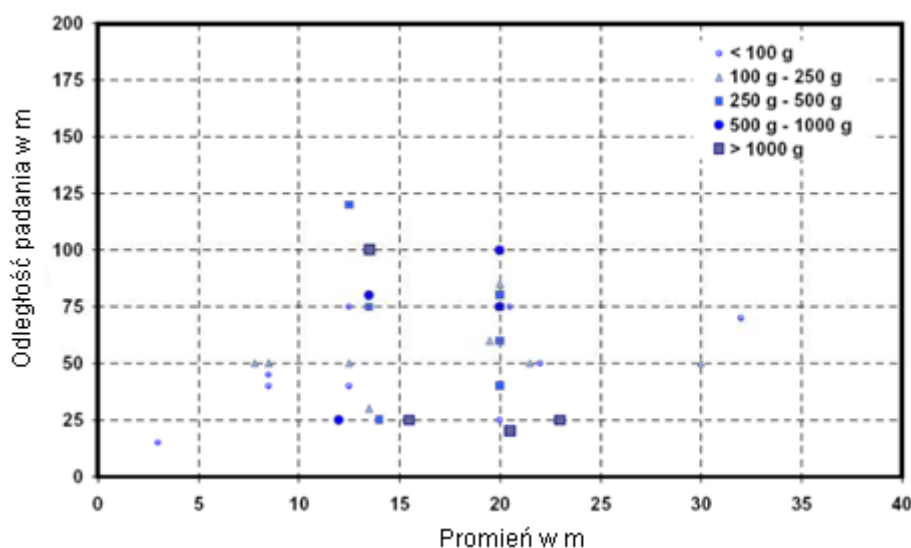
Równanie ruchu w kierunku x jest następujące:

$$\frac{dV_x}{dt} = \left(\text{sign}(V_x) \frac{1}{2} C_D \rho A V_x^2 \right) / m \quad (35)$$

Powyższe równania są nieco trudniejsze do rozwiązania analitycznego, ale mogą być rozwiązane liczbowo zdecydowanie łatwiej. Można wyprowadzić również podobne równania dla przypadków lodu spadającego ze stojącej turbiny.

Niektóre dane dotyczące rzeczywistego miotania lodu zostały zestawione przez Seiferta i in. (2003). Poniższy wykres AC.1 zaczerpnięto z tego sprawozdania.

Rysunek AC.1: Zaobserwowane odległości miotania lodu (Seifert et al. 2003)



Jak można zobaczyć na wykresie, maksymalna zaobserwowana odległość, na którą poleciał lód z turbiny o średnicy 20 m podczas jej pracy wyniosła około 100 m. Opierając się na zaobserwowanych danych, Seifert i in. sugerują następującą uproszczoną formułę dla obliczania maksymalnego zasięgu padania lodu:

$$x_{\max, \text{throw}} = 1.5 \sqrt{2R \cdot H} \quad (36)$$

gdzie $x_{\max, \text{throw}}$ = maksymalna odległość padania (m), R = średnica wirnika (m) oraz H = wysokość piasty (m).

Dla zobrazowania tego przykładu, równanie 36 przyjęto do prognozowania maksymalnego zasięgu rzucania kawałka lodu z turbiny z wirnikiem o średnicy 20 m, zamontowanym na wieży o wysokości 50 m. Wyliczona odległość wyniosła 135 m. Do wyliczenia tej odległości użyto także przedstawionych powyżej równań teoretycznych. Przyjęto następujące założenia: kulisty kształt kawałka lodu, współczynnik oporu aerodynamicznego 1,2, gęstość powietrza $1,225 \text{ kg/m}^3$, gęstość lodu 700 kg/m^3 , prędkość wirnika 40 obr/min (odpowiadająca współczynnikowi szybkoobrotowości=7 przy prędkości wiatru 12 m/s), kąt odpadnięcia lodu 45° oraz natychmiastowe odpadnięcie lodu. Równania prognozowały maksymalny zasięg odrzutu na 226 m, a więc prawie dwukrotnie więcej, niż prognozowany z wzorów empirycznych. Ta rozbieżność nie dziwi, szczególnie uwzględniając idealny kształt cząstki. Rzeczywiste cząstki lodu mogą mieć kształty zdecydowanie nie kuliste oraz napotkają znacząco większy opór aerodynamiczny. Należy również zauważyć, zgodnie z obserwacjami Cattin i in. (2007), że lód z turbiny pracującej w Alpach szwajcarskich nie padł tak daleko, jak można by prognozować z równania 36. W tym przypadku najdalsza zaobserwowana odległość odrzutu lodu od turbiny o promieniu 20 m oraz wysokości wieży 50 m, wyniosła 92 m. Jak podano powyżej, równanie 36 prognozowało odległość równą 135 m.

Seifert i in. również rozważyli dane dotyczące rzucania lodu ze stojącej turbiny. Opierając się na dostępnych danych zaproponowali proste równanie dla prognozowania padania lodu:

$$x_{\max, fall} = U R H / 15 \quad (37)$$

gdzie U = prędkość wiatru na wysokości piasty w m/s, $x_{\max, fall}$ = maksymalny zasięg padania (m), R = promień wirnika (m), H = wysokość piasty (m).

Zgodnie z równaniem 37, przewidywana maksymalna odległość rzutu dla turbiny o promieniu 20 m, wysokości wieży 50 m, i przy prędkości wiatru 20 m/s wynosi 120 m. Dla porównania, odległość spadania została przeliczona także przy użyciu równań teoretycznych podanych powyżej, przy tych samych założeniach. Wyniki w dużym stopniu zależą od rozmiaru kawałka lodu, a tym samym od stosunku powierzchni do objętości. Dla przykładu – „teoretyczny” kawałek lodu o kulistym kształcie i wadze 10 g spadnie w odległości 110 m od wieży. W przykładach omawianych przez Seiferta i in. wszystkie kawałki lodu spadały bliżej niż 100 m od wieży.

AC.2 Podsumowanie zagadnienia

Jak podano wyżej, są dwa możliwe scenariusze, w których lód może spaść z turbiny wiatrowej i upaść w pewnej odległości od wieży. W pierwszym scenariuszu, lód spadający ze stojącej turbiny jest zdmuchnięty na pewną odległość od wieży. W drugim scenariuszu lód jest rzucony przez łopatę podczas pracy turbiny z powodu nieprawidłowej pracy systemu zabezpieczeń. W pierwszym przypadku, w czasie silnego wiatru lód może upaść 100 m lub dalej od wieży, zależnie od prędkości wiatru, wysokości z której spada lód oraz wymiarów bryłki lodu. W drugim przypadku lód może spaść jeszcze dalej od turbiny. Na jaką odległość może dolecieć zależy od rzeczywistej prędkości wirnika w momencie oderwania lodu, wysokości wieży, długości łopaty, pozycji kątowej łopaty podczas odrywania się lodu oraz wymiaru i kształtu bryły lodu. Ogólnie wydaje się nieprawdopodobne, aby lód upadł dalej od turbiny, niż wynosi jej maksymalna wysokość (wieża plus promień wirnika).

Załącznik D

Turbina wiatrowa – wprowadzenie do zagadnienia hałasu

Hałas to po prostu niepożądany dźwięk. Dźwięk jest zdefiniowany jako wrażenie powodowane przez pobudzanie organów słuchu przez drgania przenoszone poprzez powietrze lub inne media. Rozchodzenie się dźwięku w powietrzu wynika z powtarzających się cykli sprężania i rozprężania powietrza. Częstotliwość dźwięku jest to liczba cykli na sekundę podana w jednostkach Hertz (Hz). Dźwięk o jednej częstotliwości jest nazywany tonem, podczas gdy kombinacja wielu częstotliwości jest nazywana szerokim pasmem.

Ludzkie ucho jest zdolne do odbierania częstotliwości w zakresie od około 20 Hz do 20 kHz (Hz: Hertz = 1 cykl/sekundę; środkowe C w fortepianie ma częstotliwość 262 Hz).

AD.1 Poziom ciśnienia akustycznego

Dźwięk charakteryzuje się zarówno częstotliwością, jak i amplitudą. Ciśnienie dźwięku jest mierzone w mikro Paskalach (μPa). Ponieważ ciśnienie dźwięku może być różne w szerokim zakresie wartości, w celu przekształcenia mikro Paskali na decybele zastosowano skalę logarytmiczną. W ten sposób ciśnienie dźwięku (SPL lub L_p) jest definiowane jako:

$$\text{SPL} = 10 \log_{10} \left[\frac{p^2/p_{\text{ref}}^2}{10} \right] = 20 \log_{10} \left(\frac{p/p_{\text{ref}}}{10} \right)$$

a wynikające obliczenie jest podawane w decybelach (dB). Ciśnienie odniesienia p_{ref} dla dźwięku przenoszonego przez powietrze wynosi 20×10^{-6} Pa (np. 20 μPa lub 20 mikro Paskali). Oznacza to, że poziom ciśnienia akustycznego 0 dB odpowiada fali dźwiękowej z amplitudą 20 Pa. Poziom 140 dB jest uważany za próg bólu i odpowiada 20 000 000 Pa. Podwojenie amplitudy fali dźwiękowej zwiększa poziom ciśnienia akustycznego o 6 dB.

Z tego względu, amplituda fali dźwiękowej 40 Pa będzie miała poziom ciśnienia akustycznego około 6 dB.

Wiadomo, że ludzkie ucho wychwytuje bardzo szeroki zakres częstotliwości, ale wiadomo też, że nie każdą częstotliwość ucho słyszy tak samo. Od częstotliwości właśnie zależy próg, poniżej którego człowiek nie słyszy dźwięków (dolna granica) i próg bólu (wyższa granica). Te wartości progowe zostały ustalone doświadczalnie. Krzywa progu słyszalności wskazuje, że dźwięk o częstotliwości 3 kHz (3000 Hz) przy poziomie ciśnienia akustycznego < 0 dB jest słyszalny, podczas przy częstotliwości 100 Hz dźwięk staje się słyszalny dopiero przy poziomie ciśnienia akustycznego około 30 dB. Krzywe pokazujące poziomy progowe znajdują się w wielu publikacjach, są także dostępne online w sieci (http://www.santafevisions.com/csf/html/lectures/007_hearing_II.htm). Przeprowadzono również doświadczenia dla określenia równoważnych izofon poziomu głośności. Izofony pokazują kiedy dwa tony o różnych częstotliwościach są odbierane jako jednakowo głośne.

Charakterystyka ludzkiej reakcji na dźwięk:

Zmiany w poziomie dźwięku <1 dB nie są odbierane.

Podwojenie wielkości ciśnienia akustycznego prowadzi do wzrostu poziomu ciśnienia akustycznego o 6 dB.

Zmiana poziomu ciśnienia akustycznego o 5 dB powoduje widoczną reakcję społeczności.

Zmiana poziomu ciśnienia akustycznego o 10 dB jest subiektywnie słyszana odbierana jako podwojenie głośności.

AD.2 Pasma częstotliwości

Większość dźwięków w naszym otoczeniu zawiera wiele częstotliwości i ich zmienność nie pozwala na uzyskanie w kolejno wykonywanych identycznych doświadczeniach dokładnie tych samych wyników w wykreślaniu lub zapisywaniu ciśnienia akustycznego w funkcji czasu. Dlatego też, ogólnie stosuje się uśrednianie pomiarów przybliżonych zawartości amplitudy dźwięku i jego częstotliwości. Przyjęte metody uśredniania polegają na zasadzie oktaw, takich jak pasma 1/10, 1/3 oraz jednooktawowe. Oznacza to, że całkowity zakres częstotliwości jest podzielony na pasma tak, że stosunek pomiędzy częstotliwościami początkowymi a końcowymi w każdym paśmie, czyli f_1 i f_2 , wyraża się wzorem $f_2 = 2^{1/N} f_1$, gdzie $N = 1$ dla pasma jednooktawowego oraz 3 dla pasma 1/3 oktawy. Ponieważ pasma mogą się tworzyć począwszy od dowolnej częstotliwości, określono znormalizowany zestaw pasm. Są one opisywane zazwyczaj przez środkową częstotliwość każdego pasma. Standardowe pasma oktaw są pokazane w Tabeli AD.1 (mierzone w Hz).

Tabela AD.1: Pasma oktaw. Wartości podane w Hz.

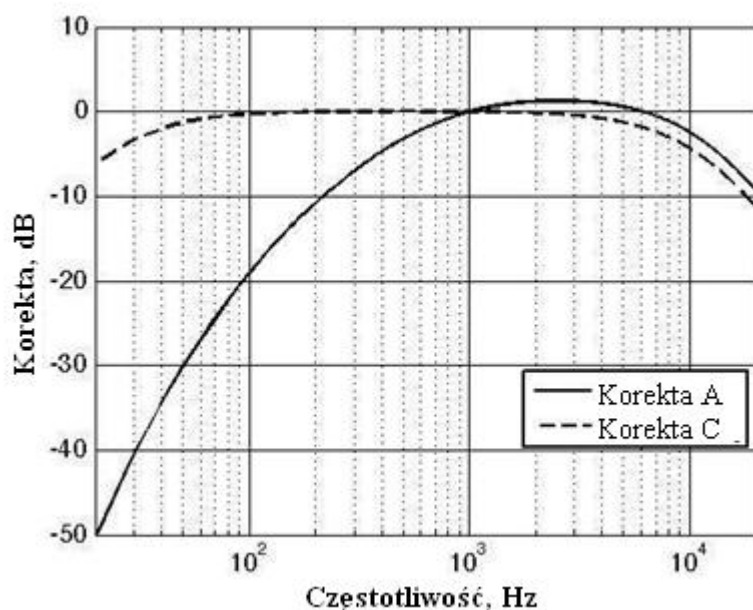
Częstotliwość środkowa	Dolna granica pasma	Górna granica pasma
16	11	22
31,5	22	44
63	44	88
125	88	177
250	177	355
500	355	710
1000	710	1420
2000	1420	2840
4000	2840	5680
8000	5680	11360
16000	11360	22720

Podobny zestaw pasm można zestawić dla 1/3 oktawy. Każde pasmo jednooktawowe posiada 3 pasma 1/3 oktawy. Wiele tekstów i źródeł online opisuje szczegółowo pasma 1/3 oktaw, np. (http://www.engineeringtoolbox.com/octave-bands-frequency-limits-d_1602.html). Pasma 1/10 oktawy to filtr wąskopasmowy stosowany, gdy dźwięk zawiera ważne tony.

AD.3 Uśrednianie

Dane hałasu często są prezentowane jako pomiary 1/3 oktawy. Oznacza to, że dźwięk w każdym paśmie częstotliwości jest uśredniany dla tego zakresu. Poziom hałasu często jest określany także jako wartość ważona (skorygowana). Najpowszechniejszą korektą jest korekta A. Pierwotnie była przewidziana do tego, aby dźwięki o różnych częstotliwościach dające po korekcie A ten sam odczyt w decybelach, miały równoważną głośność. Korekta pasma oktawy wycelowanej na 31,5 Hz wymaga odjęcia 39,4 dB od rzeczywistego poziomu ciśnienia akustycznego. Pasma oktaw z punktem centralnym od 1000 do 8000 Hz, na które ludzki słuch jest najbardziej wyczulony, są korygowane jedynie o około ± 1 dB. Rozpatrując korektę A razem z progiem słyszalności widać, że korekta ta największy wpływ odgrywa w przypadku dźwięków o małej amplitudzie. Z drugiej strony korekta C odejmuje tylko kilka dB z bardzo wysokich i bardzo niskich pasm częstotliwości. Dlatego jest bardziej użyteczna dla wyższych poziomów dźwięku. Poniższy rysunek pokazuje te dwie korekty. Skorygowany poziom ciśnienia akustycznego jest podawany odpowiednio jako dBA lub dBC.

Rysunek AD.1: Skorygowane wartości dla podawania poziomu ciśnienia akustycznego



Poziom hałasu zmienia się wiele razy w ciągu dnia. Do obliczenia tych różnic często są używane inne miary hałasów środowiskowych, jak pokazano w Tabeli AD.1.

Tabela AD2: Zestaw przykładów dla tych pomiarów można znaleźć pod adresem:
http://www.epd.gov.hk/epd/noise_education/web/ENG_EPD_HTML/m2/types_3.html)

Wskaźnik	Znaczenie
$L_{\max}$	Maksymalny zmierzony poziom dźwięku z korektą A
L_{10} , L_{50} , L_{100}	Poziom dźwięku z korektą A, który jest przekraczany przez n% czasu, gdzie n wynosi odpowiednio 10, 50 i 90. W czasie pomiarów L_{90} jest ogólnie przyjęte jako poziom dźwięku otoczenia.
L_{eq}	Równoważny poziom dźwięku. Średni poziom ciśnienia akustycznego z korektą A, który daje tę samą energię całkowitą, jak różne poziomy dźwięku podczas czasu pomiaru
L_{dn}	Poziom dzień-noc. Średni poziom ciśnienia akustycznego z korektą A, podczas 24-godzinnego dnia po dodaniu poziomu 10 dB do poziomowi zmierzonego w nocy pomiędzy godziną 22:00 a 7:00 rano.

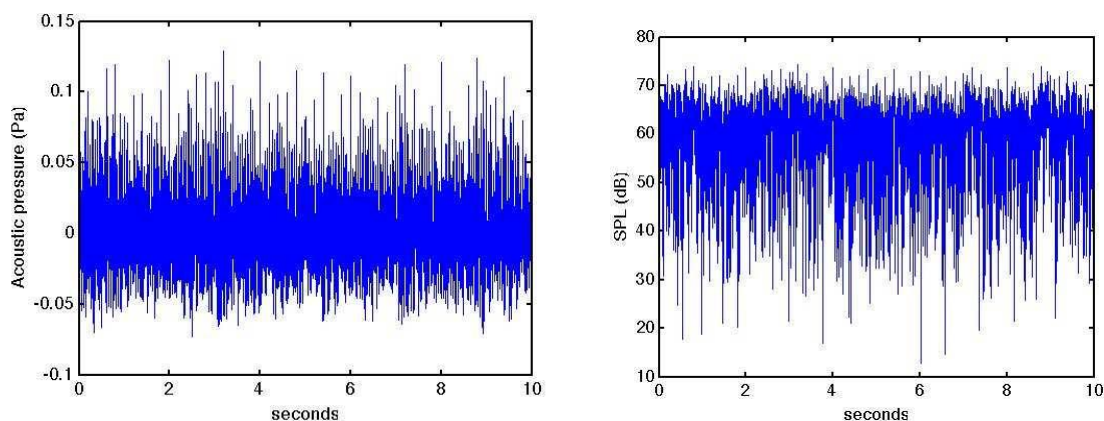
AD.4 Moc akustyczna źródła

Dość często podaje się również intensywność i moc akustyczną źródła dźwięku. Intensywność dźwięku jest miarą energii przenoszonej na jednostkę powierzchni i czasu w określonym kierunku. Można pokazać, że intensywność I prostopadła do kierunku rozchodzenia się dźwięku jest związana z kwadratem amplitudy fali ciśnienia, gęstością powietrza i prędkością dźwięku c , $I \sim p^2/c$. Moc akustyczna P jest to całkowita intensywność przechodząca przez powierzchnię dookoła źródła dźwięku. Jednostką intensywności jest Wat na metr kwadratowy (W/m^2), natomiast moc jest mierzona w watach (W). Obie te wielkości są normalnie podawane w dB, gdzie poziom intensywności jest obliczany jako $L_I = 10 \log_{10} (I/I_{ref})$ a poziom mocy jest obliczany jako $L_W = 10 \log_{10} (P/P_{ref})$. Poziom odniesienia intensywności jest związany z progiem słyszalności przy 1000 Hz jak $I_{ref} = 10^{-12} W/m^2$. Wartość odniesienia mocy wynosi $P_{ref} = 10^{-12} W$ (1 pikowat). Podwojenie mocy akustycznej źródła prowadzi do wzrostu poziomu ciśnienia akustycznego o 3 dB.

AD.5 Przykład analizy danych

Poniżej prezentujemy przykład typu analizy pomiarów dźwięku z turbiny wiatrowej. Rzeczywisty sygnał może wyglądać podobnie do pokazanego na rysunku AD.2.

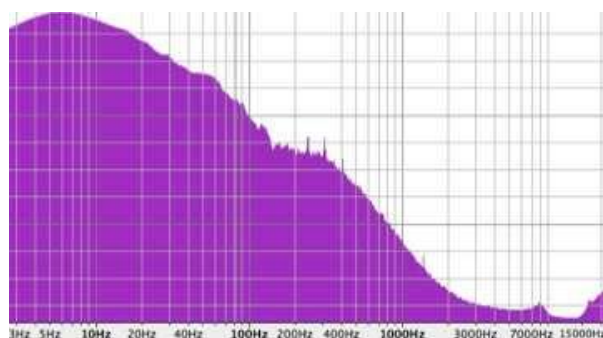
Rysunek AD.2: Sygnał ciśnienia z turbiny wiatrowej



(źródło: van der Berg, 2011) dotyczy farmy wiatrowej nad Renem). Z lewej w Paskalach, z prawej jako poziom ciśnienia akustycznego w dB.

Na rysunku AD.2 przedstawiono tylko ciśnienie akustyczne, co oznacza, że ciśnienie atmosferyczne, wynoszące około 103 000 Pa zostało odjęte, a fluktuacje pojawiają się wokół 0 Pa. Te dane można łatwo przedstawić jako poziom ciśnienia akustycznego przez przekształcenie jednostki z Pa na dB. Aby zanalizować zawartość niskiej częstotliwości w sygnale ciśnienia, należy pozyskać sygnał ze znacznie dłuższego czasu. Zawartość częstotliwości w sygnale z długiego czasu jest analizowana przez zastosowanie transformacji Fouriera. Typowa transformata danych z turbiny jest pokazana na rysunku AD.3.

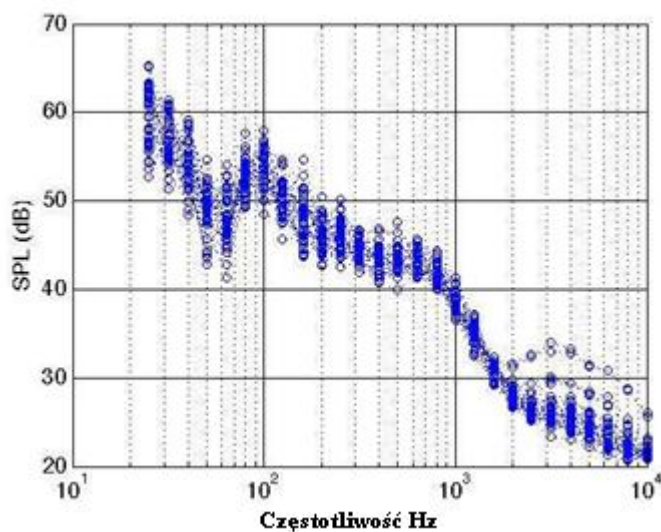
Rysunek AD.3: Zawartość częstotliwości w typowym pomiarze turbiny wiatrowej (z artykułu Palmer ASA)



(Ten wykres nie odpowiada danym nadreńskim, dla których autor nie może przedstawić pełnej struktury częstotliwości).

W celu lepszej oceny szerokopasmowej natury dźwięku z turbiny wiatrowej, wyniki są przedstawione w formie pasm 1/3 oktawy. Średnie wyciągnięte z każdego pasma 1/3 oktawy można wyliczyć w krótszych lub dłuższych przedziałach czasu. Przykładowo, dane z wykresu 3 mogą być uśrednione na podstawie pasm 1/3 oktawy i sprowadzone do ogólnego poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach. Można także w miarę wykonywania pomiarów gromadzić średnie z pasm 1/3 oktaowych dla krótkich okresów czasu. W przypadku nadreńskim rejestrowano „szybkie średnie” co 0,05 sekundy. Kilka wyników dla pasma 1/3 oktawy przedstawiono na wykresie AD.4.

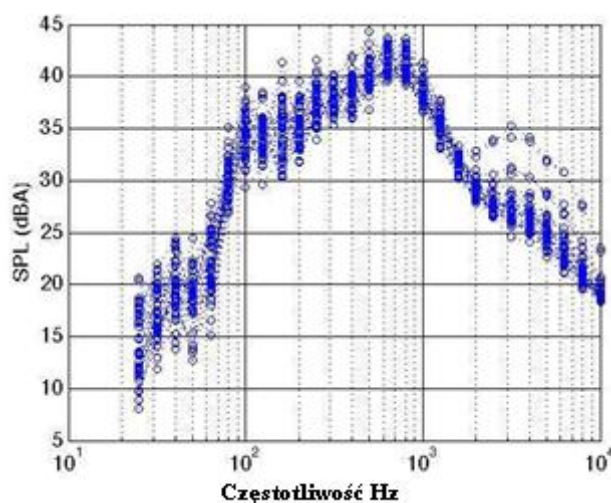
Rysunek AD.4: Analiza szybkich średnich w paśmie 1/3 oktawy



Wyniki dla 0-0,05, 5-0,05, 10-0,05.....200-200,05 sekund

Z tych danych wyłania się końcowe widmo ogólne. Gdyby dane zostały przedstawione jako widmo skorygowane A, prezentowałyby się jak na rysunku AD.5.

Rysunek AD.5: Analiza szybkich średnich dla pasma 1/3 oktawy po korekcje A



Wyniki dla 0-0,05, 5-0,05, 10-0,05.....200-200,05 sekund

AD.6 Hałas turbiny wiatrowej na przykładzie kilku turbin

Na temat hałasu wytwarzanego aerodynamicznie przez turbiny wiatrowe wiadomo, że nominalnie wzrasta wraz ze wzrostem prędkości wiatru aż do osiągnięcia maksymalnej mocy oraz, że wzrasta wraz ze wzrostem prędkości końcówek wirnika. Raport przygotowany w Holandii (van den Berg et al., 2008) zawiera wiele danych dotyczących hałasu z turbin wiatrowych. Trendy ukazane SA w tabelach zawartych w Załącznikach B i C. Niektóre z tych danych są przedrukowane tutaj. Wzięto pod uwagę tylko pomiary wykonane przez osoby trzecie (nie przez firmy zajmujące się turbinami wiatrowymi).

Tabela AD.3:

Poziom ciśnienia akustycznego w dB(A) dla różnych turbin (van den Berg et al., 2008)

Producent model	Moc kW	Wys. piasty m	Śred- nica m	Obr / min	4 m/s	5 m/s	7 m/s	8 m/s	10 m/s
Enron TW1,5s	1500	80	70	11	100	100	100	100	
Enron TW1,5s	1500	81	70	22		102	102	103	104
NegMicon NM52	900	70	52	15	93	93			
NegMicon NM52	900	70	52	22		98	100	101	103
NegMicon NM54	950	46	54	15		95,6			
NegMicon NM54	950	46	54	22		101,6			
Vesta V66	1650	70	66	15	97	97	98	98	
Vesta V66	1650	70	66	19		101	101	102	102

Należy pamiętać, że powyższe informacje dotyczą poziomu ciśnienia akustycznego, który obejmuje całkowitą energię dźwięku generowanego przez turbinę (tzn. energię w środku łopat, która rozprzestrzenia się na zewnątrz na wysokości piasty). Poziom dźwięku mierzony w jednym miejscu przy podstawie turbiny z może być nawet o 50 dB niższy (Lawrence rep.).

AD.7 Definicja infradźwięków

Omówienie aerodynamicznego źródła dźwięku, określanego jako „odgłos łopat” wymaga zdefiniowania dźwięków o niskiej częstotliwości oraz infradźwięków. Z definicji infradźwięk jest to fala ciśnienia, która nie jest słyszalna. Nominalnie oznacza to fale o częstotliwościach mniejszych niż 20 Hz. Stwierdzono, że fale o wysokiej amplitudzie mogą być słyszalne, nawet jeśli ich częstotliwość jest mniejsza niż 20 Hz. Dźwięk o niskiej częstotliwości mieści się w zakresie od 20 Hz do 200 Hz. Jak wspomniano wcześniej, niektóre mechaniczne źródła hałasu generują hałas w niskich zakresach częstotliwości i oczywiście niektóre źródła aerodynamiczne dźwięków szerokopasmowych również generują hałas w niskich częstotliwościach. Częstotliwość odgłosu łopat, jeżeli ten występuje, będzie powiązana z częstotliwością przechodzenia łopat. Z tego względu turbina z wirnikiem trójłopatowym obracającym się z prędkością 20 obr/min, może więc generować odgłos łopat o częstotliwości 1 Hz, który mieści się oczywiście w zakresie infradźwiękowym. Wirniki pracujące z wiatrem wytwarzają nieco silniejsze infradźwięki przy częstotliwości przechodzenia łopat, ponieważ łopaty wchodzą w bezpośrednią interakcję z obszarem martwym za wieżą. Poziomy odgłos łopat generowanego przez nowoczesne

turbiny podwietrzne nie są wyczuwalne przez ludzki układ słuchowy. Wszelkie słyszalne impulsy dźwiękowe, które mają częstotliwość równoważną z częstotliwością przechodzenia łopat, w rzeczywistości są hałasem szerokopasmowym wytwarzanym przez inne mechanizmy i zmodyfikowanym przez różnice w przepływie, które występują w cyklu jeden na obrót, jak to omówiono powyżej. Wszystkie częstotliwości tych pulsujących dźwięków mieszczą się w zakresie słyszalnym i dlatego te dźwięki nie są infradźwiękami.

Załącznik E

Turbiny wiatrowe – szacowanie poziomu mocy akustycznej i rozchodzenia się hałasu

AE.1 Modele aproksymujące przewidywany poziom mocy akustycznej turbiny wiatrowej

Poniżej podajemy kilka równań aproksymujących, które czasami są używane do szacowania poziomu mocy akustycznej w skali A – L_{WA} – dla typowej turbiny wiatrowej. Pierwsze równanie podaje szacunek dla nominalnej mocy turbiny, P_{WT} (W). Drugie podaje szacunek w zależności od średnicy D (m). Trzecie podaje szacunek w zależności zarówno od prędkości końcówek V_{Tip} (m/s) oraz średnicy. Te równania winny być używane jedynie wtedy, gdy nie są dostępne dane testowe.

$$L_{WA} = 10(\log_{10} P_{WT}) \times 50 \quad (38)$$

$$L_{WA} = 22(\log_{10} D) \times 72 \quad (39)$$

$$L_{WA} = 50(\log_{10} V_{Tip}) \times 10(\log_{10} D) \times 4 \quad (40)$$

AE.2 Zależność poziomu mocy akustycznej od liczby turbin wiatrowych

Jeżeli kilka turbin wiatrowych jest umieszczonych blisko siebie, całkowita moc akustyczna może być oszacowana przy użyciu relacji logarytmicznej. Przykładowo, dla dwóch turbin o poziomie ciśnienia akustycznego L_{W1} i L_{W2} , całkowita moc dźwięku wynosi:

$$L_{total} = 10 \log_{10} (10^{L_1/10} \times 10^{L_2/10}) \quad (41)$$

Dla N turbin, odpowiednia zależność wynosi:

$$L_{total} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \quad (42)$$

gdzie L_{wi} jest poziomem ciśnienia akustycznego turbiny i . Dla turbin rozmieszczonych w nieco większej odległości od siebie obliczenia są bardziej skomplikowane, a badane zależności (poziom ciśnienia akustycznego) uwzględniają względne położenie turbin oraz miejsce obserwatora, jak opisano powyżej.

AE.3 Rozprzestrzenianie się hałasu z turbin wiatrowych

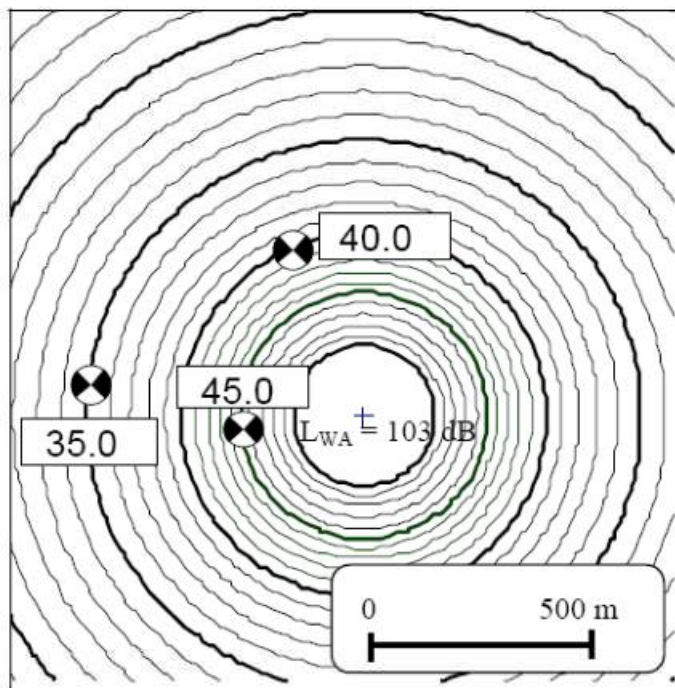
Poziom ciśnienia akustycznego spada wraz z odległością od turbiny. Dla celów oszacowania przyjęto prosty model oparty na rozprzestrzenianiu się dźwięku na półkuli ziemskiej nad powierzchnią odbijającą, włącznie z absorpcją atmosferyczną, wyrażony wzorem:

$$L_p = L_W \times 10 \log_{10}(2\pi R^2) \times R \quad (43)$$

gdzie L_p jest poziomem ciśnienia akustycznego (dB) w odległości R od źródła promieniowania hałasu o poziomie mocy L_W (dB), a α jest współczynnikiem absorpcji dźwięku zależnym od częstotliwości. Współczynnik absorpcji dla szerokiego pasma jest często przyjmowany jako stała wartość 0,0005 dB(A)/m.

Rysunek AE.1 (z Materialien 63) wskazuje poziom ciśnienia akustycznego jako funkcję odległości od pojedynczej turbiny wiatrowej o poziomie ciśnienia akustycznego 103 dB(A).

Rysunek AE.1: Typowy poziom ciśnienia akustycznego w funkcji odległości od pojedynczej turbiny wiatrowej (z Materialien 63)



Wyniki są podsumowane w Tabeli AE-1.

Tabela AE-1

Poziom ciśnienia akustycznego w funkcji odległości

Ciśnienie akustyczne, dB(A)	Odległość (m)
45	280
40	410
35	620

Można zauważyć, że przy zastosowaniu w równaniu (43) współczynnika absorpcji szerokopasmowej uzyskuje się wyniki zbliżone do podanych w Tabeli (270 m, 435 m i 675 m).

AE.4 Rozprzestrzenianie się hałasu z zespołu turbin wiatrowych

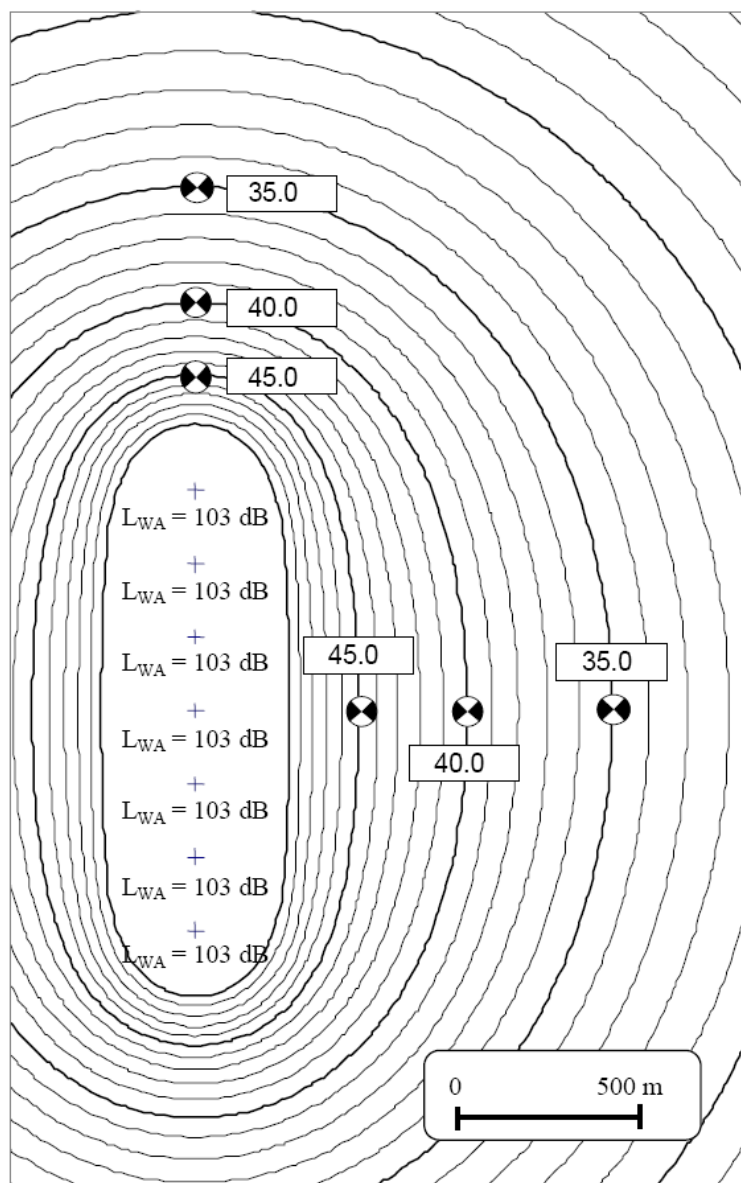
Dźwięk słyszany z odległości generowany przez wiele turbin wiatrowych, jest funkcją poziomu ciśnienia akustycznego z każdej turbiny oraz odległości od tej turbiny. Wartość słyszana może być podana w przybliżeniu przez następujące równanie:

$$L_p = 10 \log_{10} \left[\sum_{i=1}^N \frac{10^{L_{pi}/10}}{R_i^2} \right] \quad (44)$$

gdzie R_i jest odległością od turbiny i .

Rysunek AE-2 pokazuje poziom ciśnienia akustycznego dla różnych odległości i kierunków od linii siedmiu turbin wiatrowych, z których każda pracuje z poziomem ciśnienia akustycznego 103 dB(A).

Rysunek AE-2: Poziom ciśnienia akustycznego wytworzonego przez siedem turbin wiatrowych ustawionych w linii, każda generująca poziom ciśnienia akustycznego 103 dB(A) (z Materialien 63)



Wyniki są podsumowane w Tabeli AE-2.

Tabela AE-1

Pokazane odległości bieżą w kierunku prostopadłym do linii ustawienia turbin

Ciśnienie dźwięku, dB(A)	Odległość (m)
45	440
40	740
35	1100

Załącznik F

Turbiny wiatrowe – hałas łopat sterowanych przeciągnięciem wobec hałasu łopat regulowanych kątem ustawienia

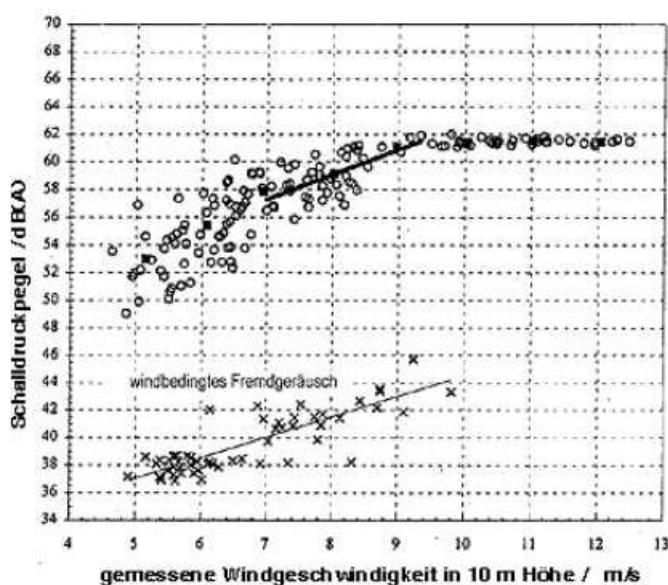
Jak wskazano w Załączniku A, turbiny z regulowanym kątem ustawienia są cichsze od turbin regulowanych przeciągnięciem, szczególnie podczas silnych wiatrów. Ten załącznik ilustruje różnice, opierając się na jednym źródle.

AF.1 Typowy hałas turbiny wiatrowej z regulowanym kątem ustawienia łopat

Poniższy rysunek pokazuje poziom ciśnienia akustycznego turbiny z regulowanym kątem ustawienia, jako funkcję prędkości wiatru (Nie podano odległości od turbiny w jakiej pobierano dane).

Jak można zobaczyć, poziom hałasu wzrasta wraz z prędkością wiatru, aż do określonej prędkości wiatru, w tym przypadku 9 m/s. Po osiągnięciu ustalonej prędkości wiatru ustawienie łopat reguluje moc i poziom hałasu pozostaje stały.

Rysunek AF.1: Ciśnienie akustyczne z turbiny z regulacją kąta, w funkcji prędkości wiatru

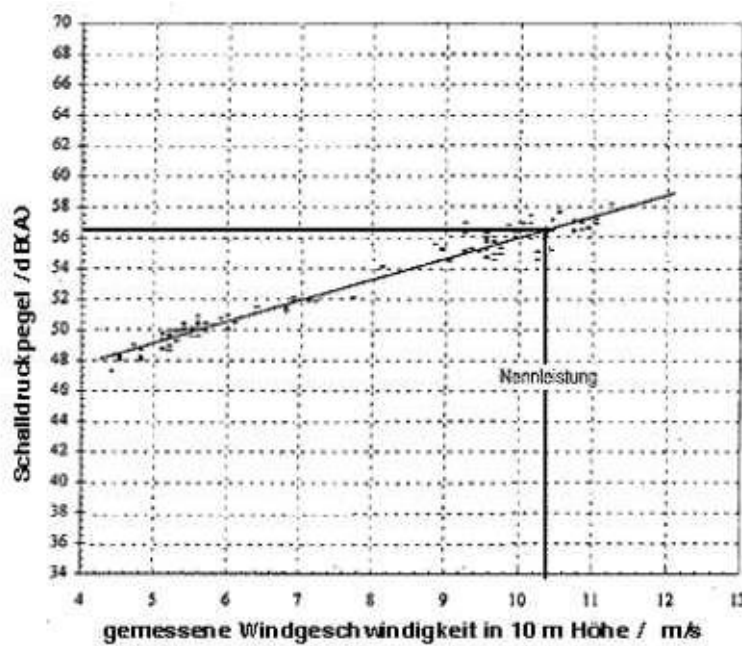


- oś y: poziom ciśnienia akustycznego dB(A)
oś x: prędkość wiatru zmierzona na wysokości 10 m, m/s
dolna linia: hałas tła wywoływany przez wiatr

AF.2 Hałas turbiny wiatrowej regulowanej przeciągnięciem

Rysunek poniżej obrazuje poziom ciśnienia akustycznego turbiny wiatrowej regulowanej przeciągnięciem, jako funkcję prędkości wiatru (Nie podano odległości od turbiny w jakiej pobierano dane).

Rysunek AF.2: z Materialien 63



oś y: poziom ciśnienia akustycznego dB(A)
oś x: prędkość wiatru zmierzona na wysokości 10 m, m/s
Nominalna prędkość wiatru dla tej turbiny wynosi 10,4 m/s

Jak widać, poziom hałasu wzrasta w przybliżeniu liniowo wraz z prędkością wiatru i nie wyrównuje się.

Załącznik G

Podsumowanie badań laboratoryjnych na zwierzętach, dotyczących hałasu infradźwięków i dźwięków o niskiej częstotliwości (IFLN)

Tabela AG.1

Podsumowanie badań laboratoryjnych na zwierzętach, dotyczących hałasu o niskiej częstotliwości oraz infradźwięków (IFLN)

Nr badania	Rodzaj zwierząt	Cel	„Dawka”	Czas	Mierzone skutki	Uwagi	Cytowania
1	Samce szczurów Sprague-Dawley; 32 szczury, 10-tygodniowe	Serce: obserwacje pracy, Ca ²⁺ , wyrażenie SERCA2	5 Hz przy 130dB 5 Hz przy 130dB 5 Hz przy 130dB	2 h – 1 dzień 2 h – 7 dni 2 h – 14 dni	Wzrost [Ca ²⁺]/; wzrost SERCA2 Wzrost [Ca ²⁺]/; spadek SERCA2, porównanie z grupą kontrolną i 1-dniową Wzrost [Ca ²⁺]/; spadek SERCA2, porównanie z grupą kontrolną i 7-dniową	Nie stwierdzono toksyczności ostrej. Reakcje wzrastały poprzez grupy; częstość bicia serca wzrastało w grupie 1-dniowej, w innych nie; ciśnienie lewej komory wzrastało z dawkowaniem; dawka dla zwierząt jest nieco poniżej 5Hz/130dB; w znieczuleniu	Pel et al. 2007
2	Dorośle samce szczurów Sprague-Dawley	Serce: przepływ Ca ²⁺ przez komórki (WLCC) w komórkach mięśniowych komory	5 Hz przy 130dB	2 h – 1 dzień; sprawdzanie po 1, 7 lub 14 dniach po wystawieniu	Wzrost [Ca ²⁺]poziom (I), LCC & SERCA2	Nie stwierdzono toksyczności. [Ca ²⁺]poziom (I) tak samo, jak wyrażanie LCC i SERCA2 mogą brać udział w ujawnianiu reakcji serca na wystawienie na infradźwięki; nie mogą być jednocześnie z danymi mikrograficznymi	Pel et al. 2007
3	Samce szczurów Sprague-Dawley	Uwalnianie przez komórki nerwowe hormonów stresu	16 Hz przy 130dB	2 h – wystawienie jednorazowe	Aktywacja komórek mikroglejowych i działanie kortykotropiny uwalniające receptor hormonu (CRH R1); również ekspresja jest blokowana przez antalarminę	Nie stwierdzono toksyczności. Mierzone w neuronach podwzgórza przykomorowego. Antalarmina jest niepeptydowym lekiem blokującym receptor CRF-1 oraz w konsekwencji, redukującym uwalnianie ACTH w reakcji na chroniczny stres	Du et al. 2010
4	Samce szczurów Sprague-Dawley	Neurogeneza	16 Hz przy 130 dB	2 h/dzień przez 7 dni (uśmiercanych po 3, 6, 10, 14 i 18 dniach po wystawieniu	Mierzona wczesna migracja i różnicowanie nowych komórek rozrodczych przez badanie wchłaniania BUDR w komórkach hipokampu (ząbkowane zakręty mózgu)	Nie stwierdzono toksyczności. Autorzy stwierdzają rozpowszechnianie się komórek hamujących infradźwięki, oraz, że efekt rozpowszechniania się wygląda na odwracalny po 18 dniach po wystawieniu na tło – 40dB; autorzy mówią o odwracalności, ale dane nie potwierdzają tego – również	Liu et al. 2010

						porównano z grupą „normalną” (bez infradźwięków), ale bez danych o kontroli	
5	Samce szczurów Albino Wistar	Nerwowe: Zachowanie Osiągi – funkcje przedsionków	16 Hz przy 72-105 dB		Ocena na młynku Rota-rod	Nie stwierdzono toksyczności. Wybrane najsprawniejsze szczury nie zareagowały, ale gorsze szczury wytrzymały mniejszy wysiłek po wystawieniu na takie samo oddziaływanie.	Yamamura & Kishi, 1980
6	Samce szczurów Wistar	Neurologiczne – biochemiczne	2 Hz przy 105 dB 7 Hz przy 122 dB 26 Hz przy 124 dB	1 h, a następnie uśmiercane 1 h, a następnie uśmiercane 1 h, a następnie uśmiercane	Mierzony poziom norepinofriny w mózgu Mierzony poziom norepinofriny w mózgu Mierzony poziom norepinofriny w mózgu	Nie stwierdzono toksyczności. Nie sprawdzono, czy poziomy Norepi wynikały z projektu doświadczenia – nie było dobrej kontroli	Spyraki et al. 1978
7	Samice szczurów – nieokreślona rasa	Nerwowe	2 Hz przy 105 dB 7 Hz przy 122 dB 26 Hz przy 124 dB		Obserwacje aktywności szczurów	Skrócony czas snu i zmniejszona aktywność. Komora i ustawienie cokolwiek archaiczne oraz nie wykonano środków potwierdzających	Spyraki et al. 1978
8	Dorośle samce szczurów Sprague-Dawley	Nerwowe: hipokampu – zdolność uczenia się przestrzennego i zapamiętywania	26 Hz przy 130 dB	14 dni	Obserwacja z użyciem labiryntu wodnego Morrisa, mierzone ekspresja oraz poziomy protein w wyprowadzonych z mózgu czynników neurotroficznych kinazy tyrozynowej receptora B.	Nie stwierdzono toksyczności. Nie omówiona kalibracja komory dźwiękowej.	Yuan et al., 2009

Odniesienia

- Ambrose, S. E. & Rand R. W., (2011, December). The Bruce McPherson Infrasound and Low Frequency Noise Study: Adverse Health Effects Produced By Large Industrial Wind Turbines Confirmed. Retrieved from: <http://www.wind-watch.org/-documents/bruce-mcpherson-infrasound-and-low-frequency-noise-study/>
- Alberts, D. (2006). Primer for Addressing Wind Turbine Noise. Retrieved from: <http://www.maine.gov/doc/mfs/windpower/pubs/pdf/AddressingWindTurbineNoise.pdf>. Lawrence Tech. University.
- Balombin, J. R. (1980, April). An exploratory survey of noise levels associated with a 100 KW wind turbine. Proceedings from the 99th Meeting of the Acoustical Society of America. Atlanta, Georgia.
- Betke K, von Glahn, M. S., Matuschek, R. (2004). Underwater noise emissions from offshore wind turbines. CFA-DAGA. Reviewed from: <http://www.itap.de/daga04owea.pdf>.
- Betke, K., Remmer H. (1998). Messung und Bewertung von tieffrequentem Schall. Proc. DAGA.
- Bolin, K., Bluhm, G., Eriksson, G., Nilsson, K. (2011). Infrasound and Low Frequency Noise from Wind Turbines: Exposure and Health Effects. Environ. Res. Lett. 6, 035103 (6pp)
- Bowdler, D.; Bullmore, A.; Davis, B.; Hayes, M.; Jiggins, M.; Leventhall, G.; McKenzie, A. (March-April 2009). Prediction and assessment of wind turbine noise. *Acoustics Bulletin*, v 34, n 2, p 35-7.
- Branco N, Santos J, Monteiro E, Silva A, & Ferreira J, Pereira M. (2004). The lung parenchyma in low frequency noise exposed. *Wistarrats.Rev Port Pneumol*, Jan-Feb;10 (1),77–85.
- Castelo, Branco NA. (1999, March). The Clinical Stages of Vibroacoustic Disease. 70 (3 Pt 2):A32-9. *Aviat Space Environ Med*.

Castello Branco NAA, Alves-Pereira M. (2004). Vibroacoustic Disease. *Noise Health* 6(23): 3–20.

Cattin, R., Kunz, S., Heimo, A., Russi, G., Russi, M., & Tiefgrabe, M. (2004). Wind turbine ice throw studies in the Swiss Alps. Proceedings of the European Wind Energy Conference. Milan, 2007.

Colby, David, M.D., Dobie, Robert, MD., Leventhall, Geoff, PhD., Lipscomb, David M. PhD., McCunney, Robert J., M.D., Seilo, Michael T., PhD., Sondergaard, Bo, M.Sc.. (2009, December). Wind Turbine Sound and Health Effects – An Expert Panel Review.

Concha-Barrientos, M., Campbell-Lendrum, D., & K. Steenland. (2004). Occupational noise: assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels (WHO Environmental Burden of Disease Series, No. 9). Geneva: World Health Organization.

Downing, S. D. & Socie, D. F. (1982). Simple rainflow counting algorithms. *International Journal of Fatigue*, 4 (1), 31–40.

Du F, Yin L., Shi, M., Cheng, H., Xu, X., Liu, Z., Zhang, G., Wu, Z., Feng, G., & Zhao, G., (2010). Involvement of microglial cells in infrasonic noise-induced stress via upregulated expression of corticotrophin releasing hormone type 1 receptor.

Duffie, J. A. & Beckman, W. A., (2006) Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd edition, John Wiley and Sons .

Eggleston, D. M. & Stoddard, F.S. (1987). Wind turbine engineering design. New York: Van Nostrand Reinhold.

Ellwood, J. M. (1998). Critical appraisal of epidemiological studies and clinical trials (Vol. 2d ed.). Oxford University Press: Oxford.

European Agency for Safety and Health at Work. (2008). Workplace exposure to vibration in Europe: an expert review. Luxembourg: Office for Official Publications of the European

Communities, ISBN 978-92-9191-221-6.

osha.europa.eu/en/publications/reports/8108322_vibration_exposure

EWEA (2004). Wind Energy, The Facts, Vols. 1-5. European Wind Energy Association, Brussels.

Federal Register. (2003, July). Identifying and Promoting Promising Practices. *Federal Register*, 68, No. 131. Retrieved from www.acf.hhs.gov/programs/ccf/about_ccf/gbk_pdf/pp_gbk.pdf.

Findeis, H., Peters, E. (2004). Disturbing Effects of Low Frequency Sound Immissions and Vibrations in Residential Buildings. *Noise and Health Year*. 6(23), pp. 29-35. Brandenburg State Environmental Agency, Germany.

Guerrini, R., & Genton, P. (2004). Epileptic syndromes and visually induced seizures. *Epilepsia*, 45 (suppl. 1), 14-18.

Gumbel, E. J. (1958). Statistics of Extremes. New York: Columbia University Press.

Harding, G., Harding, P., & Wilkins, A. (2008). Wind turbines, flicker and photosensitive epilepsy: characterizing the flashing that may precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them. *Epilepsia*. 49 (6), 1095–1098.

Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen Länderausschuss. (2002). http://www.schleswig-holstein.de/cae/servlet/contentblob/-613182/publicationFile/LAI_Hinweise_Schattenwurf_pdf.pdf (Advice on ascertaining and assessing the optical emissions (“shadow flicker”) from wind turbines.) http://www.mst.dk/Virksomhed_og_myndighed/Stoej/Vindmoeller/Stoj_fra_vindmoller/.

Hubbard, H.H. & Shepherd, K.P. (1990) Wind Turbine Acoustics, NASA Technical Paper 3057, 1990 (microfiche in 1991).

International Electrotechnical Commission. (2002, Geneva). International Standard IEC 61400-11 Ed.2. *Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement*

technique.

Jakobsen, J. (2006). Infrasound emission from wind turbines. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, v 24, n 3, p 145-55.

Jonkman, J. (2005). *FAST User's Guide*, (NREL/EL-500-38230). National Renewable Energy Laboratory. Golden CO.

Jung, Cheung, J. (2008). Experimental Identification of Acoustic Emission: Characteristics of Large Wind Turbines with Empahsis on Infrasound and Low-Frequency Noise. *Korean Physical Soc.* 53, NO.4, 1897-1905.

Kawasaki, T. National Institute of Industrial Health, 6-21-1, Nagao, 214-8585, Japan.

Kelley, N. D., McKenna, H. E., Hemphill, R. R., Etter, C. L., Garrelts, R. L., & Linn, N. C. (1985). Acoustic noise associated with the MOD-1 wind turbine: its source, impact, and control. (SERI/TR-635-1166, UC Category: 60, DE85002947). Solar Energy Research Institute. Prepared for the U.S. Department of Energy, Contract No. DE-AC02-83CH-10093.

Knopper, L. D. & Ollson, C. A., Health effects and wind turbines: A review of the literature. *Environmental Health* 2011, 10:78 doi:10.1186/1476-069X-10-78.

Leventhall, G. (2006, June). Infrasound from wind turbines - fact, fiction or deception. *Canadian Acoustics*, v 34, n 2, p 29-36.

Leventhal, B (2009). Low Frequency Noise. What we know, what we do not know and what we would like to know. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 28(2). 79-104.

Liu, J., Lin, T., Yan, X., Jiang, W., Shi, M., Ye, R., Rao, Z., & Zhao, G. (2010). Effects of infrasound on cell proliferation in the dentate gyrus of adult rats. *Neuroreport*, Jun 2;21 (8), 585-9.

- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* 2nd Ed . Chichester, UK: John Wiley and Sons.
- Materialien Nr. 63 Windenergieanlagen und Immissionsschutz, Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen, Wallneyer Straße 6, 45133 Essen, Germany, 2002 (Protection from emissions from wind turbines).
- Massachusetts Environmental Protection Agency (MEPA). (2007). *Greenhouse Gas Emissions Policy and Protocol*. Retrieved from <http://www.env.state.ma.us/mepa/ghg.aspx>
- National Research Council (NRC). (1991). *Animals as sentinels of environmental health hazards*. Washington, DC: National Academy Press.
- Neuroscience (2010). *May 19;167* (3), 909–19.
- New England Wind Energy Project (NEWEEP). (2011, September 2). *Understanding the Current Science, Regulation, Mitigation of Shadow Flicker*. Webinar retrieved from http://www.windpoweringamerica.gov/filter_detail.asp?itemid=2967.
- Nissenbaum, M., Aramini, J., & Hanning, C. (2011). *Adverse health effects of industrial wind turbines: a preliminary report*. Paper presented at the 10th International Congress on Noise as a Public Health Problem (ICBEN) London, UK.
- O'Neal, R.D, Hellweg, R.D., Jr., Lampeter, R.M. (2011, March). *Low frequency noise and infrasound from wind turbines*. *Noise Control Engineering Journal*, v 59, n 2, p 135-57.
- Palmer, W. (2011). *Wind Turbine Noise - Clues to the Mystery of Why People are Hurting*. *ASA 161st meeting. Paper 3aNSa2*.
- Palmer, W. (2011, July). *Collecting Data on Wind Turbine Sound to Identify Causes of Identified Concerns*. POMA Volume 12, pp 040003; (21 pages).
- Passchier-Vermeer, W. (1993). *Noise and health*. The Hague: Health Council of the Netherlands.

- Pedersen, E., & Persson Waye, K. (2007). Wind turbine noise, annoyance and self-reported health and well-being in different living environments. *Occup Environ Med*, 64(7), 480–486.
- Pedersen, E., van den Berg, F., Bakker, R., & Bouma, J. (2009). Response to noise from modern wind farms in The Netherlands. *Journal of the Acoustical Society of America*, 126(2), 634–643.
- Pedersen, E. & Waye, K.P. (2004). Perception and annoyance due to wind turbine noise—a dose-response relationship. *Journal of the Acoustical Society of America*, 116 (6), 3460–3470.
- Pedersen, T. H., & Nielsen, K. S. (1994). Genvirkning af støj fra vindmøller (Annoyance by noise from wind turbines). Copenhagen: Lydtekniske Institut.
- Pedersen, E., & Larsman, P. (2008). The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines. *Journal of Environmental Psychology*, 28, 379–389.
- Pei, Z., Sang, H., Li, R., Xiao, P., He, J., Zhuang, Z., Zhu, M., Chen, J., & Ma, H. (2007) Infrasound-induced hemodynamics, ultrastructure, and molecular changes in the rat myocardium. *Environ Toxicol, Apr*; 22 (2), 169–75.
- Pei, Z., Zhuang, Z., Xiao, P., Chen, J., Sang, H., Ren, J., Wu, Z., & Yan, G. (2009). Influence of infrasound exposure on the whole L-type calcium currents in rat ventricular myocytes. *Cardiovasc Toxicol*, Jun; 9 (2), 70–7.
- Pederson, Moller. (2011) Low-Frequency Noise from Large Wind Turbines. *JASA* 129(6), 3727-3744.
- Pederson, (2011). Health Aspects Associated with Wind Turbine Noise: Results from Three Field Studies, *Noise Control Engineering*. J. 59(1), 47-53.

Pedersen, Wayne. (2004). Perception and Annoyance Due to Wind Turbine Noise – A Dose – Response Relationship, *JASA* 116 (6) 3460-3470.

Petounis ,A., Spyarakis, C., & Varonos, D. (1977). Effects of infrasound on activity levels of rats. *Physiol Behav*, Jan; 18 (1), 153–5.

Phipps, R. (2007). In the matter of Moturimu Wind Farm Application. Evidence to Joint Commissioners. Palmerston, North.

Pierpont, N. (2009). Wind turbine syndrome. A report on a natural experiment. Santa Fe, NM: K-selected books.

Pohl, J., Faul, F., & Mausfeld, R. (1999) Belästigung durch periodischen Schattenwurf von Windenergieanlagen - Laborpilotstudie (mit Anhang) and Feldstudie (mit Anhang), Staatliches Umweltamt Schleswig, Germany, (Annoyance due to shadow flicker from wind turbines- laboratory pilot study (with appendix) and field study (with appendix)).

Rached, T. (2008), Communicating complexity and informing decision-makers: challenges in the data and computation of environmental benefits of renewable energy. (M.Sc. Thesis in Technology and Policy), Massachusetts Institute of Technology.

Rand, M., & Clarke, A. (1990). The environmental and community impacts of wind energy in the UK. *Wind Eng*, 14, 319–330.

Rasmussen, (1983). Human Body Vibration Exposure and Its Measurement, *JASA* 73(6) 2229 (abstract), also a BandK Tech. Paper. 1982.

Rogers, A., Patient Safety and Quality: An Evidence Based Handbook for Nurses: Vol 2. Chapter 40, The effects of fatigue and sleepiness on nurse performance and patient safety. pp 2-509-2-254.

Salt, Hullar. (2010). Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines . *Hearing Research* 268 12-21.

- Schofield, R. Ph.D. (2010). Seismic Measurements at the Stateline Wind Project And A Prediction of the Seismic Signal that the Proposed Maiden Wind Project Would Produce at LIGO. University of Oregon. LIGO-T020104-00-Z.
- Sefan Oerlemans, S. (2009). Detection of Aeroacoustic Sound Sources on Aircraft and Wind Turbines. *Thesis*, University of Twente, Enschede. ISBN 978-90-806343-9-8.
- Shepherd, D., McBride, D., Welch, D., Dirks, K. N., & Hill, E. M. (2011). Evaluating the impact of wind turbine noise on health-related quality of life. *Noise Health*, 13 (54), 333–339.
- Shepherd, D., Welch, D., Dirks, K. N., & Mathews, R. (2010). Exploring the relationship between noise sensitivity, annoyance and health-related quality of life in a sample of adults exposed to environmental noise. *Int J Environ Res Public Health*, 7 (10), 3579–3594.
- Shepherd, K. P. & Hubbard, H.H. (1981, July). Sound Measurements and Observations of the MOD-OA Wind Turbine Generator NASA-CR165752. Hampton, VA : NASA Langley Research Center, 1982.
- Seifert, H., Westerhellweg, A., & Kröning, J. (2003). Risk analysis of ice throw from wind turbines. Proceedings of Boreas VI, Pyhäntunturi, Finland.
- Sienkiewicz Z, (2007). Prog Biophys Mol Biol. *Jan-Apr*; 93 (1-3), 414–20. Rapporteur report: roundup, discussion and recommendations.
- Smedley, ARD., Webb, A.R. & Wilkins, A.J. (2010). Potential of wind turbines to elicit seizures under various meteorological conditions. *Epilepsia*, 51 (7), 1146–1151.
- Spyraki, C., Papadopoulou-Daïfoti, Z., & Petounis A. (1978). Norepinephrine levels in rat brain after infrasound exposure. *Physiol Behav.*, Sep; 21 (3), 447–8.
- Stephens, D. G., Shepherd, K. P., Hubbard, H. H. & Grosveld, F. W. (2008). Guide to the evaluation of human exposure to the noise from large wind turbines. *NASA Technical Memorandum 83288*, March, 1982, Retrieved from

http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19820016175_1982016175.pdf.

Styles, P., Stimpson, I., Dr., Toon, S., England, R., Wright, M. (2005). Microseismic and Infrasound Monitoring of low frequency noise and vibrations from windfarms – Eskdalemuir Schotland. *Keele University Report*.

Sugimoto, T., Koyama, K., Kurihara Y., Watanabe K. (2008, August). Measurement of Infrasound Generated by Wind Turbine Generator. Takanao, 20-22, University Electro-Communications. SICE Annual Conference, August 20-22, 2008. Japan.

Swinbanks, M. (2010). Wind Turbines: Low-Frequency Noise and Infrasound Revisited.. Retrieved from: http://www.knowwind.org/-webdoc/assets_library_documents_Malcolm_Swinbanks.pdf

Tandy, V., Lawrence, T., (1998, April). The Ghost in the Machine. *Journal of the Society of Psychical Research*, Vol 62 No 851.

Tandy, V. Something in the Cellar. *Journal of the society for Psychical Research*. Vol 64.3 No 860.

Takahashi Y., Kanada K., Yonekawa, Y. (2009). Some Characteristics of Human Body Surface Vibration Induced by Low Frequency Noise. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*. National Institute of Industrial Health, 6-21-1, Nagao, Tama-ku, Kawasaki 214-8585, Japan. Pages 9 – 20.

Takahashi Y., Kanada K., Yonekawa, Y. (2001). A New Approach to Assess Low Frequency Noise in the Working Environment. *Industrial Health*, 39, 281–286.

Todd et al. (2008). Tuning and sensitivity of the human vestibular system to low-frequency vibration. *Neuroscience Letters* 444, 36-41.

van den Berg, G.P. (2004). Effects of the Wind Profile at Night on Wind Turbine Sound. *Journal of Sound and Vibration*, 277, 955–970.

van den Berg, G.P., (2011) Private communication and transfer of data obtained near the Rheine wind farm.

van den Berg, G. P., Pedersen, E., Bouma, J., & Bakker, R. (2008). *Project WINDFARMperception*. Visual and acoustic impact of wind turbine farms on residents: *FP6-2005-Science-and-Society-20*. Specific Support Action Project no. 044628. Final report. . Retrieved from <http://www.rug.nl/wewi/deWetenschapswinkels/-natuurkunde/publicaties/WFp-final-1.pdf> related link: <http://www.rug.nl/wewi/-deWetenschapswinkels/natuurkunde/onderzoek/WINDFARMperceptionproject/linksEerderOnderzoek?lang=en>

Van Dongen et al. The Cumulative Cost of Additional Wakefulness: Dose-Response Effects on Neurobehavioral Functions and Sleep Physiology from Chronic Sleep Restriction and Total Sleep Deprivation. *Sleep* (2003) vol. 26 (2) pp. 117-26.

van Kuik, G. A. M. (2007). The Lanchester–Betz–Joukowski Limit. *Wind Energy*, 10, 289–291.

Vestas. Retrieved from http://re.emsd.gov.hk/english/wind/large/large_to.html.

Vindkraftsstatistik. (2010). (Wind Energy, 2010). www.energimyndigheten.se

Von Dirke, H.E., Parker, D.E. (1994, August). Differences in Otolith and Abdominal Viscera Gaviceptor Dynamics: Implications for Motion Sickness and Perceived Body Position. *Space and Environmental Medicine*. (maybe related to NASA CR-93 207267).

Von Hunerbein, S. , Kin, A., Hargreaves, J, Moorehouse, A, & Plack, C. (2010, October). Perception of noise from large wind turbines (EFP-06 Project). University of Salford, Reviewed from: http://www.windpower.org/download/942/-Perception_low_frequency_noise.PDF

Vowles, H. P. (1932).Early Evolution of Power Engineering, *Isis*, 17 (2), 412–420.

Wagner, S., Bareib, R. & Guidati, G. (1996). *Wind Turbine Noise*. Springer, Berlin.

Watanabe T., Moeller, H. (1990). Low Frequency Hearing Thresholds in Pressure Field and in Free Field. *Low Frequency Noise Vibration and Active Control* Vol 9 number 3 106-115.

World Health Organization (WHO). (2009). *Night noise guidelines for Europe*.

Wolsink, M., Sprengers, M., Keuper, A., Pedersen, T. H., & Westra, C. A. (1993). Annoyance from wind turbine noise on sixteen sites in three countries. Paper presented at the European Community Wind Energy Conference, 8–12 March, Lübeck, Travemünde, Germany.

Yuan, H., Long, H., Liu, J., Qu, L., Chen, J., & Mou, X. (2009). Effects of infrasound on hippocampus-dependent learning and memory in rats and some underlying mechanisms. *Environ Tox and Pharm*, 28, 243–247.

Yamamura, K & Kishi, R. (1980). Effects of infrasound on the rota-rod treadmill performance of rats. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.*, 45 (1), 81-6.

Bibliografia

Alves-Pereira, M., et al. Legislation Hinders Research Into Low Frequency Noise.

Alves-Pereira, M. B., N.A.A.C. (2007). "Vibroacoustic disease: Biological effects of infrasound and low-frequency noise explained by mechanotransduction cellular signaling." Progress in Biophysics and Molecular Biology 93: 256-279.

A Bold Effort in Vermont: The 1941 Smith-Putnam wind turbine. Retrieved 9/5/11 from <http://www.ieee.org/organizations/pes/public/2009/nov/peshistory.html>

Bolinger, Mark (2011, January). Community Wind: Once Again Pushing the Envelope of Project Finance. Retrieved 9/10/11 from Environmental Energy Technologies Division. <http://eetd.lbl.gov/EA/EMP/re-pubs.html>

Bowdler, D. (2008). "Amplitude Modulation of Wind Turbine Noise: A Review of Evidence." Institute of Acoustics Bulletin 33(4): 31-41.

Bruck, D., Ball, M. Thomas, I, & Rouillard, V. (2009). "How does the pitch and pattern of a signal affect auditory arousal thresholds?" Journal of Sleep Research 18: 196-203.

Castello Branco, N.A.A.A.-P.M. (2004). "Vibroacoustic Disease." Noise and Health 6(23): 3-20.

Certificate of Public Good Issued Pursuant to 30 VSA Section 248, August 8, 2007, from Vermont Public Service Board to UPC Vermont Wind, LLC for Sheffield, VT Wind Project. Retrieved 9/4/11 from <http://psb.vermont.gov/docketsandprojects/electric/-7156/ordersandmemos>

Chapman, S. (2011) "Wind turbine sickness prevented by money drug." The Drum Opinion 2011. <http://www.abc.net.au/unleashed/45730.html>.

Chief Medical Officer of Health (CMOH) Report, O. (2010). The Potential Health Impact of Wind Turbines.

- CLF Ventures, I. (2011). Land-based Wind Energy: A Guide to Understanding the Issues and Making Informed Decisions. http://www.clfventures.org/docs/wind_guide.pdf.
- Colby, W. D., et al. (2009). Wind Turbine Sound and Health Effects - An Expert Panel Review.
- Consulting, S. A. (2010). White Rock Wind Farm Environmental Noise Assessment, for Epuron Pty Ltd.
- Council, A. N. H. a. M. R. (2010). Wind Turbines and Health - A Rapid Review of Evidence. <https://majorprojects.affinitylive.com/public/985165fa5563af254cb13656534a9f8e/17Appendix%20-%20-%20Noise%20Assessment%20Page%2037-48.pdf>.
- Council, A. N. H. a. M. R. (2010). Wind Turbines and Health Public Statement. A. N. H. a. M. R. Council.
- Council, K. E. (2005). Wind Energy Siting Handbook: Guideline Options for Kansas Cities and Counties.
- Council, N. R. (2007). Environmental Impacts of Wind-Energy Projects. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11935.
- Cummings, J. (2011). Wind Farm Noise 2011 - Science and Policy Overview.
- Curthoys, I. S., Kim, J., McPhedran, S.K., & Camp, A.J. (2006). "Bone conducted vibration selectively activates irregular primary otolithic vestibular neurons in the guinea pig." Experimental Brain Research **175**(2): 256-267.
- Danish Government, The (2011, February). Energy Strategy 2050: from coal, oil, and gas to green energy. Page 5. Retrieved 9/11/11 from <http://ens.netboghandel.dk/publikationer/publikationsdetaljer.-aspx?Pid=2cde3fff-a1f2-4539-b945-9e896fffc670>
- Danish Energy Agency. Retrieved 8/29/11 from <http://www.ens.dk/en-US/supply/Renewableenergy/WindPower/Sider-/Forside.aspx>.

Danish Energy Agency (2009). Wind Turbines in Denmark. Retrieved 8/28/11 from <http://www.ens.dk/en-US/-supply/Renewable-energy/WindPower/Sider/Forside.aspx>.

Danish Ministry of Interior and Health. Retrieved 8/29/11 from <http://www.sum.dk/English.aspx>.

Danish Ministry of the Environment. Retrieved 8/29/11 from <http://www.mst.dk>

Danish Ministry of the Environment, Environmental Protection Agency. Retrieved 8/29/11 from http://www.mst.dk/English/Focus_areas/FAQ_low_frequency_noise_from_wind_turbines.htm

de Quervain, D. J. F., Roosendaal, B., & McGaugh, J.L. (1998). "Stress and glucocorticoids impair retrieval of long-term spatial memory." Nature **394**: 787-790.

Donald, M. (2011). Presentation to the Falmouth Board of Selectmen - Falmouth Wind Turbine Shadow Flicker and Safety.

Energy, U. S. D. o. (2008). Workshop Report: Research Needs for Wind Resource Characterization.

Energy in Sweden. Facts and Figures 2010, Page 7. Retrieved 8/30/11 from <http://www.energimyndigheten.se/en/Press/News/New-publication-Energy-in-Sweden-2010/>

Environment, C. f. H. t. G. (2011). Mining Coal, Mounting Costs: the life cycle consequences of coal, Harvard Medical School - Center of Health and the Global Environment.

Environmentally Hazardous Activities and Public Health. (1998) Ordinance. 40.1 – 40.6, updated 2002

Feldmann, J. P., F. (2004). "Effects of low frequency noise on man - a case study." Noise and Health **7**(25): 23-24.

Fisk, Andy. Former Maine DEP Bureau Director. Fall of 2010. Personal email communication.

Fox Islands Wind Project Background. Retrieved 9/10/11 from

<http://www.foxislandswind.com/background.html>

Fox Islands Wind Neighbors website. Retrieved 9/10/11 from

<http://fiwn.wordpress.com/category/vinalhaven/>

Global Wind Energy Council. Retrieved 8/30/11 from <http://www.gwec.net/index.php?id=121>

Haggerty, F. D., J. (n.d.). "Commercial Land Wind Turbine Siting in Southeastern

Massachusetts." from <http://www.mass.gov/Eoeea/docs/doer/renewables/->

[wind/Public%20Comments_Wind%20On%20State%20Owned%20Lands_Listening%20Session%201_Frank%20Haggerty%20%20Joe%20DeLeo.pdf](http://www.mass.gov/Eoeea/docs/doer/renewables/-wind/Public%20Comments_Wind%20On%20State%20Owned%20Lands_Listening%20Session%201_Frank%20Haggerty%20%20Joe%20DeLeo.pdf).

Halmstad University, Halmstad, Sweden. Retrieved 9/11/11 from

<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed?term=pedersen%20wind%20turbines&itool=QuerySuggestion>

Hanning Dr., Christopher (2009, June). "Sleep disturbance and wind turbine noise: on behalf of Stop Swinford Wind Farm Action Group.

Harding, G., Harding, P. & Wilkins, A. (2008). "Wind turbines, flicker, and photosensitive epilepsy: Characterizing the flashing that may precipitate seizures and optimizing guidelines to prevent them." *Epilepsia* **49**(6): 1095-1098.

Harrison, J. (2010). "The Global Wind Industry and Adverse Health Effects: Loss of Social Justice?" International Symposium on Adverse Health Effects from Wind Turbines, Picton, Ontario, Canada.

HGC Engineering. (2010, December). "Low Frequency Noise and Infrasound Associated with Wind Turbine Generator Systems". Ontario Ministry of the Environment, RFP No. OSS-078696

Hiskes, J. (2009) "One doctor's quest to sound the alarm on wind turbine syndrome." *Grist*.

<http://www.grist.org/article/2009-11-16-nina-pierpont-quest-to-sound-the-alarm-on-wind-turbine-syndrome>.

Ising, H., W Babisch, B. Kruppa (1999). "Noise induced Endocrine Effects and Cardiovascular Risks". Federal Environmental Agency, Inst. Of Water, Soil and Air Hygiene, Berlin. Noise Health 1 (4): 37 – 48.

Ising H., Braun, C. (2000). "Acute and chronic endocrine effects of noise": Review of the research conducted at the Inst. For Water, Soil and Air Hygiene. Noise Health 2(7) 7 – 24.

Jakobsen, J. (2005). "Infrasound Emission from Wind Turbines." Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 24(3): 145-155.
<http://www.amherstislandwindinfo.com/jakobsen-low-frequency-noise.pdf>.

Jakobsen , J., Chief Advisor, Danish Ministry of the Environment. Personal email communication.

Kansas, E. C. (2005). Wind Energy Siting Handbook: Guideline Options for Kansas Cities and Counties.

Kartor over riksintresseomraden (Map over national interests). Retrieved from 9/4/11
<http://www.energimyndigheten.se/sv/Om-oss/Var-verksamhet/Framjande-av-vindkraft1/Riksintresse-vindbruk-/Kartor-over-riksintresseomraden/> Translated through Google Translate

Keith, S. E., D. S. Michaud, & S. H. P. Bly. (2008). "A proposal for evaluating the potential health effects of wind turbine noise for projects under the Canadian Environmental Assessment Act.." Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control 27 (4):253-265.

Kjellberg, A., Tesarz, M., Holmberg, K., & Landstrom U. (1997). "Evaluation of Frequency-Weighted Sound Level Measurements for Prediction of Low-Frequency Noise

Annoyance." Environment International **23**(4): 519-527.

Kollman, J. (2010). Potential Health Impacts of Wind Turbines.

Leventhall, G., Pelmear, P., & Benton, S. (2003). A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects: Report for DEFRA.

Leventhall, G. (2004). "Low Frequency Noise and Annoyance." Noise and Health **6**(23): 59-72.

Leventhall, G., Benton, S., & Robertson, D. (2005). Coping Strategies for Low Frequency Noise, Department for Environment, Food and Rural Affairs, U.K.

Leventhall, G. (2006). "Infrasound from Wind Turbines - Fact, Fiction, or Deception." Canadian Acoustics **34**(2): 29-36.

Leventhall, G. (2009). "Low Frequency Noise. What we know, what do not know, and what we would like to know". Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control **28**(2): 79-104.

Lundberg, U. (1999). "Coping with stress; Neuroendocrine Reactions and Implications for Health". Department of Psychology, Stockholm. Noise Health **1** (4); 67 – 74

Maine Board of Environmental Protection (2011, July 7) hearing AR-69, Testimony of Steve Bennett. Retrieved 9/10/11 from http://www.maine.gov/dep/ftp/bep/ch375citizen_petition/pre-hearing/

Maine DEP Mars Hill Mountain Wind Turbine Farm Webpage. Retrieved 9/10/11 from http://www.maine.gov/dep/blwq/docstand/sitelaw/Selected%20developments/-Mars_Hill/index.htm

MRSA (Maine Revised Statute Annotated), Title 35-A, Chapter 34, Section 3401 – 3458. Retrieved 9/10/11 from <http://www.mainelegislature.org/legis/statutes/35-A/title35-Asec3401.html>

MRSA, Title 38, Chapter 3-A, Section 577. Retrieved 9/10/11 from

<http://www.mainelegislature.org/legis/statutes/38/title38sec577.html>

Massachusetts, R. E. R. L.-U. o. Wind Power in Mattapoisett, Marion and Rochester: Siting Considerations for a Met Tower and Fatal Flaws Analysis for a Wind Turbine.

Massachusetts Department of Environmental Protection, Energy and the Environment, Public Comment Received and Information Submitted:

<http://www.mass.gov/dep/energy/wind/comments.htm>

Melamed, S., & Bruhis, S. (1996). "The Effects of Chronic Industrial Noise Exposure on Urinary Cortisol, fatigue, and irritability: A controlled Field Experiment." Journal of Occupational and Environmental Medicine 38(3): 252-256.

Michaud, D.; S.H.P. Bly, & S.E. Keith. (2008). "Using a change in percentage highly annoyed with noise as a potential health effect measure for projects under the Canadian Environmental Assessment Act." Canadian Acoustics 36(2): 13-28.

Minnesota, D. o. H.-E. H. D. (2009). Public Health Impacts of Wind Turbines.

Moller, H. P., C.S. (2011). "Low-frequency noise from large wind turbines." Acoustical Society of America 129(6): 3727-3744.

[http://www.macvspc.info/M%C3%B8ller Pedersen 2011.pdf](http://www.macvspc.info/M%C3%B8ller_Pedersen_2011.pdf).

Moorhouse, A., Waddington, D. & Adams, M. (2005). Procedure for the assessment of low frequency noise complaints, Acoustic Research Centre, Salford University.

O'Donnell, D., Silva, E., Munch, M., Ronda, J.M., Wang, W., & Duffy, J.F. (2009).

"Comparison of subjective and objective assessments of sleep in health older subjects without sleep complaints." Journal of Sleep Research 18: 254-263.

OLR Research Report for the State of Connecticut (2011 February). Standards in Other States for Siting Wind Projects, Retrieved 9/4/11 from <http://www.cga.ct.gov/2011/rpt/2011-R-0023.htm>

Ontario, M. o. t. E. (2009). Development of Noise Setbacks for Wind Farms - Requirements for Compliance with MOE Noise Limits.

Otolaryngology Department, W. U. o. S. L. (n.d.). "Wind Turbine Sound Measurements."
Retrieved June 28, 2011, from <http://oto2.wustl.edu/cochlea/wt4.html>.

Pedersen, E. W., K.P. (2004). "Perceptions and annoyance due to wind turbine noise - a dose-response relationship." Journal of the Acoustical Society of America 116(6): 3460-3470.

Pedersen E, Larsman P. (2008) "The impact of visual factors on noise annoyance among people living in the vicinity of wind turbines." Journal of Environmental Psychology 28(4):379-389.

Pedersen E (2007) "Human response to wind turbine noise." The Sahlgrenska Academy, Goteborg Univ, Goteborg. Retrieved from
https://guoa.ub.gu.se/dspace/bitstream/2077/4431/1/Pedersen_avhandling.pdf

Persson R. M. Albin, J.Ardö, J. Björk, & K. Jakobsson. (2007). "Trait anxiety and modeled exposure determinants of self reported annoyance to sound, air pollution and other environmental factors in the home." International Archives of Occupational and Environmental Health 18: 179-19

Phillips, C. V. (2010). Analysis of the Epidemiology and Related Evidence on the Health Effects of Wind Turbines on Local Residents, Windaction.org.
<http://www.windaction.org/documents/28175?theme=print>.

Phillips, C. V. (2011). "Properly Interpreting the Epidemiologic Evidence about the Health Effects of Industrial Wind Turbines on Nearby Residents." Bulletin of Science, Technology, and Society 31(4): 303-315.

Punch, J., James, R. & Pabst, D. (2010). Wind Turbine Noise: What Audiologists Should Know,

Audiology Today. Jul/Aug. 2010.

<http://www.windturbinesyndrome.com/img/WindTurbineNoise.pdf>.

Roberts, M., & Roberts, J. (2009). Evaluation of the Scientific Literature on the Health Effects Associated with Wind Turbines and Low Frequency Sound.

Salt, A. N. (2010). Infrasound: Your Ears "Hear" it but They Don't Tell Your Brain. Symposium on Adverse Health Effects of Industrial Wind Turbines.

Salt, A. N., & Hullar, T.E. (2010). "Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines." *Hearing Research* 268: 12-21.

Salt, A. N. K., J.A. (2011). "Infrasound From Wind Turbines Could Affect Humans." *Bulletin of Science, Technology, and Society* 31(4): 296-302.

Schienle, A., Stark, R. & Vaitl, D. (1998). "Biological Effects of Very Low Frequency (VLF) Atmospherics in Humans: A Review." *Journal of Scientific Exploration* 12(3): 455-468.

Sciences, N. A. o. (2007). Environmental Impacts of Wind-Energy Projects. http://www.nap.edu/catalog.php?record_id=11935.

Shaw, W. J., Lundquist, J.K., & Schreck, S.J. (2009). Research Needs for Wind Resource Characterization. American Meteorology Society.

Slutrapport MPD Samordningsproj uppdaterad 0911031. (2009, April). Page 73. Retrieved 8/30/11 from <http://www.vindlov.se/sv/>. Translated through Google Translate

Spreng, M. (2000). "Possible health effects of noise induced cortisol increase". Department of Physiology, University Erlangen, Germany. *Noise Health* 2(7); 59 – 64

State of Maine. Governor's Office of Energy Independence and Security. Comprehensive State Energy Plan 2008 – 2009. Page 2 – 3. Retrieved 9/11/11 from <http://www.maine.gov/oeis/>

State of Maine. Governor's Task Force on Wind Power. Retrieved 9/4/11 from <http://www.maine.gov/doc/mfs/windpower/>

Stelling, K. (2009). Summary of Recent Research on Adverse Health Effects of Wind Turbines.

Swedish Energy Agency. (2009). The Electricity Certificate System. Retrieved 8/30/11 from <http://www.energimyndigheten.se/en/International/Instruments/The-electricity-certificate-system/>

Swedish Environmental Protection Agency. (1999). The Environmental Code. Retrieved 8/30/11 from <http://www.naturvardsverket.se/en/In-English/Start/Legislation-and-other-policy-instruments/The-Environmental-Code/>

Swedish Ministry of the Environment and Ministry of Enterprise, Energy, and Communication. (2009, July). An eco-efficient future: an overview of Swedish climate and energy policy. Retrieved 9/11/11 from <http://www.sweden.gov.se/sb/d/574/a/129935>

Swedish Wind Power Permitting (Vindlov Allt Om Tillstand) Retrieved from 8/30/11 <http://www.vindlov.se/sv/> Translated through Google translate

Takahashi, Y., et al. (2005). "A Study of the Relationship between Subjective Unpleasantness and Body Surface Vibrations Induced by High-level Low-frequency Pure Tones." *Industrial Health* 43: 580-587.

Todd, N. P. M., Rosengren, S.M., & Colebatch, J.G. (2008). "Tuning and Sensitivity of the human vestibular system to low-frequency vibration." *Neuroscience Letters* 444: 36-41.

Town of Bethany, N. Y. (2005). "Report from the Bethany Wind Turbine Study Committee." from <http://docs.wind-watch.org/bethany-windturbinestudycommitteereport.pdf>.

Van den Berg, G. P. (2004). Do Wind Turbines Produce Significant Low Frequency Sound Levels? Low Frequency Noise and Vibration and its Control. Maastricht Netherlands. 11th International Meeting.

Van den Berg, G. P. (2005). "The Beat is Getting Stronger: The Effect of Atmospheric Stability on Low Frequency Modulated Sound of Wind Turbines." *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 24(1): 1-24.

http://www.stephanion.gr/aiolika/The_effect_of_atmospheric_stabilty.pdf.

Vermont Comprehensive Energy Plan, (2009). Page III-61. Retrieved 9/4/11 from <http://publicservice.vermont.gov/pub/state-plans.html>

Vermont Comprehensive Energy Plan Website. Retrieved 9/11/11 from <http://www.vtenergyplan.vermont.gov/>

Vermont Comprehensive Energy Plan,Draft 2011. Page III 52 – 53. Retrieved 9/4/11 from <http://www.vtenergyplan.vermont.gov/>

Vermont Department of Health. (2010, October 15) Potential Impact on the Public's Health from Sound Associated with Wind Turbine Facilities. Page 2.

Vermont Small-Scale Wind Energy Program. Retrieved 9/5/11 from. <http://www.vtwindprogram.org/>

Vermont Statute Title 30, Section 248. Powers and Duties of Vermont Public Service. Retrieved 9/4/11 from <http://www.leg.state.vt.us/statutes/fullsection.cfm?Title=30&-Chapter=005&Section=00248>

Vermont Wind Project Orders and Memoranda. Retrieved 9/4/11 from <http://psb.vermont.gov/docketsandprojects/electric/7156/ordersandmemos>.

Vindkraftsstatistik 2010. (Wind Energy, 2010). Page 15. Retrieved 9/4/11 from www.energimyndigheten.se Translated through Google Translate.

Vindkraftsstatistik 2010. (Wind Energy, 2010). Page 7. Retrieved 9/4/11 from www.energimyndigheten.se Translated through Google Translate.

Waye, K. P., et al. (2002). "Low Frequency Noise Enhances Cortisol Among Noise Sensitive Subjects During Work Performance." *Life Sciences* 70: 745-758.

Waye, K. P., & Ohrstrom, E. (2002). "Psycho-acoustic characters of relevance for annoyance of wind turbine noise." *Journal of Sound and Vibration* 250(1): 65-73.

Waye KP, Clow A, Edwards S, Hucklebridge F, Rylander R. (2003) "Effects of nighttime low frequency noise on the cortisol response to awakening and subjective sleep quality." *Life Sciences* 72(8):863-75.

Windfarms, C. (2011). "Wind Turbine Accidents." Retrieved July 25, 2011, from <http://www.caithnesswindfarms.co.uk/fullaccidents.pdf>.

wind-watch.org. (2009). "European Setbacks (minimum distance between wind turbines and habitations)." Retrieved July 1, 2011, from <http://www.wind-watch.org/documents/european-setbacks-minimum-distance-between-wind-turbines-and-habitations/>

Wind Power Projects in Maine. Retrieved 9/10/11 from http://www.nrcm.org/maine_wind_projects.asp.

Członkowie Panelu pragną podziękować Instytutowi Donahue przy Uniwersytecie Massachusetts za cenne wsparcie logistyczne.

Poglądy i opinie wyrażone w tym raporcie należą jedynie do autorów raportu, członków panelu ekspertów, których badania skupiły się na zagadnieniach potencjalnego wpływu turbin wiatrowych na zdrowie. Te poglądy i opinie nie odzwierciedlają poglądów i opinii Uniwersytetu stanu Massachusetts ani Instytutu Donahue.