



**Politechnika Opolska**  
**Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej**

mgr inż. Tomasz Malec

**AUTOREFERAT ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**

**Pomiary i analiza sygnałów infradźwiękowych  
generowanych pracą turbin wiatrowych dużych mocy**

Promotor:

prof. dr hab. inż. Tomasz Boczar

Autor jest stypendystą projektu *Stypendia doktoranckie - inwestycja w kadrę naukową województwa opolskiego* współfinansowanego przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego



**KAPITAŁ LUDZKI**  
NARODOWA STRATEGIA SPÓJNOŚCI

**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



**Opole, 2015**

## Spis treści

|       |                                                                                                                             |    |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1     | Wprowadzenie .....                                                                                                          | 3  |
| 2     | Cel, zakres i teza pracy.....                                                                                               | 4  |
| 3     | Charakterystyka sygnałów infradźwiękowych .....                                                                             | 6  |
| 3.1   | Zjawisko generacji i cechy sygnałów infradźwiękowych .....                                                                  | 6  |
| 3.2   | Infradźwięki emitowane pracą turbin wiatrowych .....                                                                        | 8  |
| 3.2.1 | Hałas infradźwiękowy .....                                                                                                  | 8  |
| 3.3   | Przegląd przepisów prawnych dotyczących oceny szkodliwości hałasu infradźwiękowego .....                                    | 9  |
| 4     | Dobór układu do pomiaru i analizy infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe .....                                   | 11 |
| 4.1   | Metodyka wykonywania pomiarów i wyboru punktów referencyjnych.....                                                          | 11 |
| 4.2   | Opis zastosowanej aparatury pomiarowej.....                                                                                 | 12 |
| 4.3   | Metody przetwarzania i analizy zarejestrowanych infradźwięków .....                                                         | 14 |
| 4.4   | Zastosowanie filtrów wagowych do korekcji częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów .....                                | 15 |
| 4.5   | Wybór deskryptorów charakteryzujących zarejestrowane sygnały infradźwiękowe .....                                           | 16 |
| 5     | Wyniki przeprowadzonych pomiarów i ich analiz .....                                                                         | 17 |
| 5.1   | Parametry techniczne i lokalizacja badanych turbin wiatrowych .....                                                         | 17 |
| 5.2   | Wyniki analizy częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych .....                                          | 19 |
| 5.2.1 | Zestawienie porównawcze uzyskanych wyników .....                                                                            | 20 |
| 5.2.2 | Aproksymacja uzyskanych zależności częstotliwościowych .....                                                                | 23 |
| 5.2.3 | Rozkłady czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych.....                                          | 24 |
| 5.2.4 | Analiza porównawcza sygnałów akustycznych w paśmie infradźwiękowym i słyszalnym .....                                       | 25 |
| 6     | Modelowanie rozkładów przestrzennych akustycznych sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbiny wiatrowe ..... | 27 |
| 7     | Ocena uzyskanych wyników pod kątem obowiązujących prawnie wartości kryterialnych .....                                      | 29 |
| 8     | Zalecenia dotyczące metodyki pomiarów infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe .....                               | 31 |
| 9     | Wnioski .....                                                                                                               | 33 |
| 10    | Podsumowanie .....                                                                                                          | 35 |

# 1 Wprowadzenie

Energetyka wiatrowa stanowi obecnie jedno z podstawowych źródeł odnawialnych wytwarzania energii elektrycznej, w której jako paliwo wykorzystywana jest energia kinetyczna wiatru. Jej źródłem jest energia słoneczna, która poprzez ogrzewanie powierzchni Ziemi oraz tworzące się gradienty temperatur wywołuje prądy konwekcyjne w atmosferze, różnice ciśnień i cyrkulację powietrza.

Światowe zasoby energii wiatru, które możliwe są obecnie do wykorzystania z technicznego punktu widzenia, szacuje się na ok. 53 tys. TW·h/rok. Jest to ilość przewyższająca ponad czterokrotnie globalne roczne zużycie energii elektrycznej na świecie. Według danych opublikowanych w 2009 r. przez American Wind Energy Association (AWEA) oraz European Wind Energy Association (EWEA), aż 90% tych zasobów znajduje się na obszarach Europy i USA. W ocenie Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) do 2020 r. zużycie energii elektrycznej w skali świata zwiększy się dwukrotnie, przy czym ponad 10% tej energii może być wytworzone w elektrowniach wiatrowych, co stanowi (2 500-3 000) TW·h/rok [1].

Od ponad 20 lat wykorzystanie energii wiatru do produkcji energii elektrycznej dynamicznie wzrasta. Od 1990 roku liczony w skali świata średni roczny przyrost mocy zainstalowanych w elektrowniach wiatrowych utrzymuje się na poziomie znacznie przekraczającym 25%. Tylko w pierwszym półroczu 2015 roku wzrost mocy zainstalowanej w energetyce wiatrowej wynosił 21,7 GW, w porównaniu do wzrostu odpowiednio o 17 GW w całym 2014 roku. Pod koniec roku 2015 światowa moc wszystkich elektrowni wiatrowych ma wynieść 428 GW. Liderem w światowej produkcji są Chiny, których zainstalowana moc elektryczna turbin wiatrowych zbliża się do poziomu 125 GW. Według danych za pierwszy kwartał 2015 r. [2] Polska znajduje się na 15 miejscu w światowej produkcji energii z wiatru, z wielkością mocy zainstalowanej przewyższającą poziom 4 GW i przyrostem zainstalowanej mocy wytwórczej w pierwszym kwartale 2015 roku rzędu 7,4%. Obecnie w Polsce, według danych Urzędu Regulacji Energetyki, jest zainstalowanych w sumie 981 turbin o łącznej mocy wynoszącej 4117,5 MW (stan na 19.10.2015).

Dynamiczny rozwój energetyki wiatrowej, trwający nieprzerwanie od ponad dwóch dekad, który przejawia się wzrastającą liczbą pracujących turbin wiatrowych i przyrostem mocy zainstalowanej oraz w konsekwencji realnym udziałem w bilansach energetycznych praktycznie wszystkich krajów UE, USA, Chin, czy Japonii, powoduje coraz większe zainteresowanie m.in. społeczności lokalnych, władz samorządowych, kół ekologicznych, elit rządzących jednoznacznym określeniu ich możliwego oddziaływania na środowisko naturalne, w tym również na stan klimatu akustycznego.

Hałas infradźwiękowy generowany przez współczesne turbiny wiatrowe dużej mocy jest zagadnieniem często podnoszonym przez różnego rodzaju instytucje i organy opiniujące ich potencjalny wpływ i oddziaływanie na środowisko. Przy czym prezentowane w tym zakresie opinie i poglądy są często skrajnie rozbieżne, co wynikać może ze złożoności podejmowanej problematyki i analizowanych zjawisk. Problem hałasu infradźwiękowego generowanego przez turbiny wiatrowe, sposoby jego pomiaru i ocena uciążliwości są zagadnieniami, które wymagają prowadzenia szczegółowych badań oraz określenia w sposób jednoznaczny referencyjnej metodyki ich analiz. Należy przy tym podkreślić, że poziom wiedzy, na każdym z aspektów oceny hałasu infradźwiękowego emitowanego pracą instalacji wiatrowych jest dość zróżnicowany. Istnieją teoretyczne opracowania opisujące sposoby generowania fali akustycznej przez obracające się łopaty wirnika, a także przez poszczególne

urządzenia pracujące w gondoli turbiny oraz jej propagację w przestrzeni otwartej [3]. Opracowano także metody badań hałasu w paśmie słyszalnym, które są w sposób szczegółowy opisane, znormalizowane i stosowane na etapie modelowania oraz podczas rejestracji w warunkach rzeczywistych, które dopuszczają rozszerzenie pomiarów o zakres infradźwięków [4, 5]. Ocenę uciążliwości hałasu infradźwiękowego przeprowadza się na stanowiskach pracy [6]. W literaturze brak jest całościowego i usystematyzowanego ujęcia tej problematyki, która obejmowałaby swoim zakresem jednoznaczne sprecyzowanie sposobów i metodyki wykonywania pomiarów, a także jednoznacznego określenia wartości kryterialnych, na podstawie których istniałaby możliwość dokonania obiektywnej oceny ich potencjalnego oddziaływania, wraz z przedstawieniem typowych widm hałasu infradźwiękowego emitowanego przez pracujące turbiny wiatrowe.

Genezę podjętych prac zrealizowanych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej był brak usystematyzowanej wiedzy w zakresie szeroko pojętej tematyki infradźwięków emitowanych podczas pracy elektrowni wiatrowych. W artykułach naukowych uzyskiwane w tym zakresie wyniki badań prezentowane są najczęściej w sposób wyrywkowy i pozbawiony wielu istotnych informacji. W wielu przypadkach brak jest opisu układów pomiarowych, Autorzy nie podejmowali problematyki określenia czynników zewnętrznych, które mogą mieć wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów. Często spotyka się także niewłaściwy sposób interpretacji otrzymanych rezultatów przeprowadzonych badań. Wszystkie wymienione wyżej elementy, w połączeniu z dużą niewiedzą społeczeństwa, spowodowały, że zagadnienie hałasu infradźwiękowego turbin wiatrowych stanowi jeden z kluczowych problemów na etapie wykonywania oceny oddziaływania na środowisko planowanych i istniejących inwestycji oraz stanowi jeden z elementów podnoszonych przez przeciwników powstawania farm wiatrowych.

## **2 Cel, zakres i teza pracy**

W związku z coraz większą popularnością turbin wiatrowych i dynamicznie zwiększającym się ich udziałem w produkcji energii elektrycznej w skali Świata, Europy i Polski, istotną kwestią wydaje się określenie poziomu hałasu infradźwiękowego generowanego pracą instalacji wiatrowych oraz wykonanie oceny ich uciążliwości [6].

Głównym celem pracy było przeprowadzenie kompleksowych i usystematyzowanych badań i wielowariantowych analiz sygnałów infradźwięków generowanych pracą obecnie wykorzystywanych turbin wiatrowych dużych mocy, o wartościach powyżej 1 MW.

W pierwszym etapie został przeprowadzony przegląd doniesień literaturowych tematycznie związanych z podejmowaną problematyką, którego wyniki stanowił punkt wyjścia do podjęcia własnych prac naukowo-badawczych.

Szczegółowe cele przeprowadzonych prac naukowo-badawczych dotyczyły trzech następujących głównych zagadnień:

1. Dokonania oceny poziomu emitowanych przez turbiny wiatrowe infradźwięków przy zmianie szeregu parametrów i czynników zewnętrznych;
2. Odniesienie zmierzonych wartości do wielkości kryterialnych;
3. Określenie wytycznych dla referencyjnej metodyki pomiarowej.

W pracy przyjęto następującą tezę::

***Poziom ciśnienia akustycznego sygnałów infradźwiękowych emitowanych pracą turbin wiatrowych dużych mocy, niezależnie od prędkości wiatru, warunków meteorologicznych, rozwiązań konstrukcyjnych, czasu eksploatacji, wartości mocy znamionowej i wielkości oddawanej do systemu elektroenergetycznego mocy elektrycznej, nie przekracza wartości kryterialnych określonych w obowiązujących przepisach prawnych dotyczących oceny hałasu infradźwiękowego w środowisku pracy.***

W tezie pracy zawarte zostały wszystkie badane okoliczności mogące mieć wpływ na poziom generowanych infradźwięków. Jednocześnie ciągły postęp projektowanych konstrukcji turbin wiatrowych dużych mocy, w ramach którego dąży się do coraz większej redukcji poziomu mocy akustycznej, umożliwił rozciągnięcie tezy na całą rodzinę współcześnie wykorzystywanych turbin. Druga część tezy, odnosząca się do wielkości kryterialnych, korzysta z wielkości opisanych w środowisku pracy, dla którego problem hałasu infradźwiękowego został szczegółowo przebadany w ciągu ostatnich kilkunastu lat i jest jedynym środowiskiem, w którym prowadzi się dokładne badania zmierzające do dokonania oceny wpływu infradźwięków na organizm człowieka.

W celu udowodnienia przyjętej tezy w rozprawie podjęto następujące zagadnienia szczegółowe:

- scharakteryzowano sygnały infradźwiękowe,
- opisano zjawisko generacji i propagacji infradźwięków oraz źródła je wytwarzające,
- określono zakres praktycznego zastosowania infradźwięków, a także wskazano możliwe ich interakcje z poszczególnymi organami człowieka,
- scharakteryzowano infradźwięki generowane pracą współczesnych turbin wiatrowych,
- scharakteryzowano przepisy prawa dotyczące oceny hałasu infradźwiękowego turbin wiatrowych oraz przeanalizowano sposoby ograniczania ich oddziaływania,
- dokonano przeglądu doniesień literaturowych dotyczących tematyki rozprawy, w ramach którego wskazano artykuły reprezentujące skrajnie różne poglądy formułowane na temat szkodliwości generowanych przez turbiny wiatrowe infradźwięków,
- dobrano aparaturę pomiarową i parametry rejestrowanych sygnałów, a także określono metodykę przeprowadzonych badań,
- dokonano doboru wskaźników, na podstawie których przeprowadzono analizy porównawcze uzyskanych wyników, pod kątem oceny infradźwięków emitowanych przez turbiny wiatrowe,
- przeprowadzono ocenę niepewności uzyskiwanych wyników oraz wskazano sposoby eliminacji źródeł zakłóceń, jakie mogą występować podczas pomiarów,
- przedstawiono opis metod przetwarzania i analizy zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych,
- przeprowadzono pomiary hałasu infradźwiękowego w warunkach rzeczywistych, podczas normalnej pracy badanych turbin wiatrowych, według zaproponowanej metodyki,

- zbadano wpływ szeregu parametrów i czynników zewnętrznych na uzyskiwane wyniki pomiarów sygnałów infradźwiękowych emitowanych przez turbiny wiatrowe,
- na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i analiz przeprowadzono ocenę infradźwięków emitowanych przez badane turbiny wiatrowe,
- porównano uzyskane wyniki z wartościami kryterialnymi wykorzystywanymi do oceny wpływu infradźwięków na organizm człowieka,
- wskazano możliwości modelowania rozkładów hałasu infradźwiękowego,
- określono metodykę wykonywania pomiarów infradźwięków generowanych przez współczesne turbiny dużych mocy.

W ramach przeprowadzonych badań i analiz hałasu infradźwiękowego ocenie poddano:

- turbiny o różnej mocy elektrycznej,
- turbiny o różnym czasie eksploatacji,
- turbiny o różnej budowie (synchroniczne i asynchroniczne),
- wpływ prędkości wiatru, warunków meteorologicznych i wielkości mocy elektrycznej oddawanej do systemu elektroenergetycznego na emisję infradźwięków.

W konsekwencji umożliwiło to w ramach przeprowadzonych badań określenie wpływu:

- prędkości wiatru na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków,
- parametrów meteorologicznych na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków,
- wielkości mocy elektrycznej oddawanej do systemu elektroenergetycznego na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków.

### **3 Charakterystyka sygnałów infradźwiękowych**

#### **3.1 Zjawisko generacji i cechy sygnałów infradźwiękowych**

Sygnały infradźwiękowe to fale dźwiękowe (akustyczne), które powstają w wyniku drgań mechanicznych cząsteczek w ośrodku sprężystym (gaz, ciecz, ciało stałe). Z fizycznego punktu widzenia infradźwięki („fale poddźwiękowe”) są to fale akustyczne, których pasmo częstotliwości znajduje się poniżej progu słyszenia ludzkiego ucha. Należy jednak zauważyć, że przy dostatecznie wysokich poziomach ciśnienia akustycznego infradźwięki mogą być odbierane zarówno przez ucho, jak również przez układ przedsionkowy. Tak naprawdę ludzka zdolność słyszenia nie zatrzymuje się przy poziomie 20 Hz, tracąc jednak odczuwanie wysokości dźwięków, ponadto czułość ta obniża się wraz ze spadkiem częstotliwości. Zakres częstotliwości infradźwiękowych obejmuje, według różnych źródeł, przedział od 0,1 do 20 Hz i zawiera także niskie częstotliwości słyszalne. [1]

Sposób opisu zjawisk generacji i propagacji sygnałów infradźwiękowych jest analogiczny jak dla sygnałów słyszalnych, czy ultradźwiękowych. Hałasem infradźwiękowym przyjęto nazywać hałas, w którego widmie występują składowe o częstotliwościach od 2 do 20 Hz (poniżej zakresu percypowanego słuchowo przez człowieka w klasycznym rozumieniu). Zakres ten wynika z historii badań nad wrażliwością narządu słuchu i wynika głównie z ich

niesłyszalności. Wraz z rozwojem technologicznym i doskonaleniem narzędzi pomiarowych oraz zastosowaniem nowoczesnych metod przetwarzania i analizy sygnałów kwestia definicji zakresów częstotliwościowych infradźwięków została szczegółowo opisana w ramach obowiązujących norm. Według norm: ISO 7196:1995, ISO 9612:1997 i PN-Z-01338:2010 jest to przedział od 1 do 20 Hz.

Oprócz hałasu infradźwiękowego często w literaturze przedmiotu spotyka się pojęcie hałasu niskoczęstotliwościowego, którego pasmo częstotliwości poszerzone jest o dolny zakres częstotliwości słyszalnych. Dla potrzeb analiz technicznych hałasu niskoczęstotliwościowego przyjmuje się zakres od 10 Hz do 200 Hz [7], natomiast zgodnie z normą PN EN 61400-11 jest to odpowiednio przedział od 20 Hz do 100 Hz. Należy przy tym mieć na uwadze, że zakresy infradźwiękowy i niskoczęstotliwościowy często w sposób płynny się przenikają (nakładając się na siebie), co w konsekwencji wymaga analizy sygnałów infradźwiękowych z uwzględnieniem wpływu wyższych częstotliwości, z zakresu niskoczęstotliwościowego.

Źródła infradźwięków można podzielić na dwie podstawowe grupy tj.: naturalne i sztuczne [1]. Przy czym należy podkreślić, że infradźwięki są naturalnym zjawiskiem, które powszechnie występuje w przyrodzie, w obszarach zurbanizowanych, a także w otoczeniu przemysłowym. Zestawienie porównawcze wielkości i zakresu częstotliwości sygnałów infradźwiękowych generowanych przez naturalne źródła przedstawiono w tabeli 3.1. Zakres wielkości i częstotliwości sygnałów infradźwiękowych generowanych dla wybranych antropogenicznych sztucznych źródeł zostały przedstawione w tabeli 3.2.

**Tabela 3.1** Zestawienie porównawcze wybranych naturalnych źródeł infradźwięków z odpowiadającym im poziomem ciśnienia akustycznego i przybliżonym zakresem częstotliwości [8, 9]

| Źródła naturalne                         | Zakres częstotliwości [Hz] | Poziom ciśnienia akustycznego [dB] |
|------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Erupcja wulkanu w odległości 1000 km     | <0,1                       | 117                                |
| Tornado z odległości 30÷800 km           | 0,02÷10                    | 67÷84                              |
| Lawina śnieżna w odległości 100 km       | 0,05÷2                     | 60÷68                              |
| Wiatr z prędkością 100 km/h oraz 25 km/h | <1                         | 135 (100 km/h)<br>110 (25 km/h)    |
| Wodospady                                | 0,5÷20                     | 95÷100                             |
| Uderzenie pioruna                        | 1÷10                       | 90÷100                             |

**Tabela 3.2** Zestawienie porównawcze wybranych sztucznych źródeł infradźwięków z odpowiadającym im poziomem ciśnienia akustycznego i przybliżonym zakresem częstotliwości [10, 11]

| Źródła antropogeniczne                              | Zakres częstotliwości [Hz] | Poziom ciśnienia akustycznego [dB]                      |
|-----------------------------------------------------|----------------------------|---------------------------------------------------------|
| Start rakiety w miejscu startu i w odległości 40 km | 1÷20                       | 188 (miejsce startu)<br>77÷95 (40 km od miejsca startu) |
| Kabina kierowcy ciężarówki lub autobusu             | 10÷20                      | 97÷115 (ważonych krzywą G)                              |

|                                                                 |        |         |
|-----------------------------------------------------------------|--------|---------|
| Wybuchy materiałów wybuchowych                                  | 1÷20   | 120÷160 |
| Odrzutowe silniki lotnicze                                      | 4÷31,5 | 85÷120  |
| Młoty kuźnicze                                                  | <5     | 91÷105  |
| Na stanowiskach pracy w elektrowniach konwencjonalnych parowych | 2÷8    | 90÷105  |
| Wentylatory, dmuchawy i ssawy                                   | 5÷63   | 90÷108  |
| Helikoptery                                                     | 1÷20   | 115     |

### 3.2 Infradźwięki emitowane pracą turbin wiatrowych

Hałas infradźwiękowy emitowany pracą turbin wiatrowych stanowi tylko jedną ze składowych, jakie występują w widmie generowanych sygnałów akustycznych. Pracy współczesnych turbin wiatrowych dużej mocy towarzyszy emisja czterech podstawowych rodzajów dźwięku, tj.:

- **tonalne:** dźwięki w postaci pojedynczych częstotliwości, generowane głównie przez elementy mechaniczne i efekty aerodynamiczne występujące na tępych krawędziach spływu łopat rotora;
- **szerokopasmowe:** dźwięki w postaci szumu o częstotliwości wyższej niż 100 Hz, powstałe głównie w wyniku oddziaływania łopat rotora z turbulencjami powietrza (tzw. „swishing” i „whooshing”);
- **niskoczęstotliwościowe:** dźwięki z zakresu od 20 do 100 Hz i niższe, powstające głównie w wyniku natrafienia przez łopaty wirnika na brak płynności w przepływie powietrza (tzw. „wdech”, „pompowanie”, „dudnienie”);
- **impulsowe:** dźwięki w postaci krótkich impulsów zmiennych w czasie, powodowane głównie niejednorodnością w atmosferze i różnicą dróg pokonywanych przez falę akustyczną [12].

Źródła hałasu o powyższych składowych można podzielić na dwa podstawowe typy związane bezpośrednio z:

- pracą elementów mechanicznych,
- efektami aerodynamicznymi towarzyszącymi cięciu powietrza przez łopaty wirnika.

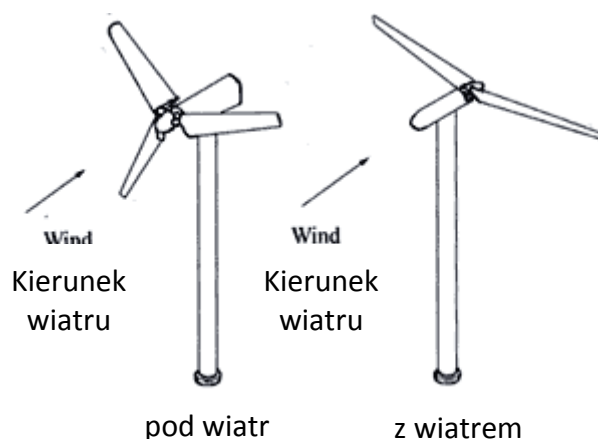
Szczegółowy opis zjawiska generacji dźwięku przez oba wyżej wymienione typy źródeł można znaleźć m.in. w książce Wagnera [12].

#### 3.2.1 Hałas infradźwiękowy

Dla potrzeb analizy zjawiska generacji sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbiny wiatrowe istotne jest rozróżnienie dwóch typów konstrukcji, przedstawionych na Rys. 3.1:

- pod wiatr (ang. upwind): większość współcześnie stosowanych, w których wirnik znajduje się przed wieżą i pierwszy przyjmuje podmuchy wiatru;
- z wiatrem (ang. downwind): pierwsze konstrukcje coraz rzadziej stosowane, w których wirnik znajduje się za wieżą i otrzymuje wiatr po przejściu przez wieżę.

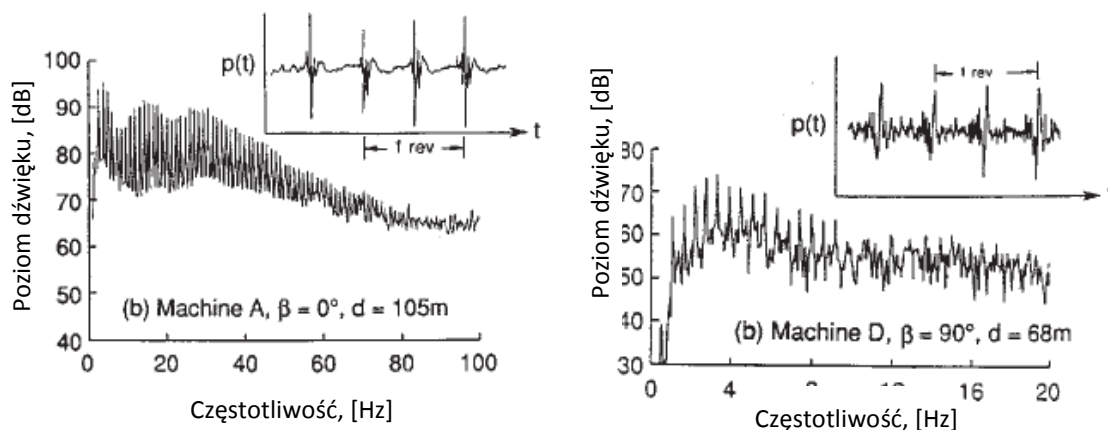




**Rys. 3.1** Rodzaje konstrukcji turbin wiatrowych [13].

Miejszem powstawiania infradźwięków w turbinach wiatrowych są głównie obciążenia aerodynamiczne powstające na łopatach wirnika. W turbinach typu downwind powstają one głównie w momencie przejścia łopaty przez ślad torowy za wieżą turbiny wiatrowej. Natomiast w turbinach typu upwind infradźwięki powstają również w miejscu przejścia łopaty w rejonie wieży ale głównie w wyniku powstawania w tym rejonie gradientu ciśnienia, które napotyka przeszkodę w postaci wieży.

Konstrukcje typu downwind charakteryzują się większą emisją hałasu infradźwiękowego od turbin typu upwind. Wynika to głównie z innego rozkładu ciśnienia na łopatach wirnika w obu typach konstrukcji [14]. Przykładowe przebiegi widm hałasu przedstawiono w celach porównawczych dla obu typów instalacji na Rys. 3.2.



**Rys. 3.2** Przykład widm hałasu turbiny wiatrowej MOD-1 typu downwind (lewy rysunek) i MOD-5B typu upwind (prawy rysunek) [15].

### 3.3 Przegląd przepisów prawnych dotyczących oceny szkodliwości hałasu infradźwiękowego

W Polsce kwestie hałasu infradźwiękowego występującego w środowisku ogólnie dostępnym nie podlegają regulacjom prawnym. Problem hałasu infradźwiękowego regulowany jest jedynie w środowisku pracy, w którym mierzone ekspozycje mogą

przekraczać poziomy percepcji słuchowej. Do 2009 roku zagadnienia dotyczące problemu hałasu infradźwiękowego regulowało Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia (Dz. U. 2002 nr 217 poz. 1833) [16], które zostało uchylone (Dz.U. 2009 nr 105 poz. 873 [17]). Usunięcie hałasu infradźwiękowego z rozporządzenia wynikała z odniesienia się w nim do wartości opisujących próg percepcji słuchowej, a nie szkodliwości [18]. W chwili obecnej podstawą do monitorowania i oceny narażenia na hałas infradźwiękowy na stanowiskach pracy i oceny ryzyka zawodowego związanego z tym czynnikiem jest Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 26 września 1997 r. w sprawie ogólnych przepisów bezpieczeństwa i higieny pracy (tekst jednolity Dz.U. 2003 r., nr 169, poz. 1650 ze zm.) oraz normy PN-Z-01338, PN-ISO 9612 i PN-ISO 7196 [18]. Główne wymagania, w postaci wartości odniesienia do oceny ryzyka oddziaływania hałasu infradźwiękowego na organizm człowieka, przedstawione są w znowelizowanej normie PN-Z-01338:2010

Wielkości wartości dopuszczalnych określonych w normie PN-Z-01338 przedstawione zostały w tabeli 3.3. Prezentowane w normie wartości zostały przyjęte z uwzględnieniem obecnego stanu wiedzy na temat skutków oddziaływania infradźwięków na organizm człowieka.

**Tabela 3.3** Wartości dopuszczalne hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy stanowiące kryterium uciążliwości wg PN-Z-01338 [19]

| Oceniana wielkość                                                                                                                                                                                               | Wartość dopuszczalna [dBG] |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|
| Równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy lub tygodnia pracy                                                               | <b>102</b>                 |
| Równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G w czasie pobytu pracownika na stanowisku do wykonywania prac koncepcyjnych wymagających szczególnej koncentracji uwagi | <b>86</b>                  |

W normie zrezygnowano z określenia wartości maksymalnych i szczytowych obowiązujących w rozporządzeniu [20].

Jak już wspomniano w Polsce brak jest przepisów regulujących problem oddziaływania i uciążliwości hałasu infradźwiękowego w środowisku ogólnodostępnym. Istnieją jedynie zalecenia i kryteria sformułowane w pracy Mirowskiej [21], oparte na progach słyszenia. Zgodnie z tymi zaleceniami hałas infradźwiękowy w środowisku nie powinien przekraczać progów słyszenia. Dopuszczalne poziomy infradźwięków w środowisku obowiązujące w wybranych krajach UE szeroko zostały opisane w pracy [21]. W przypadku innych krajów część posiada zalecenia przygotowane przez naukowców, a niektóre posiadają przepisy regulujące kwestię hałasu infradźwiękowego w środowisku (np. Dania). Obowiązujące w tym zakresie unormowania prawne znajdują się m. in. w pracy [22].

## **4 Dobór układu do pomiaru i analizy infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe**

### **4.1 Metodyka wykonywania pomiarów i wyboru punktów referencyjnych**

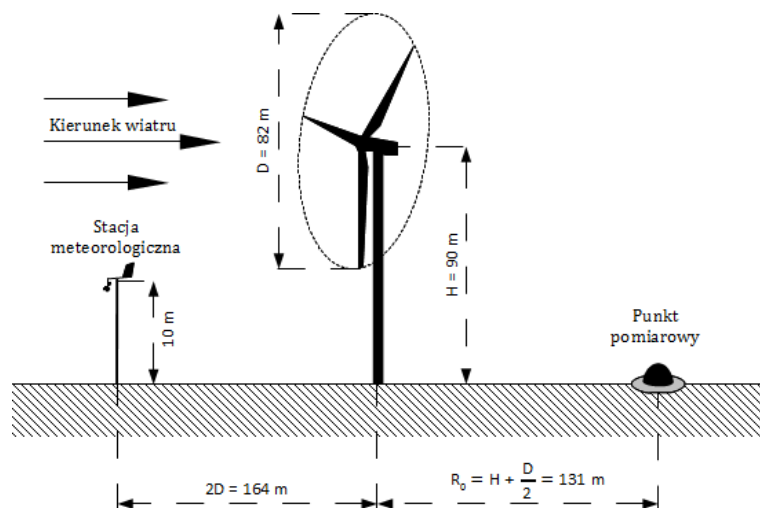
Wybór metodyki rejestracji, analizy i oceny oraz odpowiedni dobór punktów pomiarowych warunkuje jakość otrzymanych wyników oraz możliwość odtworzenia i w konsekwencji zweryfikowania pomiarów przez inne zainteresowane osoby. W przypadku infradźwięków dobór metodyki odgrywa szczególnie duże znaczenie. Z powodu występowania dużej liczby źródeł naturalnych i sztucznych różnego pochodzenia oraz słabego ich tłumienia podczas propagacji, konieczne jest dobranie metodyki, która umożliwi wykrycie infradźwięków generowanych pracą turbiny przy jednoczesnym ograniczeniu wpływu innych źródeł (głównie podmuchów wiatru oraz źródeł komunikacyjnych). Zasadnym wydaje się konieczność zbliżenia się możliwie jak najbliżej źródła sygnałów, w celu zbadania fali bezpośredniej o odpowiednio dużym odstępie mierzonych wartości badanego sygnału od poziomu tła akustycznego. Natomiast w celu wyeliminowania odbić i ograniczenia wpływu podmuchów wiatru racjonalnym wydaje się umieszczenie mikrofonu bezpośrednio na powierzchni ziemi oraz zastosowanie odpowiednich osłon przeciwwietrznych. Przy dokonywaniu oceny istotnym zagadnieniem jest konieczność właściwego uwzględnienia występujących podczas pomiarów warunków meteorologicznych oraz parametrów pracy turbiny wiatrowej.

Prezentowane założenia zostały zawarte w normie PN-EN 61400-11, która stosowana jest do oceny hałasu od turbin wiatrowych w zakresie słyszalnym. Norma ta pozwala w sposób powtarzalny określić poziom mocy akustycznej turbin wiatrowych dla różnych prędkości wiatru na podstawie zarejestrowanych zmian poziomu ciśnienia akustycznego (w praktyce głównie w zakresie od 5 do 10 m/s). Zgodnie z normą pomiary wykonuje się na powierzchni gruntu, umieszczając mikrofon za turbiną, na powierzchni odbijającej o średnicy jednego metra, w odległości uzależnionej od wysokości wieży i średnicy rotora. Dodatkowo, dla ograniczenia wpływu wiejącego wiatru, na mikrofonie umieszcza się dwie osłony przeciwwietrzne. Jednocześnie w celu monitorowania warunków meteorologicznych norma nakazuje mierzenie ich przed turbiną na wysokości 10 metrów. Na Rys. 4.1 przedstawiono sposób wykonywania pomiarów zgodnie z zaleceniami sformułowanymi w powyższej normie. Wykonanie pomiarów zgodnie z normą umożliwia wyznaczenie poziomu mocy akustycznej w zakresie częstotliwości słyszalnych (od 50 Hz do 10 000 Hz) z uwzględnieniem tonalności i kierunkowości (opcjonalnie). Norma w sposób szczegółowy definiuje wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, procedur pomiarowych, sposobów analizy uzyskanych wyników, oceny niepewności otrzymanych rezultatów oraz rejestrowanych danych. Należy podkreślić, że norma dopuszcza także rozszerzenie zakresu badań o infradźwięki (Annex A.2) ale nie definiuje dokładnie sposobu ich pomiaru.

Opisaną w normie metodykę pomiaru i analizy sygnału zastosowano w badaniach przeprowadzonych w celu oceny poziomu infradźwięków emitowanych przez turbiny wiatrowe dużych mocy. Przy rozmieszczeniu przyrządów pomiarowych zgodnie z zapisami normy, możliwa jest jednoznaczna ocena wielkości emitowanych infradźwięków. Wykonanie pomiarów zgodnie z założeniami normy pozwala zminimalizować wpływ wiatru, odbić oraz innych źródeł, stanowiących główne czynniki mogące zakłócać rejestracje. Równocześnie z pomiarem poziomu ciśnienia akustycznego prowadzono, zgodnie z założeniami norm [4, 5], pomiary prędkości i kierunku wiatru, a także innych podstawowych parametrów

meteorologicznych. Dodatkowo, w przypadku dostępu do sterownika turbiny, rejestrowano także parametry elektryczne pracy turbiny.

Wykonanie pomiarów zgodnie z normą wymaga rejestracji dźwięku przy różnych prędkościach wiatru. Ponieważ warunki meteorologiczne podczas pomiarów mają charakter stochastyczny, otrzymanie wyników dla pełnego spektrum wymaga konieczności przeprowadzenia wielogodzinnych rejestracji.



**Rys. 4.1** Usytuowanie mikrofonu i stacji meteorologicznej względem badanej turbiny wiatrowej zgodnie z normą PN-EN 61400-11.

## 4.2 Opis zastosowanej aparatury pomiarowej

Mierzoną wielkością fizyczną były zmiany poziomu ciśnienia akustycznego. Do ich rejestracji zastosowano mikrofony pojemnościowe podłączone do cyfrowego miernika sygnału z funkcją rejestracji.

Przy cyfrowej analizie sygnałów najistotniejszą częścią toru jest część analogowa. Wszelkie zakłócenia wprowadzone w części analogowej toru, po przekształceniu ich na postać cyfrową są źródłem błędnych wyników i w konsekwencji mogą prowadzić do ich niewłaściwej interpretacji.

W ramach prac związanych z realizacją rozprawy doktorskiej w Instytucie Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej zostało utworzone laboratorium diagnostyki infradźwięków. Zakup sprzętu do laboratorium był współfinansowany przez Unię Europejską, w ramach projektu *Rozwój badań naukowych, prac rozwojowych i innowacyjności na rzecz przedsiębiorstw w idei zrównoważonego rozwoju przez utworzenie nowoczesnego laboratorium diagnostyki infradźwięków na Politechnice Opolskiej* (RPOP.01.03.01-16-018/10-00). W skład zakupionej aparatury pomiarowej, która spełnia wymagania określone w tabeli 4.1, wchodzi następujące elementy:

- mikrofon typ 4190 z przedwzmacniaczem typ 2669L firmy Brüel&Kjær,
- miernik LAN-XI typ 3050-A-60 firmy Brüel&Kjær,
- stacja meteorologiczna typ Vantage Pro 2 firmy Davis,
- kalibrator akustyczny typ 4231 firmy Brüel&Kjær.

Dodatkowo do pomiarów użyto ochron przeciwwietrznych oraz okrągłej odbijającej powierzchni pomiarowej o średnicy  $1 \text{ m}$ , które stanowiły zestaw UA-2133 firmy Brüel&Kjær

zaprojektowany i wykonany do pomiarów hałasu turbin wiatrowych, zgodnie z normą PN-EN 61400-11.

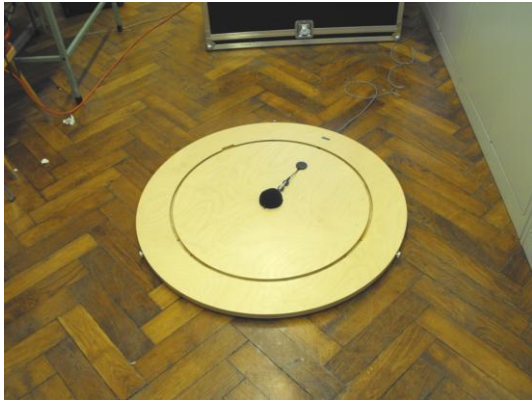
Widok zastosowanej aparatury pomiarowej przedstawiono na Rys. 4.2 ÷ 4.5.

Zastosowany mikrofon został zaprojektowany do bardzo dokładnych pomiarów w polu swobodnym. Jego dolna częstotliwość graniczna wynosi 1,2 Hz, a charakterystyka przenoszenia jest liniowa w zakresie  $\pm 3$  dB od 1,2 Hz do 20 kHz. Mikrofon ten charakteryzuje się dużą czułością rzędu 50 mV/Pa oraz zakresem dynamik od 15 do 148 dB. Wszystkie te parametry są zgodne z założonymi wymaganiami, szerzej opisanymi w Rozprawie.

Miernik LAN-XI typ 3050-A-060 należy do typoszeregu przyrządów PULSE firmy B&K. Jest to profesjonalne narzędzie wykorzystywane do pomiarów ciśnienia akustycznego, natężenia dźwięku, a także drgań. Jego możliwości implementacyjne są bardzo szerokie począwszy od typowych badań akustycznych, takich jak: pomiary hałasu, wyznaczanie poziomu mocy akustycznej, wykonywanie map hałasu przy użyciu techniki beamformingu, badanie właściwości akustycznych materiałów i wyznaczanie parametrów akustycznych pomieszczeń, a skończywszy na specjalistycznych badaniach akustycznych, do których można zaliczyć: diagnostykę maszyn, analizę modalną oraz badania elektroakustyczne przetworników akustycznych. Do obsługi zastosowanego miernika zastosowano komputer wraz z dedykowanym oprogramowaniem, który połączono z systemem pomiarowym kablem LAN. Wszystkie parametry pracy definiuje się przy pomocy aplikacji PULSE LabShop, która stanowi integralną część zestawu pomiarowego. Oprogramowanie to, oprócz możliwości dokładnego skonfigurowania przyrządu, umożliwia rejestrację mierzonych sygnałów oraz ich przetwarzanie w trybie offline.

Warunki meteorologiczne mierzono za pomocą stacji pogodowej DAVIS Instrument – Vantage Pro2. Wyposażona jest ona w zespół zintegrowanych czujników, a transmisja rejestrowanych danych do komputera odbywa się bezprzewodowo na drodze radiowej. Zakres pomiarowy elektronicznego termometru był w przedziale od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+65^{\circ}\text{C}$ , przy dokładności równej  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ . Pomiar wartości ciśnienia atmosferycznego wykonywany był z dokładnością  $\pm 1$  hPa w zakresie (810-1080) hPa. Pomiary wilgotności przeprowadzono za pomocą zewnętrznego czujnika wilgotności względnej powietrza, umożliwiającego rejestrację w zakresie od 0 do 100 %, z dokładnością 3 %. Zastosowany anemometr umożliwiał pomiar prędkości przepływu powietrza w zakresie (0 ÷ 68) m/s, z dokładnością  $\pm 0,2$  m/s. Wykorzystana stacja meteorologiczna oprócz, odczytu bieżących parametrów, umożliwia rejestrację mierzonych warunków w celu ich dalszej obróbki statystycznej.

W celu sprawdzenia toru pomiarowego, przed i po każdym z pomiarów, przeprowadzana była kalibracja toru przy pomocy kalibratora akustycznego typ 4231 firmy Brüel&Kjær. Kalibrator ten jest sprzętem 1 klasy dokładności, który spełnia wymagania norm EN/IEC 60942 (2003) Class LS and Class 1 oraz ANSI S1.40 – 1984. Sygnałem testowym jest częstotliwość 1 kHz o poziomie 94 dB lub 114 dB. Stabilność generowanego poziomu dźwięku wynosi  $\pm 0,2$  dB. Natomiast stabilność generowanej częstotliwości wynosi  $\pm 0,1\%$ , przy zniekształceniach mniejszych od 1 %.



**Rys. 4.2** Mikrofon umieszczony na odbijającej powierzchni pomiarowej z osłoną przeciwwietrzną.



**Rys. 4.3** Widok dodatkowej osłony przeciwwietrzna.



**Rys. 4.4** Miernik typ 3050-A-060.



**Rys. 4.5** Stacja meteorologiczna typu Vantage Pro 2.

### 4.3 Metody przetwarzania i analizy zarejestrowanych infradźwięków

Rejestrację sygnałów infradźwiękowych emitowanych przez badane turbin wiatrowe prowadzono w sposób ciągły w czasie od kilkudziesięciu minut do kilku godzin. Czas rejestracji zależny był od zmienności warunków meteorologicznych oraz możliwości zasilania komputera przenośnego oraz aparatury ze źródeł bateryjnych. Przy stałej wartości prędkości wiatru pomiary wykonywano dla przedziału czasu nie przekraczającego 60 min.

Pierwszym etapem przetwarzania rejestrowanych sygnałów było wykorzystanie narzędzi wchodzących w skład oprogramowania do analizy sygnałów akustycznych PULSE LabShop ver. 15.1.0. Program współpracuje z użytym miernikiem, stanowiąc w pełni programowalne środowisko, umożliwiające dowolnie konfigurowanie miernika dźwięku i drgań. Do analiz wykorzystano następujące aplikacje: Overall Analyzers, CPB Analyzers, FFT Analyzers.

Kolejnym etapem analiz było odniesienie danych akustycznych do danych warunków meteorologicznych oraz parametrów pracy turbiny. W tym celu wykorzystano arkusz kalkulacyjny Excel dodając kolumny z zarejestrowanymi danymi nieakustycznymi. Elementem synchronizującym był czas rejestrowany dla każdej z mierzonych wartości.

W kolejnym kroku przetwarzania i analizy zarejestrowanych sygnałów otrzymane macierze danych zaimportowano do środowiska Matlab. W środowisku tym stworzono skrypty sortujące dane według zadanych parametrów takich jak: zmiany prędkości wiatru, wielkości oddawanej mocy elektrycznej, czy liczby obrotów wirnika.

Do prezentacji otrzymanych wyników wykorzystano trzy wymienione wyżej programy. Za pomocą programów LabShop oraz Matlab obliczano spektrogramy STFT prezentujące zmiany poziomu ciśnienia w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej. Natomiast w Excelu wyznaczano wykresy prezentujące widma częstotliwościowe badanych sygnałów, a także zobrazowano przebiegi czasowe rejestrowanych sygnałów oraz zestawiano graficznie mierzone wielkości.

Dla zarejestrowanych sygnałów wyznaczono wartości podstawowych parametrów takich jak: częstotliwości medianowe widma, wartość średnia sygnału dla poszczególnych częstotliwości. Analizowano także rozkłady zmian poziom dźwięku dla wyznaczonych częstotliwości rezonansowych.

Większość przeprowadzonych analiz dotyczyła sygnałów nieważonych, tzn. uzyskanych przy zastosowaniu płaskiego liniowego filtra częstotliwościowego. Dodatkowo dla wybranych przebiegów zastosowano krzywe ważenia: A, C i G, które szerzej zostały opisane w następnym rozdziale. Ważenie krzywymi w każdym z zastosowanych programów realizowane było jako suma zarejestrowanego sygnału z daną krzywą ważenia częstotliwościowego.

#### **4.4 Zastosowanie filtrów wagowych do korekcji częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów**

Wielkość poziomu ciśnienia akustycznego mierzona wprost nie odzwierciedla poziomu głośności odbieranego przez narząd słuchu człowieka. Organizm ludzki nie odbiera dźwięków w sposób liniowy, tzn. dla różnych częstotliwości musi zadziałać bodziec o różnym poziomie ciśnienia akustycznego aby wywołać to samo wrażenie głośności. Do opisu tego zjawiska stworzona została jednostka Fon, opisująca poziom głośności dźwięku dla różnych częstotliwości. Jednostka ta opiera się o krzywe jednakowej głośności określone przez Fletchera i Munsona i zawarte w normie ISO 226. Poziom głośności dowolnego dźwięku w fonach jest liczbowo równy poziomowi natężenia (wyrażonego w decybelach) tonu o częstotliwości 1 kHz, którego głośność jest równa głośności tego dźwięku. Dźwięki o tej samej liczbie fonów wywołują to samo wrażenie głośności [23].

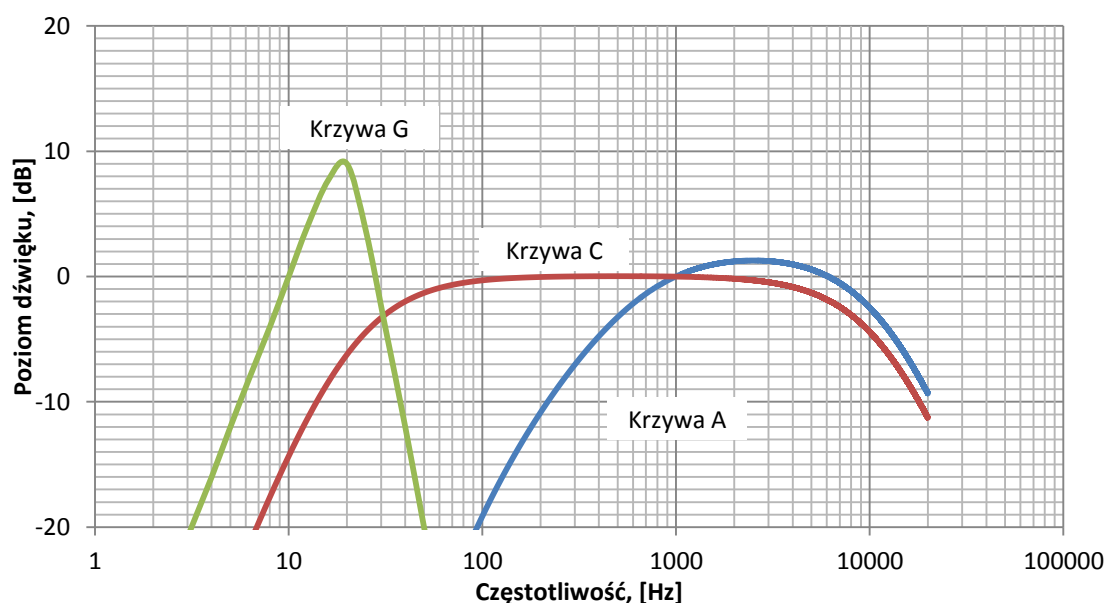
W celu wykonania oceny hałasu o różnym poziomie głośności wprowadzone zostały krzywe ważenia dźwięku. Najpopularniejszą jest krzywa ważenia A, która powstała z odwrócenia krzywej głośności 40 fon. Przebieg tej krzywej zdefiniowany został w normie IEC 61672:2003. Krzywa ta znacząco tłumi składowe nisko- i wysokoczęstotliwościowe, skupiając się jedynie na tych, które ucho ludzkie odbiera najlepiej. Do pomiaru hałasu o większych poziomach, spotykanego głównie na stanowiskach pracy, wykorzystywana jest krzywa ważenia C, powstała z odwrócenia krzywej głośności 100 fon.

W celu określenia poziomu dźwięku ważonego daną krzywą należy do zmierzonych nieważonych wartości dodać poziomy określone daną krzywą. Obie krzywe odnoszą się do hałasu w paśmie słyszalnym. Oprócz wymienionych wag stosowane są także inne charakterystyki jednakże ich użycie uzasadnione jest tylko w specyficznych sytuacjach, jak

krzywa D stosowana do oceny hałasu lotniczego [24], czy B stosowana do oceny zestawów audio [25]. **Błąd! Nie zdefiniowano zakładki.**

W celu przeprowadzenia oceny hałasu w zakresie infradźwiękowym, znajdującym się w paśmie częstotliwości poniżej percepcji słuchowej, utworzona została krzywa ważenia G, która opisuje odbiór infradźwięków przez organizm człowieka. Kształt krzywej G określony jest w normie ISO 7196 [26].

Zestawienie porównawcze przebiegów krzywych ważenia A, C oraz G przedstawiono na Rys. 4.7.



**Rys. 4.6** Charakterystyki częstotliwościowe krzywych ważenia A, C i G [opracowanie własne].

W akustyce wprowadzono także krzywą Z (zero), która opisuje liniową, płaską charakterystykę, czyli wynik bez ważenia.

W celu oceny uciążliwości hałasu badanego daną krzywą konieczne, jest odniesienie uzyskanych wyników do wartości progowych, które opisują uciążliwość. Poziom dźwięku ważony krzywymi jest bardziej parametrem fizjologicznym, opisującym wrażenia słuchowe człowieka, niż fizycznym, opisującym naturę źródła dźwięku.

#### 4.5 Wybór deskryptorów charakteryzujących zarejestrowane sygnały infradźwiękowe

Do oceny hałasu infradźwiękowego emitowanego podczas pracy turbin wiatrowych dużych mocy zastosowano poziom ciśnienia akustycznego bez ważenia krzywymi. W celu dokładnej analizy zasadne jest prezentowanie otrzymanych wyników w funkcji częstotliwości, tak aby możliwe było przeprowadzenie dokładnej oceny zarejestrowanych sygnałów. Dodatkowo w celu określenia uciążliwości dla człowieka badanych sygnałów oraz wskazania różnic w rejestrowanych zależnościach konieczne było przedstawienie wyników uzyskanych po zważeniu odpowiednimi krzywymi ważenia.



Uzyskane wyniki przedstawiano w postaci:

- równoważnego poziom dźwięku,
- charakterystyki częstotliwościowej rozkładu poziomu dźwięku w pasmach oktaowych,
- charakterystyki częstotliwościowej rozkładu poziomu dźwięku w pasmach tercjowych,
- widma amplitudowego obliczonego przy zastosowaniu przekształcenia FFT,
- spektrogramów czasowo-częstotliwościowych otrzymanych w wyniku przekształcenia STFT,

W celu przeprowadzenia oceny uciążliwości zmierzonych wartości poziomu ciśnienia akustycznego, uzyskane wyniki przedstawiano:

- bez ważenia,
- ważne krzywą ważenia A,
- ważne krzywą ważenia C,
- ważne krzywą ważenia G.

Na potrzeby oceny statystycznej badanych sygnałów infradźwiękowych obliczano i analizowano następujące parametry:

- częstotliwości rezonansowe,
- częstotliwości medianowe,
- częstotliwości dla maksymalnej wartości poziomu dźwięku w widmie sygnału,
- wartość maksymalną poziomu ciśnienia akustycznego,
- wartość minimalną poziomu ciśnienia akustycznego,
- wartość średnią poziomu ciśnienia akustycznego.

## **5 Wyniki przeprowadzonych pomiarów i ich analiz**

### **5.1 Parametry techniczne i lokalizacja badanych turbin wiatrowych**

Dla potrzeb przeprowadzenia badań infradźwięków, których celem było potwierdzenie założonej w rozprawie tezy, dokonano wyboru reprezentatywnych turbin wiatrowych, mając na uwadze następujące kryteria szczegółowe:

- wielkość mocy znamionowej (powyżej 1 MW),
- popularność zainstalowanych turbin (udział rozwiązań konstrukcyjnych danego producenta w populacji wszystkich turbin zainstalowanych w Polsce),
- dostęp do danych elektrycznych związanych z wielkością mocy elektrycznej oddawanej przez turbiny do systemu elektroenergetycznego,
- dostępność danych znamionowych badanych turbin (rozmiary geometryczne, typ generatora, czas eksploatacji, wielkość mocy itd.),
- dostępność obszaru wokół turbin w celu wykonania pomiarów,
- możliwość wykonania pomiarów dla turbiny fabrycznie nowej,
- możliwość przeprowadzenia analizy porównawczej wyników uzyskanych dla turbin o tej samej mocy i różnych czasach eksploatacji,
- możliwość wykonania pomiarów bez albo przy minimalnym udziale rozpoznanych dla danej lokalizacji źródeł zakłóceń akustycznych,
- wielkość odległości od miejsca zamieszkania w kontekście możliwości przewidzenia zmian warunków pogodowych,

- możliwość wykonania pomiarów dla turbin z generatorem synchronicznym i asynchronicznym,
- możliwość wykonania pomiarów turbin wiatrowych cechujących się stosunkowo dużą uciążliwością akustyczną.

Mając na uwadze wyżej wymienione obiektywne uwarunkowania pomiary sygnałów infradźwiękowych wykonano w pięciu farmach wiatrowych, w skład których wchodziło w sumie pięćdziesiąt sześć turbin wiatrowych. Położenie badanych elektrowni wiatrowych przedstawiono na rys.5.1.



**Rys. 5.1** Lokalizacja badanych farm wiatrowych (żółte kwadraty).

Parametry techniczne wszystkich badanych turbin zestawiono w tabeli 5.1.

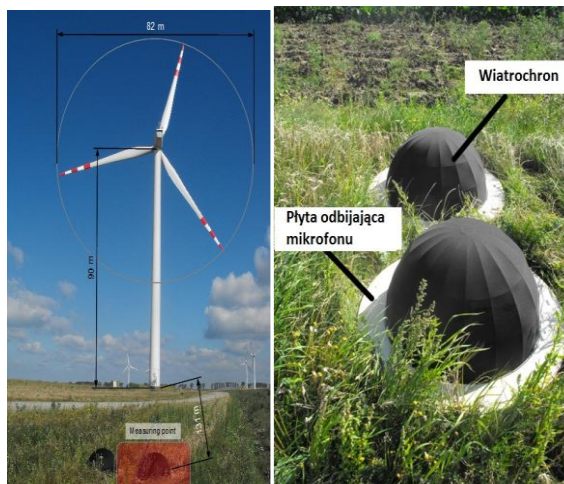
**Tabela 5.1** Parametry techniczne badanych turbin wiatrowych.

| Parametr             | Lokalizacja 1 | Lokalizacja 2  | Lokalizacja 3 | Lokalizacja 4  | Lokalizacja 5  |
|----------------------|---------------|----------------|---------------|----------------|----------------|
| Typ turbiny          | Vensys 62     | REPOWER MM92   | Vensys 64     | REPOWER MM92   | Vestas V112    |
| Moc elektryczna [MW] | 1,2           | 2,05           | 1,2           | 2,05           | 3,0            |
| Wysokość wieży [m]   | 69            | 80             | 85            | 100            | 119            |
| Średnica rotora [m]  | 62            | 92             | 64            | 92             | 112            |
| Rodzaj generatora    | synchroniczny | asynchroniczny | synchroniczny | asynchroniczny | asynchroniczny |
| Czas pracy           | 5 lat         | 1 rok          | 3 lata        | 3 miesiące     | 3 lata         |

Na rys. 5.2 i 5.3 przedstawiono widok stacji meteorologicznej oraz zastosowanej aparatury podczas pomiarów infradźwięków generowanych pracą turbiny wiatrowej dla przykładowej lokalizacji.



**Rys. 5.2** Widok przykładowej lokalizacji stacji meteorologicznej względem badanej turbiny.



**Rys. 5.3** Widok przykładowej lokalizacji miejsca pomiaru infradźwięków względem badanej turbiny wiatrowej.

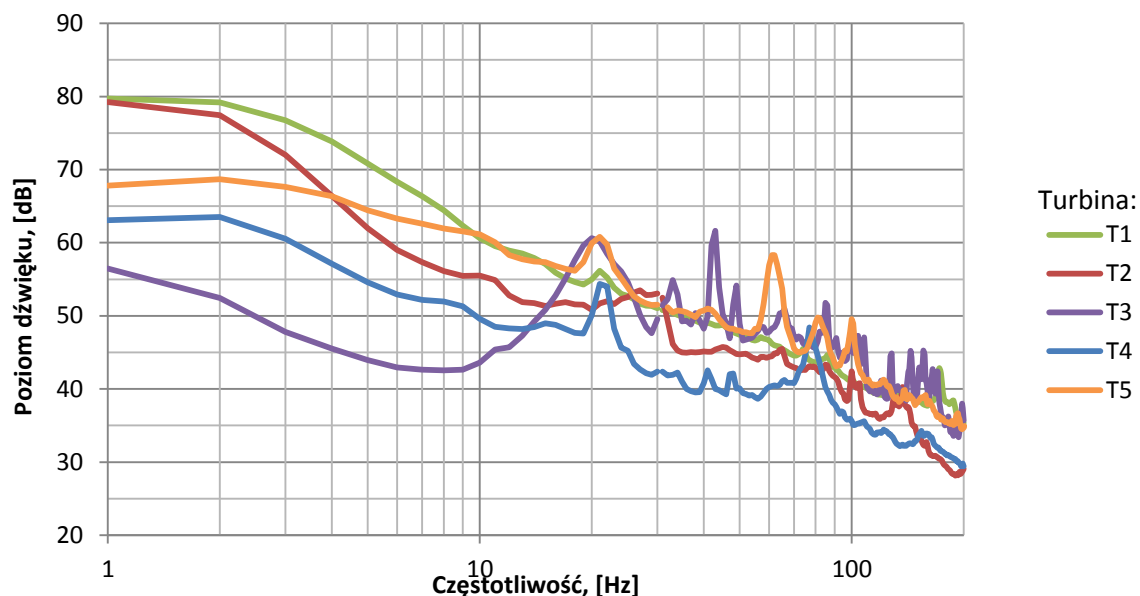
## 5.2 Wyniki analizy częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych

W ramach przeprowadzonych badań przeprowadzono cały szereg analiz i zestawień. Na potrzeby autoreferatu postanowiono przedstawić jedynie wyniki porównania obliczonych widm amplitudowych dla badanych turbin wiatrowych, które pozwalają zobrazować zakres mierzonych wartości oraz określić poziom emitowanych infradźwięków. Dodatkowo zestawiono także równoważne poziomy dźwięku obliczone dla całego pasma analizy (1-200) Hz bez zastosowania krzywych ważenia oraz po ich zastosowaniu. Oprócz prezentowanych wyników analizowano także zmiany poziomu hałasu infradźwiękowego w funkcji: prędkości wiatru, parametrów meteorologicznych, wielkości mocy elektrycznej

oddawanej do systemu elektroenergetycznego, typu generatora (synchroniczny/asynchroniczny) oraz czasu eksploatacji.

### 5.2.1 Zestawienie porównawcze uzyskanych wyników

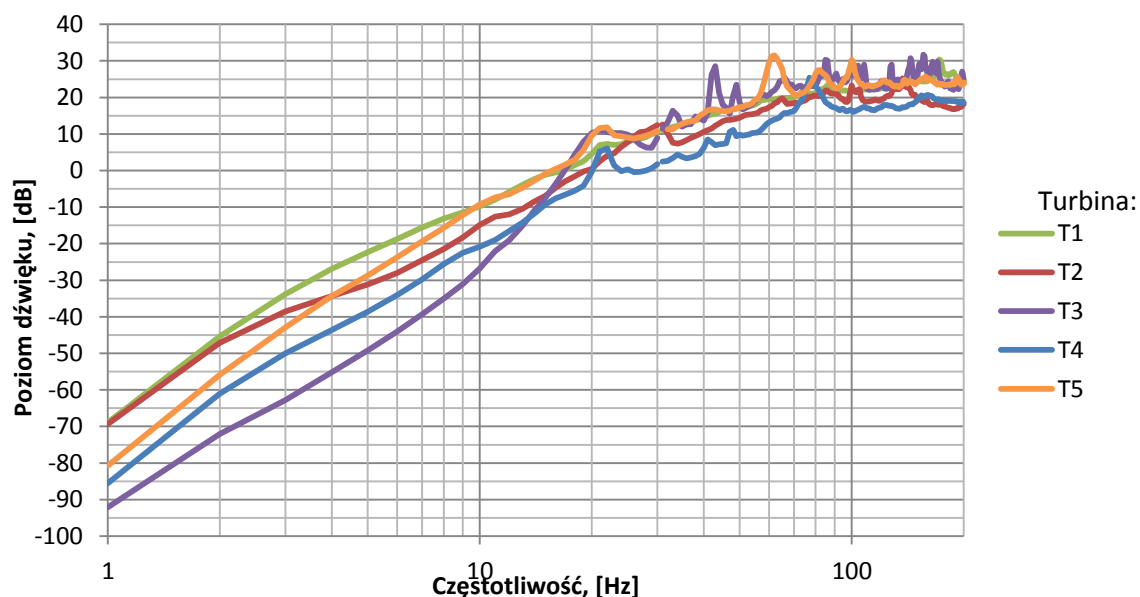
W celu porównania rezultatów otrzymanych dla poszczególnych lokalizacji przedstawiono na jednym rysunku wyznaczone przebiegi widm hałasu infradźwiękowego, które zilustrowano oddzielenie dla poziomu hałasu bez ważenia (Rys. 5.4) oraz po ważeniu kolejno krzywymi: A (Rys. 5.5), C (Rys. 5.6) i G (Rys. 5.7). Numeracja prezentowanych w zestawieniu turbin wiatrowych jest zgodna z numeracją lokalizacji, dla której wykonywano pomiary.



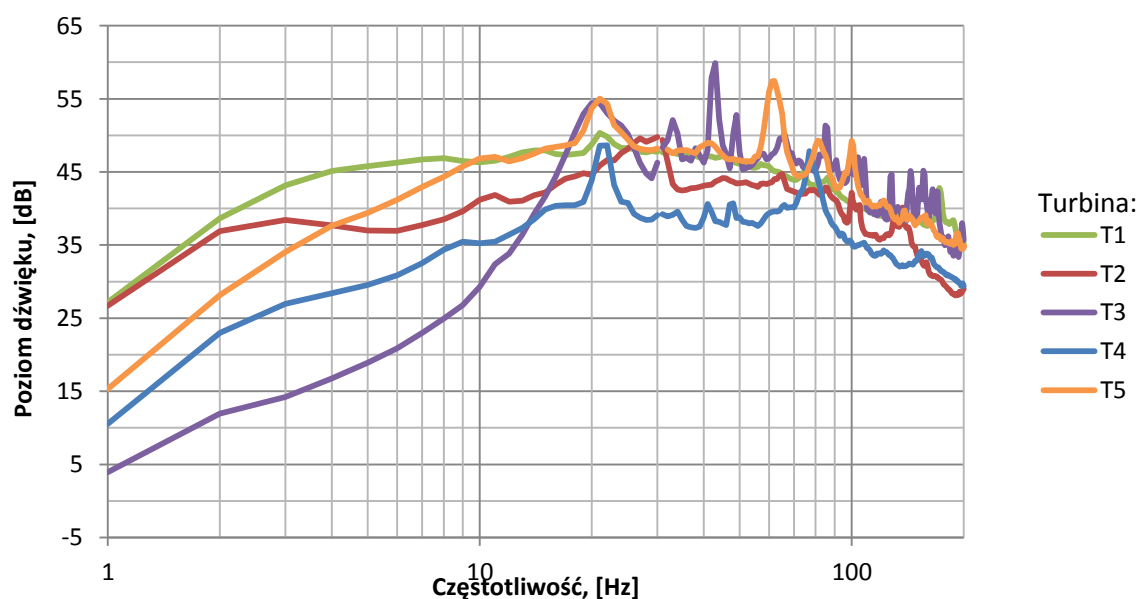
**Rys. 5.4** Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5.

Przedstawione na Rys. 5.4 przebiegi reprezentują rzeczywiste oddziaływanie akustyczne zarejestrowane w punktach pomiarowych i wyrażone w postaci równoważnego poziomu dźwięku obliczonego dla każdej częstotliwości z zakresu od 1 do 200 Hz. Zilustrowane przebiegi nie zostały poddane korekcji żadną z krzywych, co umożliwia ich bezpośrednie i proste porównanie.

Zestawienie porównawcze przebiegów widm częstotliwościowych wyznaczonych dla badanych turbin wiatrowych, które uzyskano w wyniku ważenia krzywą A i C, reprezentujących zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na kolejnych Rys. 5.5 i 5.6.



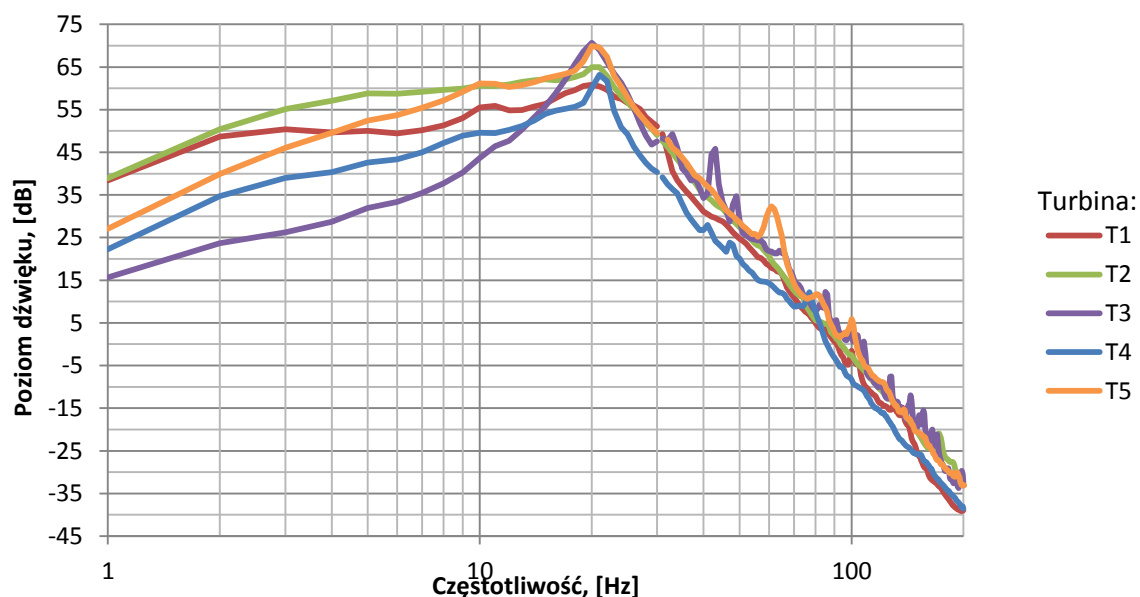
**Rys. 5.5** Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego ważonego krzywą korekcyjną A zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5.



**Rys. 5.6** Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego ważonego krzywą korekcyjną C zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5.

Zastosowanie krzywych ważenia nie wpływa na zmianę przebiegów analizowanych widm. W badanym zakresie częstotliwości obie krzywe ważenia tłumią sygnał. Jedyną różnicą między krzywymi ważenia jest szybkość tego tłumienia.

Zestawienie porównawcze przebiegów widm analizowanych turbin wiatrowych, które otrzymano w wyniku ważenia krzywą G, reprezentujących zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na Rys. 5.7.

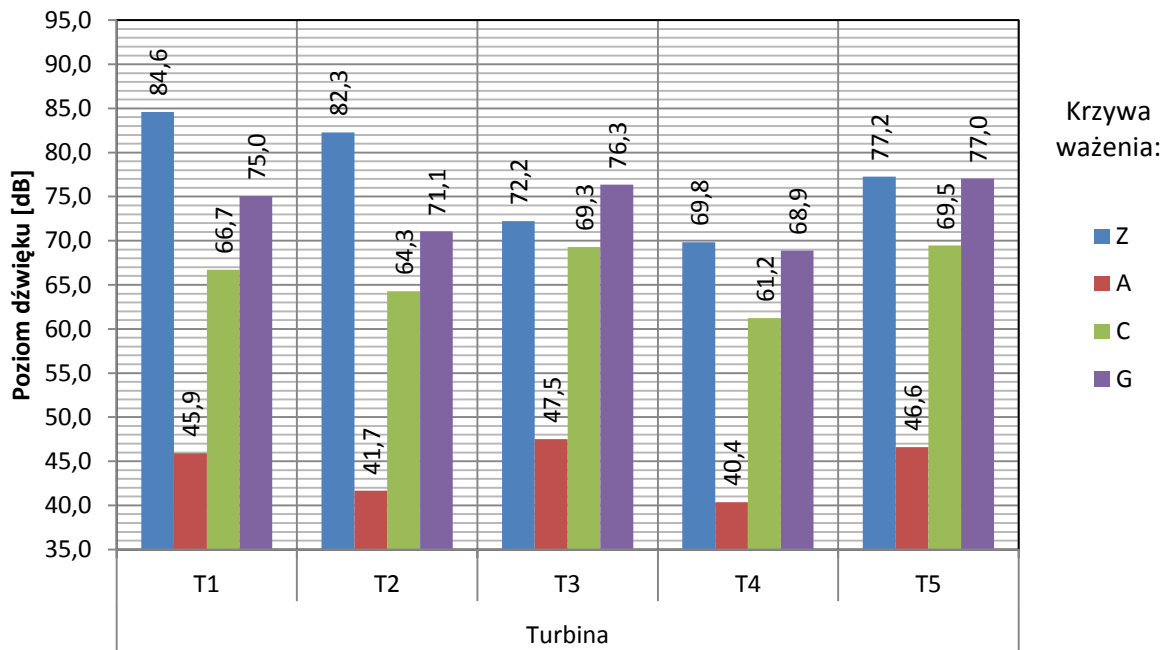


**Rys. 5.7** Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego ważonego krzywą korekcyjną G zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3 i T4.

Zastosowanie krzywej ważenia G również nie zmienia natury uzyskanych przebiegów widm. Zastosowanie krzywej ważenie sprowadza się do nałożenia na oryginalny przebieg filtru o charakterystyce opisanej daną krzywą ważenia. Ich zastosowanie pozwala dokonać obiektywnej oceny wielkość potencjalnego oddziaływania badanego hałasu na organizm człowieka. Użycie krzywej zniekształca jednak obraz widma i nie pozwala przeprowadzić jego dokładnej analizy. Analogicznie jak przy zastosowaniu krzywych ważenia A i C, wszystkie zależności między widmami, które można zauważyć przy porównaniu widm bez ważenia krzywymi, są zachowane.

W celu dokonania analizy porównawczej uzyskanych zależności zestawiano także równoważne poziomy dźwięku obliczone dla całego pasma analizy (1-200) Hz bez zastosowania krzywych ważenia (krzywa Z) oraz po ich zastosowaniu (krzywe A, C i G). Obliczone wartości równoważnego poziomu dźwięku, które wyznaczono oddzielnie dla analizowanych turbin wiatrowych przedstawiono na Rys. 5.8.





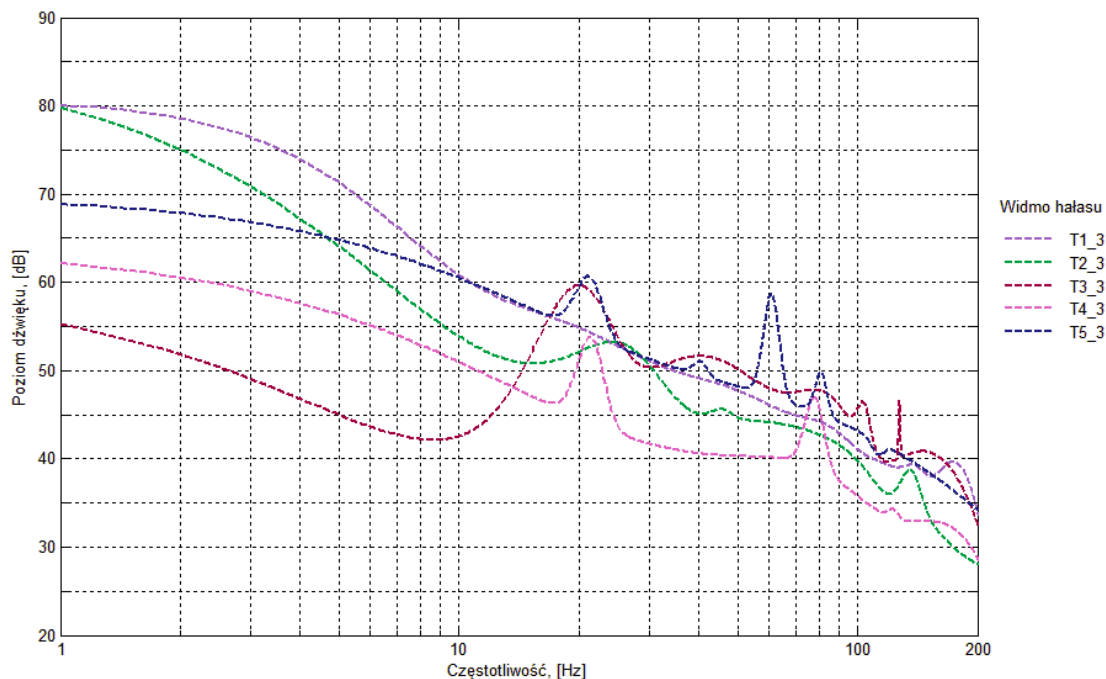
**Rys. 5.8** Zestawienie porównawcze wartości równoważnych poziomów dźwięku badanych turbin dla różnych krzywych ważenia i bez ważenia.

Zastosowanie krzywej ważenia A powoduje obcięcie widma w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości i prowadzi do zmniejszenia oddziaływania. Zmiana krzywej ważenia na krzywą C, nie obcina zakresu niskich częstotliwości, za to eliminuje składowe infradźwiękowe. Do oceny oddziaływania składowych infradźwiękowych najodpowiedniejszą jest krzywa ważenia G, która opisuje sposób ich odbioru przez człowieka i pozwala przeprowadzić ocenę zawężoną do infradźwiękowego zakresu częstotliwości.

### 5.2.2 Aproksymacja uzyskanych zależności częstotliwościowych

W celu uwydatnienia częstotliwości rezonansowych i uproszczenia przebiegów zmierzonych widm amplitudowych przeprowadzono aproksymację wyznaczonych przebiegów. W celu znalezienia optymalnej funkcji aproksymującej przeprowadzono badania z wykorzystaniem różnych modeli matematycznych, a jako kryterium oceny zastosowano wartość współczynnika determinacji  $R^2$ .

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że do aproksymacji zmierzonych widm sygnałów infradźwiękowych najlepiej nadaje się model Gaussa (siedmioparametrowy), dla którego współczynnik determinacji  $R^2$  osiąga największe wartości, rzędu (0,89-0,99), dla każdej z badanych turbin. Dlatego w ramach autoreferatu postanowiono zaprezentować wyniki aproksymacji tylko dla tego modelu, które przedstawiono na Rys. 5.9.



**Rys. 5.9** Krzywe modelowe opisujące widmo hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Model Gaussa.

Na podstawie zależności otrzymanych na Rys. 5.9 istnieje możliwość przeprowadzenia bardziej szczegółowych analiz. Na prezentowanych charakterystykach wyraźnie można wskazać dwa charakterystyczne zakresy częstotliwości. W pierwszym, poniżej częstotliwości 20 Hz, najgłośniejsza jest turbina T1, a następnie T2, T5 i T4, przy czym turbina T5 przy częstotliwości 5 Hz staje się głośniejsza od T2, a powyżej częstotliwości 10 Hz poziom hałasu turbiny T5 zrównuje się z turbiną T1. Poziom dźwięku turbiny T3 jest w tym zakresie najmniejszy, co spowodowane jest brakiem pracy turbiny wiatrowej. Dla pracujących turbin charakterystyczne jest zwiększanie się poziomu hałasu wraz ze zmniejszaniem się wartości częstotliwości.

W drugim zakresie, znajdującym się powyżej częstotliwości 20 Hz, najwyższe poziomy dźwięku zarejestrowano dla turbiny T3, gdzie dominującą rolę miały inne źródła infradźwięków jak przejeżdżające samochody oraz praca sprzętu rolniczego na polach, oraz dla turbiny T5 w zakresie jej częstotliwości rezonansowych. Porównując widma turbin T1, T2, T4 i T5, można zauważyć, że tak samo jak dla wcześniejszego zakresu, największe poziomy dźwięku generuje turbina T1 i T5, a następnie T2 i T4. Po zastosowaniu aproksymacji widm poziomu dźwięku zostały tylko najistotniejsze częstotliwości tonalne, dla których widmo turbiny T2 i T4 przekracza wartości widma turbiny T1.

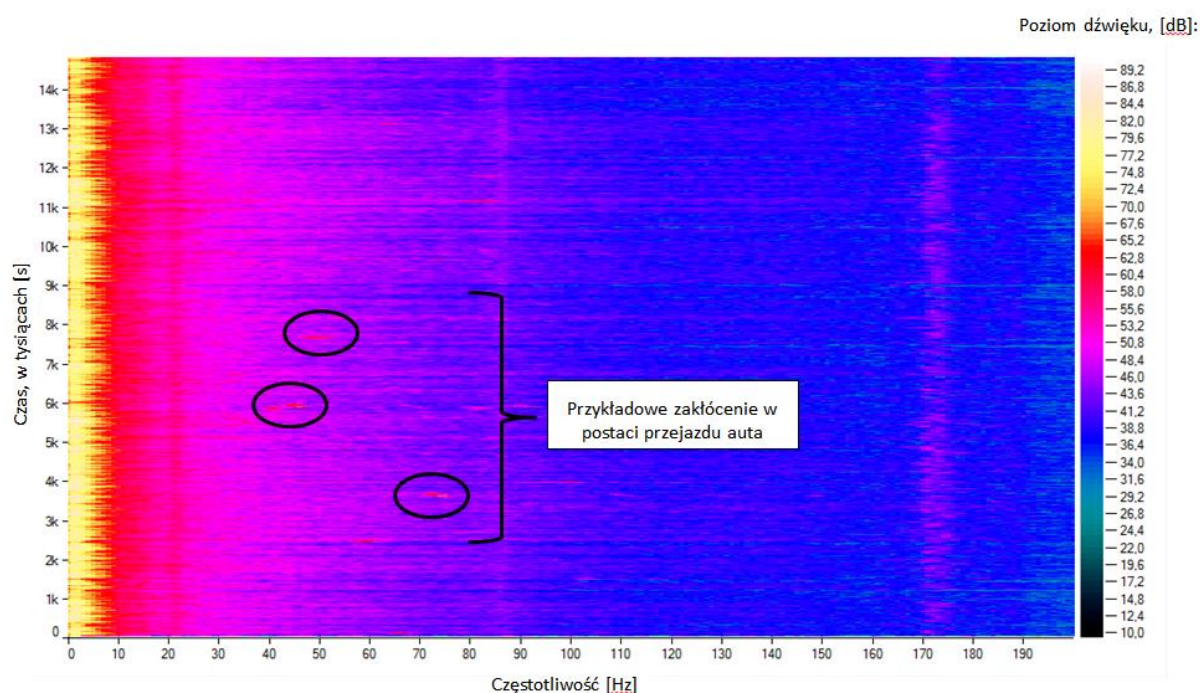
### 5.2.3 Rozkłady czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych.

Prezentowane we wcześniejszych rozdziałach wyniki przedstawiają poziomy dźwięku obliczone w oparciu o zarejestrowane przebiegi czasowo-częstotliwościowe i reprezentują wyniki uzyskane w czasie całego pomiaru. Badania przy każdej z analizowanych turbin wiatrowych trwały od kilkudziesięciu minut do kilku godzin. Dla każdej badanej turbiny



obliczone zostały dwuwymiarowe spektrogramy, które wyznaczono przy wykorzystaniu przekształcenia STFT (ang. Short Time Fourier Transform) dla zarejestrowanych zmian poziomu ciśnienia akustycznego. Uzyskane wyniki przedstawiano jako spektrogramy amplitudowe zarejestrowanego poziomu ciśnienia akustycznego, przy zastosowaniu czasu próbkowania równego 1 sekunda i rozdzielczości częstotliwościowej 1 Hz.

Przykładowe wyniki pomiarów uzyskane dla jednej z badanych turbin przedstawiono na Rys. 5.10. Uzyskane spektrogramy przedstawiają obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych zmian poziomu ciśnienia akustycznego, łącznie ze zdarzeniami, które były źródłem zakłóceń. Na prezentowanych rozkładach można szczegółowo prześledzić zmiany struktur częstotliwościowych, jakie zachodziły w czasie wykonywanych pomiarów wartości poziomu ciśnienia akustycznego. Interpretacja przedstawionych spektrogramów jest analogiczna do opisanych wcześniej wyników analiz częstotliwościowych, ponieważ widma amplitudowe w nich omawiane stanowią jedynie inną prezentację przedstawionych poniżej danych uzupełnioną o dziedzinę czasu. Przedstawione spektrogramy stanowiły dane wejściowe, będące podstawą do dalszych analiz.

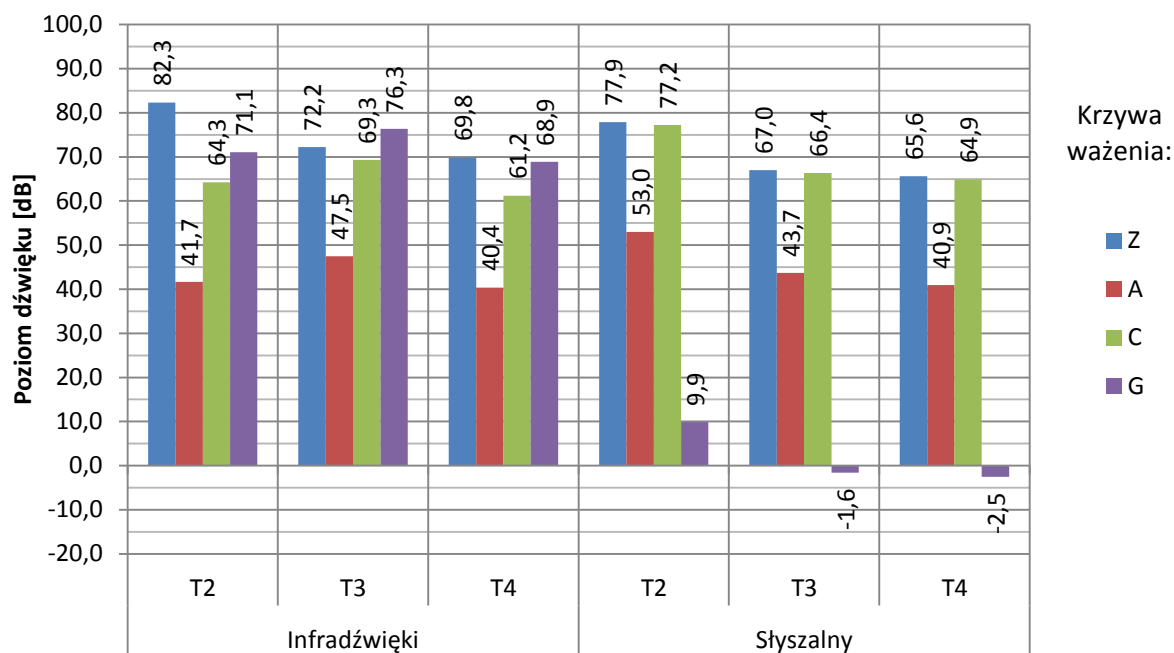


**Rys. 5.10** Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych turbiny T1

#### 5.2.4 Analiza porównawcza sygnałów akustycznych w paśmie infradźwiękowym i słyszalnym

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej poziomów dźwięku zarejestrowanych w paśmie infradźwiękowym i niskich częstotliwości z poziomami generowanymi w paśmie słyszalnym (od 20 Hz do 20 kHz) wykonano pomiary dla szerszego zakresu częstotliwości. W tym celu podczas pomiarów wykonanych dla turbin T2, T3 i T4 dokonano dodatkowo rejestracji sygnałów w paśmie słyszalnym. Pozwoliło to wyznaczyć rozkłady czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów oraz obliczyć równoważne poziomy hałasu.

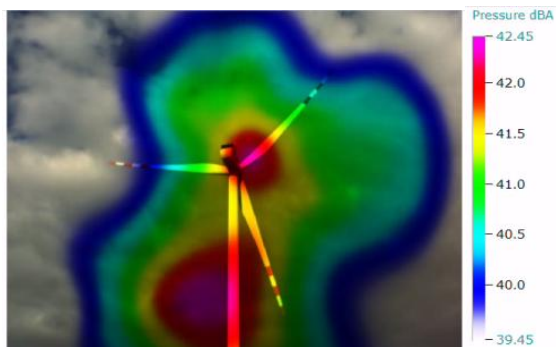
Zestawienie jednoliczbowych wartości poziomu dźwięku wyznaczonych dla różnych krzywych ważenia oraz bez ważenia dla pasma infra i słyszalnego przedstawiono na Rys. 5.11.



**Rys. 5.11** Zestawienie porównawcze równoważnych poziomów hałasu ważonych różnymi krzywymi w zakresie infra i słyszalnym.

Obecnie na podstawie dostępnych urządzeń i układów pomiarowych możliwe jest określenie dokładnego miejsca emisji fali akustycznej bezpośrednio na pracującej turbinie wiatrowej. W tym celu wykonuje się pomiary przy wykorzystaniu nowoczesnych kamer akustycznych. Kamera akustyczna to zespół mikrofonów połączonych z kamerą optyczną. Dzięki niej możliwe jest wskazanie kierunków przyścia fali akustycznej do punktu pomiarowego w postaci mapy akustycznej nałożonej na zdjęcie fotograficzne badanego obiektu.

Do pomiarów użyto kamery akustycznej firmy GFAI z matrycą mikrofonową złożoną z 48 mikrofonu rozłożonych na powierzchni o średnicy 3,4 m. Zakres dymniki mierzonych przez kamerę sygnałów wynosił od 35 do 130 dB, a zakres częstotliwościowy od 100 Hz do 13 kHz. Do badań hałasu emitowanego z turbiną wiatrową wykorzystano matrycę gwiazdową, która dedykowana jest do pomiarów z dużej odległości w zakresie od 7 do 500 m. Pomiar wykonano w punkcie oddalonym 200 m od turbiny T5, z matrycą umieszczoną 1,5 m nad powierzchnią ziemi. Wyniki pomiarów w formie zdjęcia akustycznego przedstawiono na Rys. 5.12. Na rys. 5.13 przedstawiono widok kamery akustycznej przeprowadzającej badanie hałasu turbiny wiatrowej



**Rys. 5.12** Zdjęcie akustyczne obrazujące miejsce powstawania fali akustycznej podczas pracy turbiny wiatrowej



**Rys. 5.13** Zdjęcie przedstawiające kamerę akustyczną podczas pomiarów

Na przedstawionym zdjęciu akustycznym wyraźnie można wskazać dwa miejsca emisji fali dźwiękowej. Pierwszym jest gondola turbiny wiatrowej, w której pracują urządzenia mechaniczne odpowiedzialne za produkcję przetwarzanie energii kinetycznej wiatru w energię elektryczną. W miejscu obserwacji poziom hałasu od tych urządzeń wynosił ok. 42,0 dB. Drugim miejscem emisji są turbulencje i zawirowania powietrza spowodowane przejściem łopaty w okolicy wieży turbiny wiatrowej. W miejscu obserwacji poziom hałasu od aerodynamicznych zjawisk powstających podczas obrotu wirnika wynosi ok. 42,6 dB.

## 6 Modelowanie rozkładów przestrzennych akustycznych sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbiny wiatrowe

Przy analizie zjawisk fizycznych związanych z falą akustyczną należy rozważyć trzy charakterystyczne obszary, tj.:

- **Obszar emisji** – w ramach, którego opisuje się powstawanie fali akustycznej,
- **Obszar propagacji** – w ramach, którego opisuje się zjawiska zachodzące podczas przemieszczania się fali dźwiękowej,
- **Obszar imisji** – w ramach, którego opisuje się percepcję fali dźwiękowej przez narząd słuchu i ciało człowieka

W celu zamodelowania rozkładu przestrzennego fali akustycznej niezbędna jest wiedza o dwóch pierwszych obszarach, tj.: emisji oraz propagacji. Trzeci obszar (imisji) wiąże się głównie z zastosowaniem odpowiednich krzywych ważenia, które opisują percepcję hałasu przez człowieka.

Do opisu emisji, konieczne jest określenie poziomu mocy akustycznej źródła oraz typu źródła zastępczego. Przy modelowaniu hałasu używane są trzy podstawowe typy źródeł hałasu: punktowe, liniowe i powierzchniowe. Przy czym, przy spełnieniu odpowiednich warunków geometrycznych, praktycznie każde źródło można rozbić i zastąpić grupą źródeł punktowych, które stanowi najprostszy z matematycznego punktu widzenia model źródła hałasu. Określenie poziomu mocy akustycznej może odbyć się na drodze pomiaru istniejącego obiektu będącego źródłem generacji sygnału lub na podstawie znajomości fizyki zjawisk wpływających na zmianę poziomu ciśnienia akustycznego. W przypadku turbin wiatrowych do określenia emisji hałasu w paśmie słyszalnym opracowana została norma PN-EN 61400-11 *Turbozespoły wiatrowe -- Część 11: Procedury pomiaru hałasu*. Norma ta w sposób szczegółowy opisuje metodykę pomiaru oraz sposób przedstawiania i opracowania wyników, tym samym daje możliwość weryfikacji otrzymanych rezultatów. W ramach

pomiarów uwzględnia się wszystkie typy hałasu generowanego przez badaną turbinę wiatrową i wyraża poziomem mocy akustycznej, przy danej prędkości wiatru. Norma dopuszcza także rozszerzenie zakresu badań o infradźwięki (Annex A.2) ale nie definiuje dokładnie sposobu jego pomiaru. Domyślnie można przyjąć, dla pasma niskich częstotliwości, że pomiary wykonuje się w analogiczny sposób, rozszerzając jedynie zakres analizowanych częstotliwości. Zgodnie z normą turbinę wiatrową zastępuje się punktowym źródłem hałasu z poziomem mocy akustycznej określonym w pasmach tercjowych na podstawie pomiarów.

Mając wiedzę dotyczącą parametrów charakteryzujących emisję hałasu ze źródła, konieczne jest określenie sposobu obliczenia propagacji oraz opisu zjawisk jej towarzyszącej. Propagacji dźwięku w środowisku od źródła punkowego towarzyszy cały szereg czynników, włącznie z jego pochłanianiem w powietrzu, niejednorodnością warunków meteorologicznych (refrakcja i turbulencje) oraz interakcji z przeszkodami i powierzchnią gruntu. Równania i zależności wyjściowe niezbędne do opisu fali akustycznej w środowisku są ogólnie znane i opisane [27]. Natomiast problem stanowi dokładne określenie wszystkich warunków brzegowych, takich jak: stan atmosfery itp. Dla wąskich zakresów parametrów możliwe jest obliczenie rozkładu hałasu w oparciu o fizyczne modele wykorzystujące podczas obliczeń metody elementów skończonych. Przy modelach o większym skomplikowaniu, z dużą liczbą elementów wpływających na uzyskiwane wyniki oraz obszarem obliczeń rzędu setek metrów kwadratowych, obliczenia przy użyciu fizycznych modeli stają się zbyt złożone. W celu rozwiązania problemu złożoności obliczeniowej utworzone zostały modele empiryczne, w których poziom hałasu w danym punkcie obliczany jest w oparciu o proste zależności w postaci sumy szeregu poprawek uwzględniających zjawiska związane z propagacją. Najbardziej rozpowszechnionym modelem tego typu jest model opisany w normie PN-ISO 9613-2:2002 *Akustyka -- Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzeni otwartej - Ogólna metoda obliczania* wykorzystywanej do określania poziomu hałasu metodami obliczeniowymi. W metodzie tej wykorzystywane są algorytmy umożliwiające obliczenie wielkości tłumienia dla następujących zjawisk:

- geometrycznego rozprzestrzeniania się dźwięku,
- pochłaniania w powietrzu,
- tłumienia wynikające z wpływu powierzchni gruntu,
- tłumienia wynikające z obecności ekranu,
- odbicia,
- wpływu zabudowy i zieleni.

W ramach powyższej normy rozpatrywać można tylko hałas słyszalny. Nie zakłada ona żadnych zaleceń do obliczeń hałasu w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości. Dodatkowo we wstępie do normy znajduje się zapis, że walidowano ją tylko dla źródeł znajdujących się blisko powierzchni ziemi. Pomimo, że turbiny wiatrowe są źródłem hałasu umieszczonym wysoko nad ziemią, to obecnie do obliczania rozkładu poziomu hałasu w paśmie słyszalnym powszechnie stosuje się powyższą normę, a w dotychczasowych pomiarach powykonawczych stwierdza się zbieżność wyników obliczeń z pomiarami wykonanymi w terenie [3, 28, 29, 30].

Do wyznaczania rozkładów przestrzennych akustycznych sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbiny wiatrowe w chwili obecnej można wykorzystywać praktycznie tylko jedną metodę obliczeniową, która została opracowana w Danii oparciu o normę PN-ISO 9613-2. Metodę tą wprowadziło Duńskie Ministerstwo Środowiska jako

dekret w sprawie oceny hałasu turbin wiatrowych, obejmujący swoim zakresem wszystkie turbiny instalowane po 1 stycznia 2012 r. Podstawą oceny w opisywanej metodzie jest poziom dźwięku ważony krzywą A w pomieszczeniu, w którym przebywają ludzie [30].

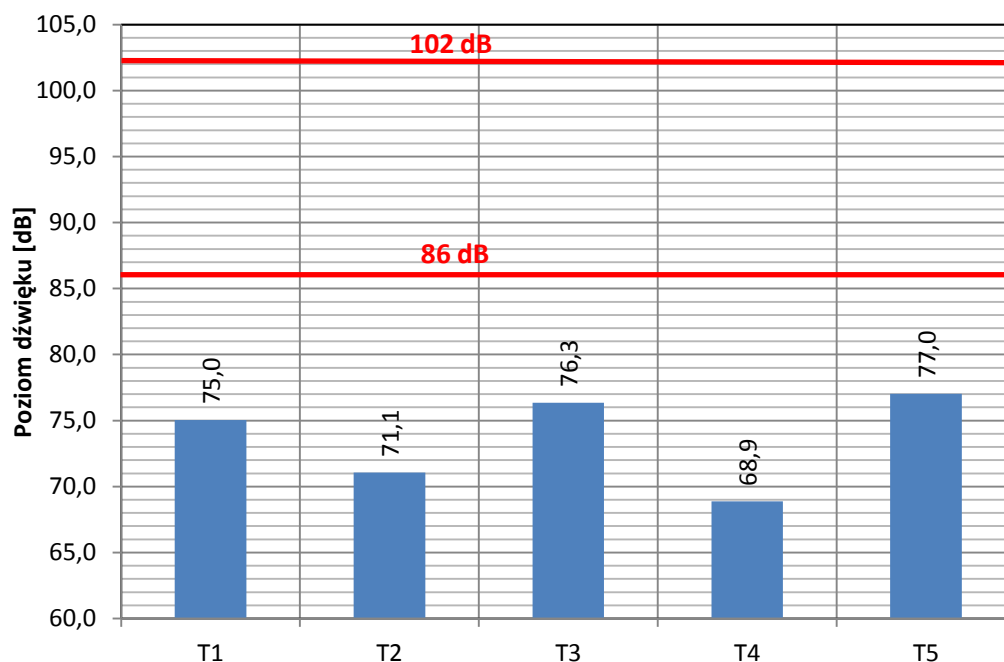
Założeniem duńskiej metody jest wykonanie pomiarów poziomu mocy akustycznej w zakresie od 10 do 160 Hz przy wietrze o prędkościach 6 oraz 8 m/s zgodnie z opisaną metodą, analogiczną do normy PN-EN 61400-11. Następnie przy pomocy zdefiniowanych wzorów oblicza się poziom dźwięku A w pomieszczeniu.

Podsumowując, w chwili obecnej istnieje tylko jedna inżynierska metoda modelowania rozkładów przestrzennych akustycznych sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbiny wiatrowe oraz metody oparte na fizycznych modelach. Z powodu złożoności obliczeniowej modele fizyczne nie są zalecane do oceny uciążliwości, natomiast model empiryczny należałoby dokładnie walidować oraz rozważyć określenie innej krzywej ważenia.

## **7 Ocena uzyskanych wyników pod kątem obowiązujących prawnie wartości kryterialnych**

Szczegółowy przegląd przepisów prawnych dotyczących oceny szkodliwości hałasu infradźwiękowego przedstawiono w rozdz. 3.7 Rozprawy. W Polsce kwestia hałasu infradźwiękowego w środowisku zewnętrznym nie jest regulowana żadnymi przepisami prawa. W chwili obecnej, jedynymi przepisami regulującymi kwestię hałasu infradźwiękowego jest Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej dotyczące bezpieczeństwa i higieny pracy, które w rozpatrywanej kwestii odwołuje się do norm i rozporządzeń wykonawczych. Obecnie brak jest rozporządzeń wykonawczych regulujących kwestie hałasu infradźwiękowego. Jedynym dokumentem w Polsce regulującym kwestie hałasu infradźwiękowego są normy PN-Z-01338, PN-ISO 9612 i PN-ISO 7196. Zgodnie z normą PN-Z01338:2010 równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy nie powinien przekraczać 102 dB, a przypadku wykonywania prac koncepcyjnych wymagających szczególnej koncentracji uwagi 86 dB.

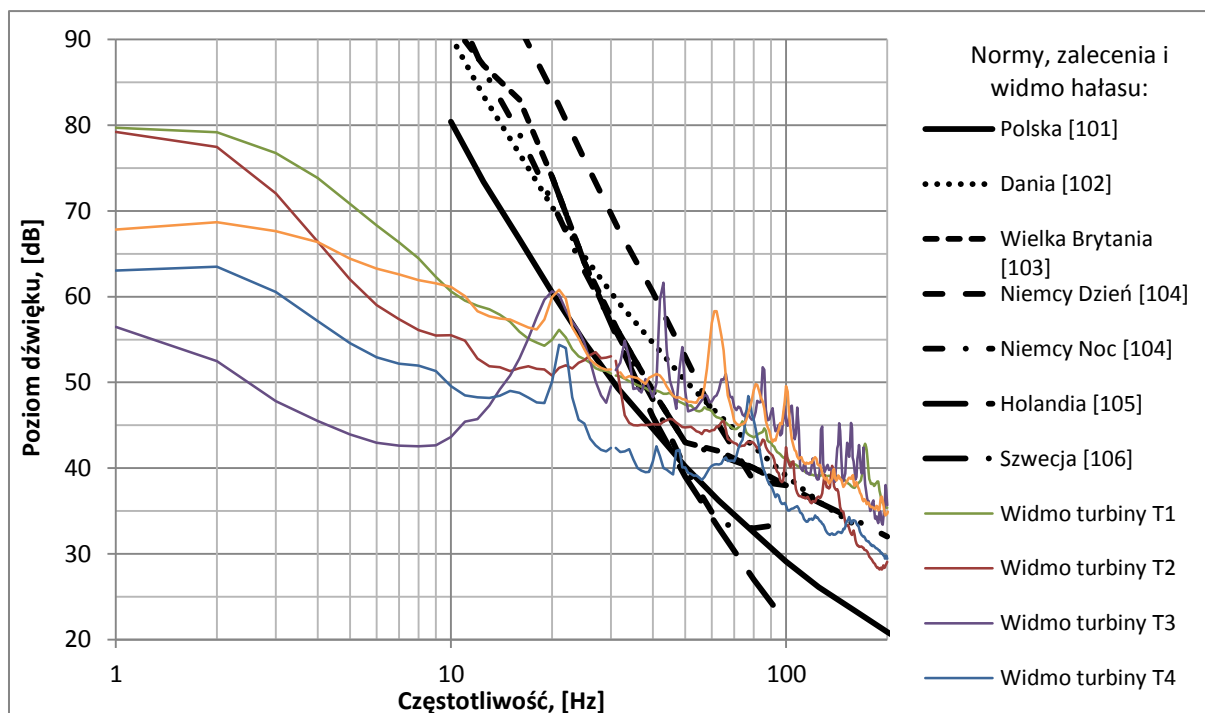
Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów, można stwierdzić, dla badanych turbin wiatrowych, uzyskano poziomy generowanych sygnałów infradźwiękowych znacznie poniżej zdefiniowanych w normie wartości kryterialnych. Zestawienie zmierzonych równoważnych poziomów dźwięku ważonych krzywą G badanych turbin wraz z zaznaczeniem dopuszczalnych poziomów przedstawiono na Rys. 7.1. Mają na uwadze fakt, że zmierzone poziomy zarejestrowano w bezpośrednim sąsiedztwie badanych turbin, poziom dźwięku ważony krzywą G w odległości kilkuset metrów, gdzie znajdowała się zabudowa mieszkaniowa, osiągałby jeszcze mniejsze poziomy, pod warunkiem zachowania odpowiedniego odstępu od poziomu tła akustycznego, kształtowanego źródłami bytowymi.



**Rys. 7.1** Równoważne poziomy dźwięku warzone krzywą G zarejestrowane przy badanych turbinach T1, T2, T3, T4 i T5 wraz z dopuszczalnymi poziomami hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy zdefiniowanymi w normie PN-Z-01338.

Oprócz poziomów dopuszczalnych zdefiniowanych w normie, istnieją także zalecenia określone w pracy Pani Mirowskiej [21], które definiują kryteria oparte na progach słyszenia. Ich zestawienie w porównaniu do analogicznych wytycznych obowiązujących w innych krajach przedstawiono szczegółowo w Rozprawie. W ramach przeprowadzonej oceny porównano przedstawione krzywe oceny z zmierzonym widmowym rozkładem poziomu hałasu. Zestawienie to przedstawiono na Rys. 7.2. Na podstawie uzyskanych zależności można stwierdzić, że w zakresie infradźwiękowym, poniżej 20 Hz, żadna z badanych turbin nie przekroczyła krzywych oceny. Dopiero w paśmie niskich częstotliwości, powyżej 30 Hz, zarejestrowane widma mają wartości wyższe od krzywych oceny. W przypadku polskiej krzywej, im wyższa częstotliwość, tym poziom przekroczenia jest coraz większy, dochodząc do 25 dB dla turbiny T3, przy której duży udział w widmie hałasu miały pojazdy poruszające po pobliskich drogach. Fakt ten świadczy jedynie, że dla częstotliwości powyżej 30 Hz hałas badanych turbin jest w punkcie pomiaru na poziomie percypowanym przez człowieka. Dla większych odległości, rzędu kilkuset metrów, zmierzone wartości byłyby poniżej krzywych oceny lub zbliżałyby się do nich.





**Rys. 7.2** Widma amplitudowe badanych turbin wiatrowych na tle krzywych ocen uciążliwości z różnych krajów. Opracowanie własne na podstawie [22]

Podsumowując, poziom ciśnienia akustycznego sygnałów infradźwiękowych emitowanych pracą badanych turbin wiatrowych dużych mocy, niezależnie od prędkości wiatru, warunków meteorologicznych, rozwiązań konstrukcyjnych, czasu eksploatacji, wartości mocy znamionowej i wielkości mocy elektrycznej oddawanej do systemu elektroenergetycznego nie przekracza wartości kryterialnych określonych w obowiązujących przepisach prawnych dotyczących oceny hałasu infradźwiękowego w środowisku pracy. Spełnienie standardów na stanowiskach pracy, określonych dla środowiska, w którym człowiek znajduje się bezpośrednio przy źródle i wystawiony jest na wyższe wartości ekspozycji, gwarantuje brak występowania uciążliwych poziomów hałasu na terenach mieszkaniowych w otoczeniu turbin wiatrowych, znajdujących się zwykle w odległości kilkuset metrów od turbin.

## 8 Zalecenia dotyczące metodyki pomiarów infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe

Na podstawie wykonanych badań i analiz uzyskanych wyników oraz przeprowadzonych studiów literaturowych w zakresie oddziaływania infradźwięków, sposobu przeprowadzania ich pomiarów oraz metod oceny ich uciążliwości w środowisku, określono zalecenia dotyczące metodyki pomiarów infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe. Wykonywanie pomiarów zgodnie z góry ustaloną metodyką pozwoliłoby przeprowadzać ocenę pomiarów wykonywanych przez różnych badaczy. Obecnie, większość prezentowanych w literaturze wyników badań prowadzona była według autorskich metodyk, czasami skrajnie różniących się. W analizowanej literaturze występowały także przypadki, w których sposób pomiaru w ogóle nie został przedstawiony, co uniemożliwiało przeprowadzenie rzetelnej oceny prezentowanych wyników. Utworzenie spójnej metody pomiaru jest tym bardziej pożądane, zważywszy na fakt, że nawet w normie PN-EN 61400-

11:2013-07E *Turbozespoły wiatrowe -- Część 11: Procedury pomiaru hałasu* stworzonej do określania poziomu mocy akustycznej turbin wiatrowych, problematyka hałasu infradźwiękowego sprowadza się jedynie do stwierdzenia, że pomiary można rozszerzyć o ten zakres częstotliwości.

Najpełniej problem hałasu infradźwiękowego, sposób jego pomiaru i oceny, został opisany w duńskim prawodawstwie [patrz: rozdz. 7 Rozprawy]. Jedynym problematycznym aspektem w przedstawionej metodzie jest zastosowanie do oceny poziomu dźwięku ważonego krzywą A, która w ogóle nie ma zastosowania do analizowanego zakresu częstotliwości [patrz: rozdz. 5.6 Rozprawy]

Mając na uwadze powyższe argumenty, zasadne jest podjęcie próby sformułowania zaleceń nakreślających metodykę pomiaru oraz oceny zmierzonych wartości, w zakresie hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe. W tym celu racjonalne jest zebranie wszystkich dobrych wzorców oraz doprecyzowanie kwestii budzących wątpliwości. W celu bardziej przejrzystej i czytelniejszej prezentacji wymagane zalecenia zestawiono w formie tabelarycznej w tabeli 8.1.

**Tabela 8.1** Zalecenia dotyczące metodyki wykonywania pomiarów infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe

| Element metodyki pomiarowej                 | Zalecenie                                                                                                     | Uwagi / Komentarz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                           | 2                                                                                                             | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Wybór punktu pomiarowego                    | Zgodnie z normą PN-EN 61400-11                                                                                | Wyniki pomiarów w zakresie częstotliwości infradźwiękowych należy podawać jako jeden z kolejnych parametrów pracy turbiny wiatrowej.<br><br>Dodatkowo pomiar bezpośrednio przy źródle pozwala maksymalnie zminimalizować wpływ tła akustycznego, stanowiącego dodatkowe źródło infradźwięków.                                                |
| Mierzone poza akustyczne parametry pracy    | Zgodnie z normą PN-EN 61400-11 wilgotność, ciśnienie, temperatura powietrza i wielkość opadów atmosferycznych | W celu wykluczenia wpływ na wynik pomiarów czynników innych niż prędkość wiatru, konieczne jest mierzenie pozostałych parametrów opisujących stan atmosfery.                                                                                                                                                                                 |
| Ocena tła akustyczne                        | Zgodnie z normą PN-EN 61400-11                                                                                | Najlepszym rozwiązaniem jest wykonanie pomiarów dla tych samych warunków atmosferycznych przy wyłączonej turbinie. W przypadku braku takiej możliwości dopuszczalne byłoby wykonanie oceny tła akustycznego na podstawie szczegółowego opisu zjawisk towarzyszących pomiarom (typu przejazdu aut, prace urządzeń rolniczych na polach, itp.) |
| Zakres analizowanych warunków pracy turbiny | Zgodnie z duńskimi zaleceniami dla prędkości wiatru równych: 6 i 8 m/s                                        | Wykonywanie pomiarów dla tylko dwóch prędkości wiatru umożliwi znaczące skrócenie czasu rejestracji, który w przypadku pomiarów hałasu przy turbinach wiatrowych znacząco zależy od warunków meteorologicznych i cechuje się dużym rozrzutem.                                                                                                |
| Wskaźniki oceny                             | Poziom dźwięku ważony krzywą G                                                                                | Do ogólnej oceny uciążliwości wystarczający jest równoważny poziomy dźwięku ważony krzywą G.                                                                                                                                                                                                                                                 |



| Element metodyki pomiarowej      | Zalecenie                                                                                                                                                          | Uwagi / Komentarz                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                | 2                                                                                                                                                                  | 3                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|                                  | Poziom dźwięku bez ważenia (widmo amplitudowe)<br><br>Różnica między poziomem dźwięku ważonym krzywą A i C                                                         | Do oceny szczegółowej konieczne jest określenie widmowego rozkładu poziomu hałasu z rozdzielczością co najmniej tercjową (najlepiej 1 Hz) oraz wyznaczenie różnicy między poziomem dźwięku ważonym krzywą A i C, w celu określenia występowania składowych niskoczęstotliwościowych. |
| Pasmo analizy                    | Co najmniej zgodnie z duńskimi zaleceniami od 10 do 160 Hz                                                                                                         | Jeżeli to możliwe należy rozszerzyć pasmo analizy od 1 do 200 Hz.                                                                                                                                                                                                                    |
| Ocena na terenach mieszkaniowych | Metodami obliczeniowymi w oparciu o wyniki pomiarów przeprowadzonych przy turbinie, zgodnie z duńskimi zaleceniami, z zastrzeżeniem zmiany deskryptora opisującego | Wprowadzenie poziomu dźwięku ważonego krzywą G, jako najlepiej odpowiadającego badanemu zakresowi częstotliwości.                                                                                                                                                                    |

## 9 Wnioski

Na podstawie uzyskanych podczas realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej wyników pomiarów i analiz można sformułować następujące wnioski:

- poziomy infradźwięków mierzone w bezpośrednim otoczeniu badanych turbin wiatrowych dużej mocy nie przekraczają wartości kryterialnych określonych dla potrzeb oceny hałasu infradźwiękowego w środowisku pracy,
- do oceny hałasu turbin wiatrowych w zakresie częstotliwości infradźwiękowych najlepszym deskryptorem jest poziom dźwięku ważony krzywą G,
- pomiar w punkcie, w którym wyznacza się poziom mocy akustycznej zgodnie z normą PN EN 61400-11, można rozszerzyć o zakres częstotliwości infradźwiękowych, a wynik pomiaru podawać jako jeden z kolejnych parametrów pracy turbiny wiatrowej,
- w celu wykluczenia wpływ na uzyskiwane wyniki pomiarów czynników innych niż prędkość wiatru, konieczne jest mierzenie pozostałych parametrów opisujących warunki atmosferyczne tj.: temperatura i wilgotność powietrza, a także wielkość opadów,
- w celu przeprowadzenia szczegółowej oceny oddziaływania sygnałów infradźwiękowych konieczne jest wyznaczenie widmowych rozkładów poziomu hałasu z rozdzielczością co najmniej tercjową (najlepiej 1 Hz), a także obliczenie różnicy między poziomem dźwięku ważonym krzywą A i C, w celu określenia występowania składowych niskoczęstotliwościowych,
- wszystkie wyznaczone przebiegi widm amplitudowych dla zmierzonych sygnałów infradźwiękowych emitowanych przez badane turbiny wiatrowe miały maksymalną wartość poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie najniższych częstotliwości (tj. rzędu 1-5 Hz), a kształt ich przebiegów charakteryzował się podobnymi tendencjami, w postaci zmniejszania się wartości poziomu ciśnienia akustycznego wraz ze wzrostem częstotliwości

oraz występowaniem w obliczonych widmach składowych harmonicznym, dla których występują lokalne podbicia mierzonych wartości,

- w celu eliminacji zakłóceń wywoływanych innymi źródłami hałasu infradźwiękowego takich jak: znajdujące się w pobliżu badanych turbin szlaki komunikacyjne (samochody, pociągi), a także pracą maszyn i pojazdów rolniczych, wskazane jest przeprowadzanie badań w okresach ich najmniejszej aktywności (np. w okresie nocy),
- obrazy czasowo – częstotliwościowe przedstawione na spektrogramach STFT cechują się największymi wartościami mierzonych poziomów ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości infradźwiękowych (maksimum energii w zakresie małych częstotliwości tj. 1-10 Hz),
- wyniki analizy porównawczej poziomu hałasu w zakresie infradźwiękowym i słyszalnym wykazały, że energia akustyczna zawiera się głównie w przedziale niskich i infradźwiękowych częstotliwości, a mierzone poziomy znacząco zależą od zastosowanych krzywych ważenia,
- do aproksymacji mierzonych widm amplitudowych sygnałów infradźwiękowych najlepiej nadaje się model gaussowski, dla którego uzyskano największe wartości wskaźnika  $R^2$  (tj. od 0,89 do 0,99),
- na podstawie analizy zmian zachodzących w poziomie hałasu infradźwiękowego, które wyznaczono dla dominujących częstotliwości rezonansowych wykazano, że są one uzależnione od typu zastosowanego w badanych turbinach generatora (synchroniczny, asynchroniczny),
- zarejestrowane dla badanych turbin wiatrowych wartości poziomu ciśnienia akustycznego sygnałów infradźwiękowych zależą od:
  - prędkości wiatru,
  - temperatury i wilgotności,
  - typu generatora,
  - czasu eksploatacji,
- wartość mocy znamionowej zbadanych turbin wiatrowych nie ma wpływu na wartości poziomu ciśnienia akustycznego emitowanych podczas ich pracy infradźwięków,
- wielkość mocy elektrycznej oddawanej przez badane turbiny do systemu elektroenergetycznego nie ma istotnego wpływu na poziomy generowanych przez nie infradźwięków,
- niezależnie od badanego wpływu zdefiniowanych parametrów i czynników zewnętrznych wartości zarejestrowanych poziomów sygnałów infradźwiękowych nie przekraczały 80 dB ważonych krzywą G i znajdowały się poniżej wartości kryterialnych określonych dla środowiska pracy, co potwierdza założoną tezę rozprawy doktorskiej.

*Podsumowując, na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i analiz można stwierdzić, że zbadane turbiny wiatrowe nie generują sygnałów infradźwiękowych o wartościach poziomu ciśnienia akustycznego, które przewyższałyby wartości kryterialne zdefiniowane dla środowiska pracy, niezależnie od prędkości wiatru, warunków meteorologicznych, rozwiązań konstrukcyjnych, czasu eksploatacji, wartości mocy znamionowej i wielkości*

*oddawanej do systemu elektroenergetycznego mocy elektrycznej , co stanowi potwierdzenie postawionej tezy w niniejszej pracy doktorskiej.*

## **10 Podsumowanie**

W ramach niniejszej pracy wykonano pomiary, a następnie przeprowadzono wielowariantową analizę sygnałów infradźwiękowych i niskiej częstotliwości, a także w celach porównawczych w paśmie słyszalnym, których źródłem były pracujące w warunkach rzeczywistych turbiny wiatrowe dużych mocy. Zbadano także wpływ szeregu parametrów i czynników zewnętrznych na uzyskane wyniki pomiarowe.

W części teoretycznej rozprawy opisano zjawisko generacji i propagacji fali infradźwiękowej, przedstawiono jej źródła naturalne i sztuczne oraz potencjalny zakres zastosowań.

Na podstawie przeprowadzonego przeglądu doniesień literaturowych scharakteryzowano, potencjalny wpływ sygnałów infradźwiękowych na poszczególne organy organizmu ludzkiego, a także wskazano zapisy o charakterze normatywno-prawnym regulujące kwestię i kryteria oceny ich oddziaływania w środowisku pracy. W części wprowadzającej dokonano także przeglądu dostępnej literatury dotyczącej problematyki infradźwięków emitowanych pracą turbin wiatrowych różnych mocy.

W części pomiarowej pracy został przedstawiony szczegółowy opis poszczególnych elementów dobrego układu pomiarowego, obliczono niepewność wykonywanych pomiarów, wskazano parametry rejestrowanych sygnałów infradźwiękowych oraz scharakteryzowano zastosowaną metodykę badań przeprowadzonych w warunkach normalnej pracy turbin wiatrowych. Część ta stanowiła jeden z istotniejszych rozdziałów rozprawy, ponieważ przedstawione informacje mogą stanowić podstawę do weryfikacji otrzymanych wyników przez innych pracowników naukowo-badawczych. Następnie przedstawiono lokalizację i opis badanych turbin wiatrowych, ze szczególnym uwzględnieniem ich parametrów znamionowych oraz wybranych cech charakterystycznych.

W części analitycznej rozprawy zaprezentowano wyniki analiz częstotliwościowych i czasowo-częstotliwościowych zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych.

W ramach przeprowadzonych analiz zbadano wpływ wszystkich zawartych w tezie rozprawy parametrów i czynników zewnętrznych na uzyskane wyniki pomiarowe. Każdorazowo określono równoważny poziom dźwięku warzony krzywą G, który stanowi podstawę do oceny uciążliwości infradźwięków dla organizmu człowieka. Po obliczeniu wartości poziomów imisji infradźwięków wskazano możliwości modelowania hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe. W podsumowaniu przeprowadzonych analiz uzyskane wartości zmierzonych poziomów infradźwięków zestawiono z wartościami kryterialnymi, które są określone w obowiązujących dla środowiska pracy przepisach prawnych.

W oparciu o uzyskane wyniki, a także informacje literaturowe związane z tematyką infradźwięków, źródeł ich emisji oraz wpływu różnych czynników na poziom ich imisji, podjęto próbę określenia zaleceń dotyczących ram referencyjnej metodyki pomiarowej sygnałów infradźwiękowych generowanych przez współczesne turbiny wiatrowe dużych mocy.

Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzonych analiz zarejestrowanych wielkości potwierdzono założoną tezę rozprawy doktorskiej. W tezie pracy zawarte zostały wszystkie badane parametry, które mogą mieć potencjalny wpływ na poziom generowanych infradźwięków. Jednocześnie ciągły postęp technologiczny w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych nowoczesnych turbin wiatrowych dużych mocy, zmierzający do zwiększenia efektywności produkcji energii elektrycznej, a także związany z rzeczywistą redukcją poziomu mocy akustycznej generowanych podczas ich pracy sygnałów, umożliwił rozszerzenie przyjętych w tezie założeń na reprezentatywną populację współcześnie wykorzystywanych instalacji wiatrowych. Druga część przyjętej podczas badań tezy, odnosi się w sposób bezpośredni do wielkości kryterialnych, wyznaczonych dla środowiska pracy, ponieważ tylko w tym zakresie problem hałasu infradźwiękowego został szczegółowo określony na podstawie wyników szeregu badań prowadzonych na przestrzennych ostatnich kilkudziesięciu. Należy przy tym zauważyć, że środowisko pracy jest jedynym, w którym prowadzi się dokładne badania wpływu infradźwięków na organizm człowieka.

Podsumowując, dla badanych reprezentatywnych turbin wiatrowych dużych mocy nie stwierdzono występowania ponadnormatywnych poziomów ciśnienia akustycznego określonych dla środowiska pracy, niezależnie od prędkości wiatru, warunków meteorologicznych, rozwiązań konstrukcyjnych, czasu eksploatacji, wartości mocy znamionowej i wielkości mocy elektrycznej oddawanej do systemu elektroenergetycznego.

W ocenie Doktoranta, tematyka dalszych prac naukowo-badawczych powinna dotyczyć walidacji otrzymanych wyników pomiarów oraz opracowania modelu akustycznego dla potrzeb wyznaczania rozkładów przestrzennych, określania zasięgów i sposobów propagacji fal infradźwiękowych. Z tematyki tej został opracowany wniosek na projekt badawczy zatytułowany „Numeryczna i doświadczalna analiza niskoczęstotliwościowych zjawisk akustycznych generowanych podczas pracy turbin wiatrowych”, który został zgłoszony na bieżący konkurs OPUS organizowany przez Narodowe Centrum Nauki.

Po przeprowadzeniu weryfikacji otrzymanych wyników pomiarów i analiz, konieczne byłoby określenie na podstawie zaproponowanych wytycznych, referencyjnej metodyki pomiarowej i włączenie jej do istniejącego zbioru norm pomiarowych. W celu dokładnego wyznaczenia lokalizacji i opisu miejsc generacji fal infradźwiękowych emitowanej przez turbiny wiatrowe zasadne wydaje się wykorzystanie podczas pomiarów dostępnych obecnie na rynku nowoczesnych kamer akustycznych. Wymagałoby to zastosowania zmodyfikowanych matryc mikrofonowych o większych rozmiarach, które umożliwiłyby rozszerzenie zakresu mierzonych sygnałów akustycznych w paśmie słyszalnym o częstotliwości infradźwiękowe. W konsekwencji umożliwiłoby to zawężenie obszaru badań do elementów składowych turbin wiatrowych, które stanowią bezpośrednie źródło emisji składowych infradźwiękowych w widmie emitowanego hałasu.

Kolejnym etapem prac naukowo-badawczych, niezależnym do zagadnień bezpośrednio związanych z problemem hałasu generowanego przez elektrownie wiatrowe, powinno być szczegółowo określone, na podstawie wyników badań klinicznych, wpływu infradźwięków na organizm człowieka oraz inne organizmy żywe. Dopiero posiadając pełną wiedzę o możliwym wpływie infradźwięków na organizm człowieka należałoby określić realne wartości dopuszczalnych poziomów infradźwięków w środowisku ogólnie dostępnym.

## Spis Literatury

---

- 1 Boczar T., Energetyka wiatrowa: aktualne możliwości wykorzystania, Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola, Warszawa, 2008.
- 2 <http://www.wwindea.org/hyr2015/> [dostęp październik 2015 r.].
- 3 Wegner S., Bareiss R., Guidati G., Wind Turbine Noise, Springer, Berlin, 1996.
- 4 PN-EN 61400-11:2002 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu.
- 5 PN-EN 61400-11:2004/A1 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu
- 6 Malec T., Hałas infradźwiękowy i sposoby oceny jego uciążliwości, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, nr 342, Elektryka z. 66, 2011, str. 51-52.
- 7 IEC 60050-501:1994 International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics.
- 8 Leventhall G. What is infrasound? Progress in Biophysics and Molecular Biology 93, 2007, pp. 130–137.
- 9 Noble J.M., Tenney S.M., Detection of naturally occurring events from small aperture infrasound arrays, <http://www.tornadochaser.net/research/infasonicdetector.pdf> [dostęp sierpień 2008].
- 10 Kaczmarska A., Augustyńska D., Ograniczenie hałasu niskoczęstotliwościowego w kabinach przemysłowych. Warszawa, CIOP, 1999.
- 11 Kaczmarska A., Augustyńska D., Wierzejski A., Hałas infradźwiękowy na stanowiskach pracy kierowców. Bezpieczeństwo Pracy, nr 10, 2006, str. 6–7.
- 12 Wagner, S., Bareib, R. and Guidati, G., Wind Turbine Noise, Springer, Berlin, 1996.
- 13 [mstudioblackboard.tudelft.nl](http://mstudioblackboard.tudelft.nl) [dostęp czerwiec 2009].
- 14 Guidati G., Bareiß R., and Wagner S., An investigation of blade-tower interactionnoise (BTI) for horizontal axis wind turbines in upwind and downwind configuration. First steps towards modeling of aeroelastic effects,” in Proceedings of the 8th IEA Joint Action Symposium on Aerodynamics of Wind Turbines, Lyngby, Denmark, 1994, pp. 249–255.
- 15 Shepherd, K.P., Hubbard, H.H., Infrasound Emission Wind Turbine “Physical Characteristics and Perception of Low Frequency Noise from Wind Turbines”. Noise Control Engineering Journal 36(1), 1991, pp. 5 - 15.
- 16 Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 29 listopada 2002 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. 2002 nr 217 poz. 1833.
- 17 Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 16 czerwca 2009 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, Dz.U. 2009 nr 105 poz. 873.
- 18 Augustyńska D., Wartości graniczne ekspozycji na infradźwięki – przegląd piśmiennictwa, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, nr 2(60), 2009, ss. 5–15.
- 19 PN-Z 01338:2010, Akustyka -- Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.
- 20 Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia (Dz. U. 2002 nr 217 poz. 1833).
- 21 Mirowska M., An investigation and assessment of annoyance of low frequency noise in dwellings. Noise Notes vol. 1, 1, 2002, pp. 30–34.
- 22 Palwas K., Wpływ infradźwięków i hałasu niskich częstotliwości na człowieka – przegląd piśmiennictwa, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2009, nr 2(60), ss. 27-64.
- 23 ISO 226:2003, Acoustics -Normal equal-loudness-level contours.
- 24 IEC 60537 Frequency Weighting For The Measurement Of Aircraft Noise (D-Weighting).

- 
- 25 IEC 61672:2003 Electroacoustics — Sound Level Meters, Part 1 Specifications.
  - 26 ISO 7196:1995 Acoustics -- Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements.
  - 27 Beranek L., Acoustics, Acoustical Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Edition 1993.
  - 28 Dobrucki A., Bogusz B., Oddziaływanie infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe na zdrowie człowieka, Raport nr I-28/11/S-070, Politechnika Wrocławska, 2011 r.
  - 29 Jakobsen J., Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration," J. Low Freq. Noise, Vib., Act. Control 20(3), 2001, pp. 141–148.
  - 30 [http://eng.mst.dk/media/mst/66206/engelsk\\_vindmoellebekendtgørelse.pdf](http://eng.mst.dk/media/mst/66206/engelsk_vindmoellebekendtgørelse.pdf) [dostęp: czerwiec 2013].

### **Wykaz dorobku naukowego autora**

1. Malec T., *Infrasound and Ways to assess the nuisance*, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, 2011, nr 342, Elektryka z. 66, s. 51-52
2. Malec T., *Infrasound noise from wind turbines – Preliminary results*, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, 2012, nr 347, Elektryka z. 68, s. 43-44
3. Malec T., Boczar T., Wotzka D. *Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe różnych mocy* Pomiar Automatyka Kontrola, 2012, nr 9, s. 773-778
4. Boczar T., Malec T., Wotzka D. *Studies on Infrasound Noise Emitted by Wind Turbines of Large Power*, Acta Physica Polonica A, November 2012, vol. 122, No. 5
5. Wotzka D., Boczar T., Malec T., Pierzga R. *Analysis of Vibro-Acoustic Signals Generated during Operation of Micro Wind Turbines*, Acta Physica Polonica A, November 2013, vol. 124, No. 3
6. Malec T., Boczar T.: *Analysis of infrasound noise emitted by high-power wind turbine with synchronous generator*, 12th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013, 5-8 May, Wrocław, Poland.
7. Malec T., Boczar T.: *Analysis of infrasound noise emitted by high power wind turbine with asynchronous generator for selected resonant and median frequencies*, 12th IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013, 5-8 May, Wrocław, Poland.
8. Rudno-Rudzińska B., Malec T., Sawa Ł., *Influence of Meteorological Conditions on Effectiveness of Acoustical Screens - Measurements and Computations*, 55th Open Seminar on Acoustics, Wrocław-Piechowice, s.187-192 (2008).
9. Boczar T., Malec T. : *Ocena oddziaływania hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe – charakterystyka zjawiska*, Polskiej Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Szczecin, 2015 - rozdział w monografii Dobry wiatr dla regionów, str. 1-39.
10. Boczar T., Malec T.: *Ekspertyza dotycząca metodyki wykonywania symulacji akustycznych dla farm wiatrowych ze szczególnym uwzględnieniem wpływu gruntu na propagację fali dźwiękowej – ekspertyza dla firmy Gestamp Eolica Polska Sp. z o.o. w Warszawie.*