Politechnika Opolska
Instytut Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej

Mgr inż. Tomasz Malec

Pomiary i analiza sygnałów infradźwiękowych generowanych pracą turbin wiatrowych dużych mocy

Rozprawa doktorska przedłożona
Radzie Wydziału Elektrotechniki,
Automatyki i Informatyki
Politechniki Opolskiej

Promotor: prof. dr hab. inż. Tomasz Boczar

Opole, 2015

Spis treści

1 Wprowadzenie 5

2 Cel, zakres i teza pracy 13

3 Charakterystyka sygnałów infradźwiękowych 17

3.1 Zjawisko generacji i cechy sygnałów infradźwiękowych 17

3.2 Naturalne źródła sygnałów infradźwiękowych 19

3.3 Sztuczne źródła sygnałów infradźwiękowych 21

3.4 Zakres praktycznego wykorzystania infradźwięków 24

3.5 Skutki oddziaływania hałasu infradźwiękowego na organizmy żywe 27

3.5.1 Percepcja słuchowa 29

3.5.2 Percepcja pozasłuchowa 32

3.5.3 Percepcja słuchowa i pozasłucchowa 36

3.6 Infradźwięki emitowane pracą turbin wiatrowych 37

3.6.1 Hałas mechaniczny 38

3.6.2 Hałas aerodynamiczny 39

3.6.3 Hałas infradźwiękowy 40

3.7 Przegląd przepisów prawnych dotyczących oceny szkodliwości hałasu infradźwiękowego 42

3.8 Sposoby ograniczania oddziaływania infradźwiękowego na środowisko 45

4 Przegląd doniesień literaturowych dotyczących tematyki rozprawy 48

5 Dobór układu do pomiaru i analizy infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe 54

5.1 Metodyka wykonywania pomiarów i wyboru punktów referencyjnych 54

5.2 Opis zastosowanej aparatury pomiarowej 57

5.3 Ocena niepewności zastosowanego układu pomiarowego 63

5.4 Eliminacja zakłóceń występujących podczas pomiarów 65

5.5 Metody przetwarzania i analizy zarejestrowanych infradźwięków 67

5.6 Zastosowanie filtrów wagowych do korekcji częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów 69

5.7 Wybór deskryptorów charakteryzujących zarejestrowane sygnały infradźwiękowe 73

6 Wyniki przeprowadzonych pomiarów i ich analiz 75

6.1 Parametry techniczne i lokalizacja badanych turbin wiatrowych 75

6.2 Wyniki analizy częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych..... 83

6.2.1 Wyniki pomiarów badanych turbin 84

6.2.2 Zastosowanie krzywych ważenia 99

6.2.3 Zestawienie porównawcze uzyskanych wyników 105

6.2.4 Aproksymacja uzyskanych zależności częstotliwościowych 112

6.2.5 Rozkłady czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych..... 121

6.3 Wyniki pomiarów tła akustycznego w zakresie niskich częstotliwości 127

6.4 Określenie wpływu prędkości wiatru na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków 132

6.5 Określenie wpływu parametrów meteorologicznych na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków 140

6.6 Ocena wpływu wielkości mocy elektrycznej oddawanej przez turbiny wiatrowe do systemu elektroenergetycznego na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków 148

6.7 Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe różnych mocy z generatorem asynchronicznym i synchronicznym 153

6.8 Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego turbin wiatrowych tego samego typu ale o różnych czasach eksploatacji 163

6.9 Analiza porównawcza sygnałów akustycznych w paśmie infradźwiękowym i słyszalnym 166

7 Modelowanie rozkładów przestrzennych akustycznych sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbiny wiatrowe 173

8 Ocena uzyskanych wyników pod kątem obowiązujących prawnie wartości kryterialnych 178

9 Zalecenia dotyczące metodyki pomiarów infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe 181

10 Wnioski 184

11 Podsumowanie 187

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 wiatrowych 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 przewyższającej 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). Zmiany wielkości mocy zainstalowanych w energetyce wiatrowej przedstawiano w tabeli 1.1.

Tabela 1.1 Wielkość mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych w latach 2004 – 2014, z podziałem na poszczególne kraje, z uwzględnieniem jej przyrostu w ostatnim roku oraz procentowym udziałem w produkcji światowej [3].

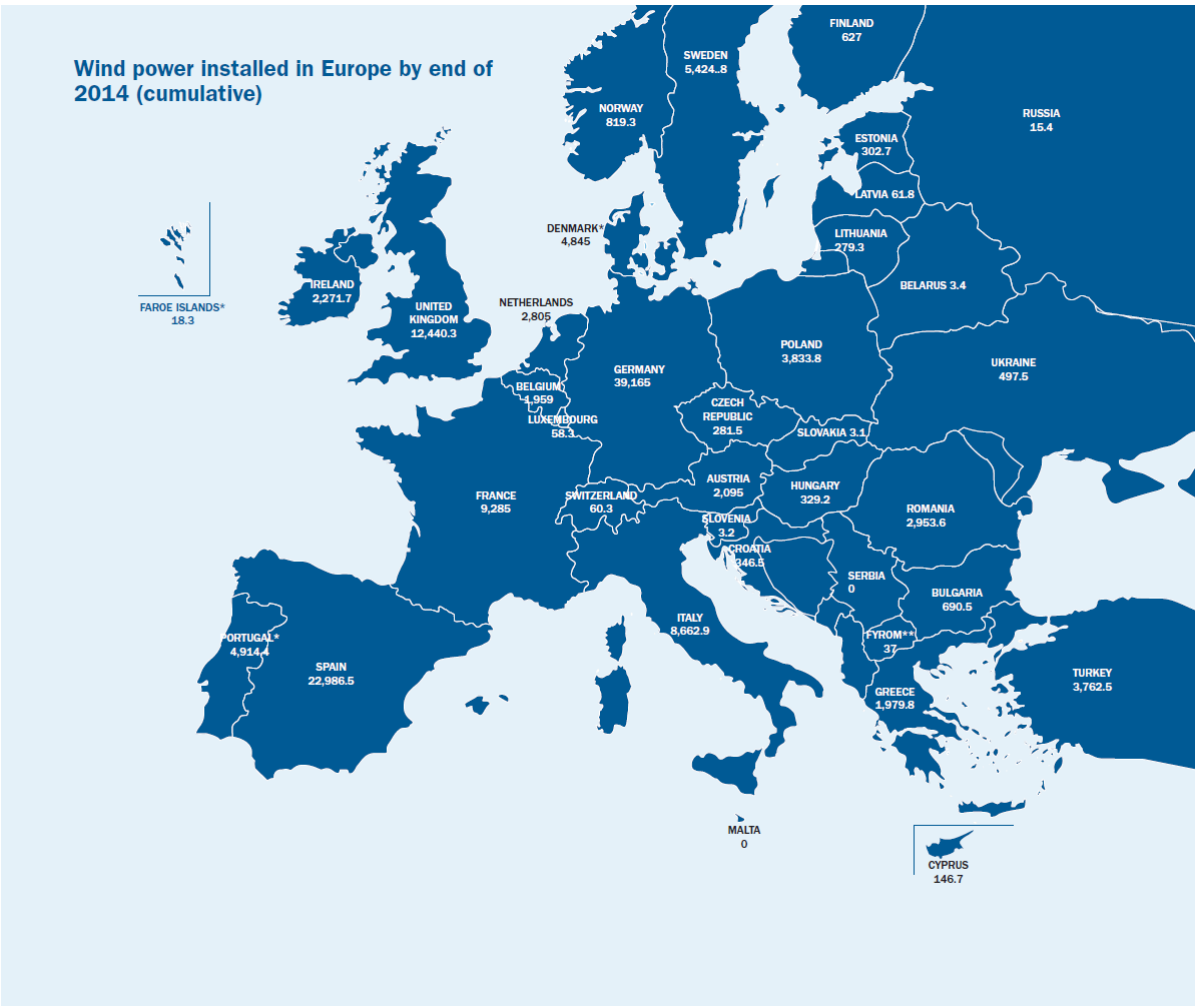
Cumulative installed wind turbine capacity*

Megawatts	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	Change 2014 over 2013	2014 share of total
US	6750	9181	11635	16879	25237	35159	40274	47084	60208	61292	**66146**	7.9%	17.7%
Canada	444	683	1459	1845	2371	3321	4011	5278	6214	7813	**9684**	23.9%	2.6%
Mexico	3	3	86	86	332	453	769	1123	1512	1988	**2510**	26.3%	0.7%
Total North America	7197	9867	13180	18810	27940	38933	45054	53485	67934	71093	**78340**	10.2%	21.0%
Argentina	30	31	31	31	33	33	33	112	166	242	**295**	21.9%	0.1%
Brazil	29	29	237	247	341	606	931	1431	2507	3445	**6228**	80.8%	1.7%
Costa Rica	79	79	79	79	104	129	179	192	207	249	**299**	20.1%	0.1%
Other S. & Cent. America	54	54	56	79	153	321	463	930	1154	1663	**2841**	70.8%	0.8%
Total S. & Cent. America	192	193	403	436	631	1089	1606	2665	4034	5599	**9663**	72.6%	2.6%
Austria	607	820	966	983	997	997	1013	1082	1378	1661	**2072**	24.7%	0.6%
Belgium	106	177	222	297	385	605	955	1147	1444	1720	**1960**	14.0%	0.5%
Bulgaria	–	–	–	41	113	335	488	582	643	650	**660**	1.5%	0.2%
Denmark	3083	3087	3101	3088	3159	3408	3805	3927	4137	4747	**4778**	0.7%	1.3%
Finland	83	85	89	113	113	117	169	178	268	428	**611**	42.8%	0.2%
France	386	775	1585	2471	3671	4775	5940	6811	7626	8207	**9143**	11.4%	2.5%
Germany	16623	18390	20579	22194	23826	25703	27191	29071	31315	34700	**40500**	16.7%	10.9%
Greece	481	603	749	850	997	1155	1323	1634	1749	1865	**1980**	6.2%	0.5%
Hungary	3	17	60	65	162	229	323	357	357	357	**357**	–	0.1%
Ireland	339	498	748	807	1015	1187	1449	1688	1812	2100	**2322**	10.6%	0.6%
Italy	1261	1713	2118	2721	3731	4845	5793	6733	7998	8448	**8556**	1.3%	2.3%
Netherlands	1081	1221	1557	1745	2222	2226	2241	2309	2552	2714	**2876**	6.0%	0.8%
Norway	158	275	328	355	385	390	411	487	683	793	**841**	6.1%	0.2%
Poland	55	65	170	313	472	849	1231	1667	2547	3441	**3885**	12.9%	1.0%
Portugal	585	1087	1716	2150	2829	3474	3837	4214	4363	4557	**4683**	2.8%	1.3%
Romania	–	–	3	15	76	129	470	990	1913	2608	**2962**	13.6%	0.8%
Spain	8462	10013	11595	15155	16699	19160	19715	21160	22722	22898	**22987**	0.4%	6.2%
Sweden	478	554	571	789	1024	1537	2141	2904	3750	4474	**5524**	23.5%	1.5%
Turkey	20	20	50	147	364	792	1320	1729	2261	2760	**3762**	36.3%	1.0%
United Kingdom	889	1336	1955	2477	3406	4424	5397	6458	8894	11209	**12809**	14.3%	3.4%
Other Europe & Eurasia	116	160	246	324	338	565	885	1082	1557	1809	**2078**	14.9%	0.6%
Total Europe & Eurasia	34816	40897	48408	57100	65983	76902	86096	96210	109969	122145	**135346**	10.8%	36.3%
Iran	15	21	48	74	84	92	90	91	91	131	**131**	–	•
Other Middle East	9	9	9	9	9	9	11	13	19	19	**26**	36.8%	•
Total Middle East	24	30	57	83	93	101	101	104	110	150	**157**	4.7%	•
Egypt	146	180	231	310	384	552	552	552	552	634	**694**	9.5%	0.2%
Morocco	54	64	122	124	206	254	263	292	394	495	**795**	60.6%	0.2%
South Africa	3	3	3	3	8	8	10	10	10	10	**570**	5600.0%	0.2%
Tunisia	28	28	28	28	62	160	247	277	277	305	**305**	–	0.1%
Other Africa	3	3	2	4	44	41	41	115	208	498	**514**	3.2%	0.1%
Total Africa	234	278	386	469	704	1015	1113	1246	1441	1942	**2878**	48.2%	0.8%
Australia	421	717	796	972	1587	1886	2084	2476	2834	3489	**4056**	16.3%	1.1%
China	769	1264	2588	5875	12121	25853	44781	62412	75324	91413	**114609**	25.4%	30.7%
India	3000	4430	6270	7845	9655	10926	13065	16179	18420	20150	**22465**	11.5%	6.0%
Japan	991	1159	1457	1681	2033	2208	2429	2595	2673	2722	**2840**	4.3%	0.8%
New Zealand	167	167	170	321	325	467	495	603	603	603	**603**	–	0.2%
Pakistan	–	–	–	–	–	–	–	6	56	106	**256**	141.5%	0.1%
Philippines	–	–	–	–	–	–	–	–	–	66	**216**	227.3%	0.1%
South Korea	69	89	194	235	311	311	342	370	446	506	**553**	9.3%	0.1%
Taiwan	9	24	102	186	250	374	476	523	571	614	**633**	3.1%	0.2%
Thailand	–	–	–	–	–	–	1	10	112	223	**223**	–	0.1%
Other Asia Pacific	47	72	78	78	164	74	93	113	118	123	**123**	–	•
Total Asia Pacific	5473	7922	11655	17193	26446	42099	63766	85287	101158	120015	**146577**	22.1%	39.3%
Total World	**47935**	**59186**	**74089**	**94091**	**121797**	**160139**	**197736**	**238997**	**284646**	**320944**	**372961**	**16.2%**	**100.0%**

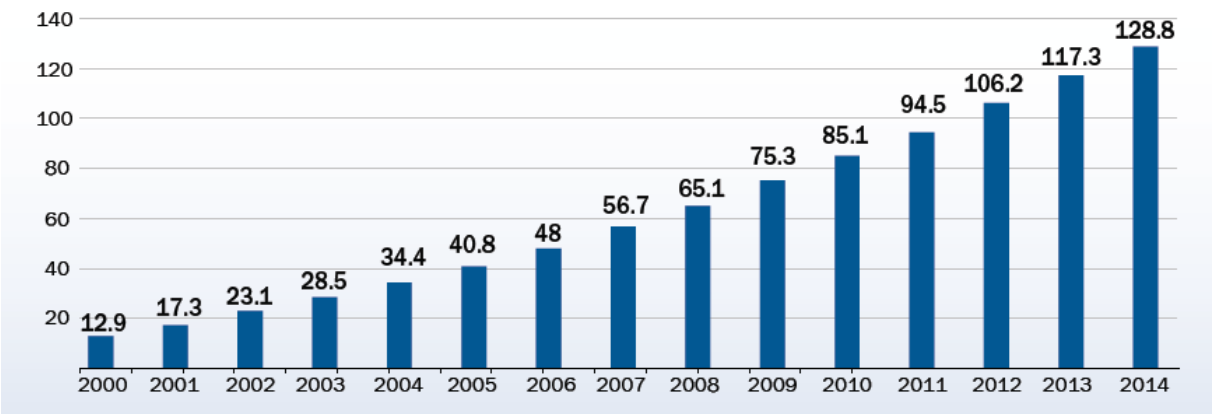
*End of year.
•Less than 0.05%.

Sources: Navigant Consulting, Global Wind Energy Council and national sources.

Na rys. 1.1 przedstawiono skumulowaną wielkość mocy zainstalowanej w poszczególnych krajach Europy w elektrowniach wiatrowych, według stanu na koniec 2014 roku. Natomiast dynamikę zmian przyrostu nowych mocy zainstalowanych w światowej energetyce wiatrowej w latach 2000 -2014 przedstawiono odpowiednio na rys. 1.2.

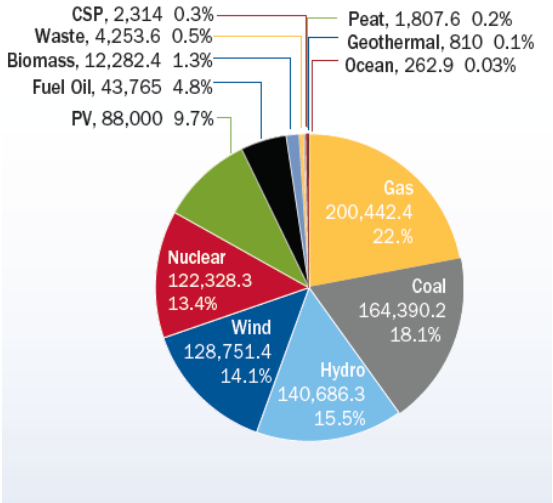


Rys. 1.1 Skumulowana wielkość mocy zainstalowanej , zainstalowanej w europejskiej energetyce wiatrowej na koniec 2014 r., wyrażona w MW [4]



Rys. 1.2 Skumulowana wielkość mocy zainstalowanej w elektrowniach wiatrowych w skali świata w latach 2000 – 2014, wyrażona w GW [4]

Na koniec 2014 roku energia elektryczna wyprodukowana przy wykorzystaniu energii kinetycznej wiatru stanowiła czwarte źródło wytwórcze, z udziałem 14,1 % w całym europejskim rynku energii. Udział poszczególnych źródeł wraz z wielkością mocy zainstalowanych przedstawiono na rys. 1.3



Rys. 1.3 Wielkość mocy zainstalowanej wytwarzanej z różnych źródeł wraz ich udziałem w całkowitym bilansie energetycznym w Europie w 2014 r., wyrażona w MW [4]

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 [5]. 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 [6, 7]. Ocenę uciążliwości hałasu infradźwiękowego przeprowadza się na stanowiskach pracy [8]. W literaturze brak jest całościowego i usystematyzowanego ujęcia tej problematyki, która obejmowałoby 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.

Genezą 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.

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono pomiary hałasu infradźwiękowego w warunkach normalnej eksploatacji turbin wiatrowych, a następnie wykonano

wielowariantowe analizy zarejestrowanych sygnałów. Ich celem było usystematyzowanie stanu wiedzy i opracowanie w oparciu o badania własne oraz publikowane w artykułach naukowych informacje zwartego opracowania traktującego problem hałasu infradźwiękowego turbin wiatrowych dużej mocy w sposób możliwie uporządkowany i całościowy.

Podziału siłowni wiatrowych można dokonać wykorzystując co najmniej kilka podstawowych kryteriów, do których można zliczyć[9, 10, 11, 12]:

- wielkość mocy znamionowej turbiny;
- typ zastosowanego generatora przetwarzającego energię kinetyczną wiatru na energię elektryczną (z generatorem synchronicznym i asynchronicznym);
- położenie osi obrotu wirnika względem kierunku wiejącego wiatru (o poziomej osi obrotu – HAWT (ang. Horizontal Axis Wind Turbines) – ponad 95% stosowanych rozwiązań; z pionową osią obrotu – VAWT (ang. Vertical Axis Wind Turbines);
- sposób wykorzystania produkowanej energii elektrycznej (energetyczne – produkcja energii elektrycznej, mechaniczne - pompy, cieplne-podgrzewanie wody);
- liczbę łopat wirnika (2, 3 i wielopłatowe);
- wielkość rozmiarów geometrycznych;
- wartość i zmienność prędkości obrotowej wirnika (wolnobieżne, średniobieżne i szybkobieżne);
- zmienność prędkości obrotowej wirnika (stała lub zmienna prędkość obrotowa generatora).

Wykorzystywane są w tym zakresie także dodatkowe inne wskaźniki czy wielkości kryterialne [10, 11, 13, 14]. Dla potrzeb realizacji niniejszej dysertacji przyjęto podział w oparciu o wielkość mocy znamionowej turbiny wiatrowej. Z tego punktu widzenia według [10, 11, 14] siłownie wiatrowe można podzielić na trzy podstawowe grupy:

- **mikroelektrownie wiatrowe** – o mocy znamionowej poniżej 100 W, które są najczęściej wykorzystywane do ładowania baterii akumulatorów stanowiących

zasilanie obwodów wydzielonych, w miejscach, gdzie sieć elektroenergetyczna nie występuje lub względy zewnętrzne, najczęściej ekonomiczne, wskazują konieczność wykorzystania innego źródła energii. Takie turbiny można wykorzystać do zasilania przez akumulatory części oświetlenia domu: pojedynczych lamp, a nawet poszczególnych pomieszczeń czy urządzeń AGD.

- **małe turbiny wiatrowe** – o mocy od 100 W do 50 kW, które mogą zapewniać energię elektryczną w pojedynczych gospodarstwach domowych, a nawet w małych zakładach produkcyjnych . W warunkach przydomowych najpopularniejsze są elektrownie o mocy w zakresie (3-5) kW. Moc takich elektrowni, wspomagana energią zmagazynowaną w akumulatorach, wystarczy do zasilania oświetlenia, układów pompowych, a także urządzeń wykorzystywanych w gospodarstwie domowym;
- **duże turbiny wiatrowe** o mocy znamionowej powyżej 100 kW, oprócz tego, że mogą stanowić podstawowe źródło zasilania domów jedno- i wielo-rodzinnych czy przydomowych zakładów produkcyjnych, to wytwarzana energia jest przekazywana do zawodowej sieci elektroenergetycznej i odsprzedawana spółce dystrybucyjnej, z którą producent podpisał stosowną umowę [9, 10, 11, 14, 15].

Należy przy tym zaznaczyć, że w współcześnie powstających farmach wiatrowych są instalowane turbiny wiatrowe o jednostkowych mocach znacznie przewyższających poziom 1 MW. Natomiast największe produkowane obecnie siłownie wiatrowe mają moc 8 MW (Enercon E-126), a pracujące w Polsce odpowiednio 3,5 MW.

Mając na uwadze zapisy definicyjne zawarte w znowelizowanej ustawie Prawo energetyczne, która obowiązuje w Polsce od 11.09.2013 (tzw. Mały trójpak energetyczny), instalacje odnawialnych źródeł energii (OZE) dedykowane dla prosumentów indywidualnych można podzielić na dwa rodzaje:

- **mikroinstalacja** – to OZE o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 40 kW lub o łącznej mocy zainstalowanej cieplnej nie większej niż 70 kW;

- **mała instalacja** – to OZE o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej od 40 kW do 200 kW lub o łącznej mocy zainstalowanej cieplnej powyżej 70 kW do 300 kW.

Jako wartość kryterialną zaliczenia instalacji wiatrowych do grupy małych turbin wiatrowych światowe stowarzyszenie World Wind Energy Association przyjęło zakres mocy od 6 W do 300 kW, przy czym nie wprowadzono oddzielnej kategorii dla mikroturbin wiatrowych[16].

Według International Electrotechnical Commision małe turbiny wiatrowe to instalacje o mocy znamionowej do 50 kW (norma IEC 61400-2, powierzchnia zakreślana wirnikiem nie przekracza powierzchni 200 m^2, moc do 50 kW).

Należy podkreślić, że takie kraje jak: USA, Chiny, Kanada, czy Niemcy wprowadziły własne kryteria podziału, w zależności od wielkości mocy znamionowych, turbin wiatrowych małych mocy, przy czym w przyjętych klasyfikacjach ich moc znamionowa nie przekracza wartości 100 kW. Wprowadzono przy tym pojęcia: mini turbin wiatrowych (Canadian Wind Energy Association – CanWEA) o mocy znamionowej w zakresie od 0,3 do 1 kW, czy turbin wiatrowych średnio-małych o mocy w przedziale od 15 do 100 kW (Renewable UK) [12].

Reasumując, mając na uwadze instalowane obecnie w farmach wiatrowych turbiny wiatrowych, bazujące na nowoczesnych rozwiązaniach technicznych, jako minimalną moc znamionową można przyjąć poziom 1 MW.

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 [8].

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 kilkudziesięciu 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,
- skazano 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

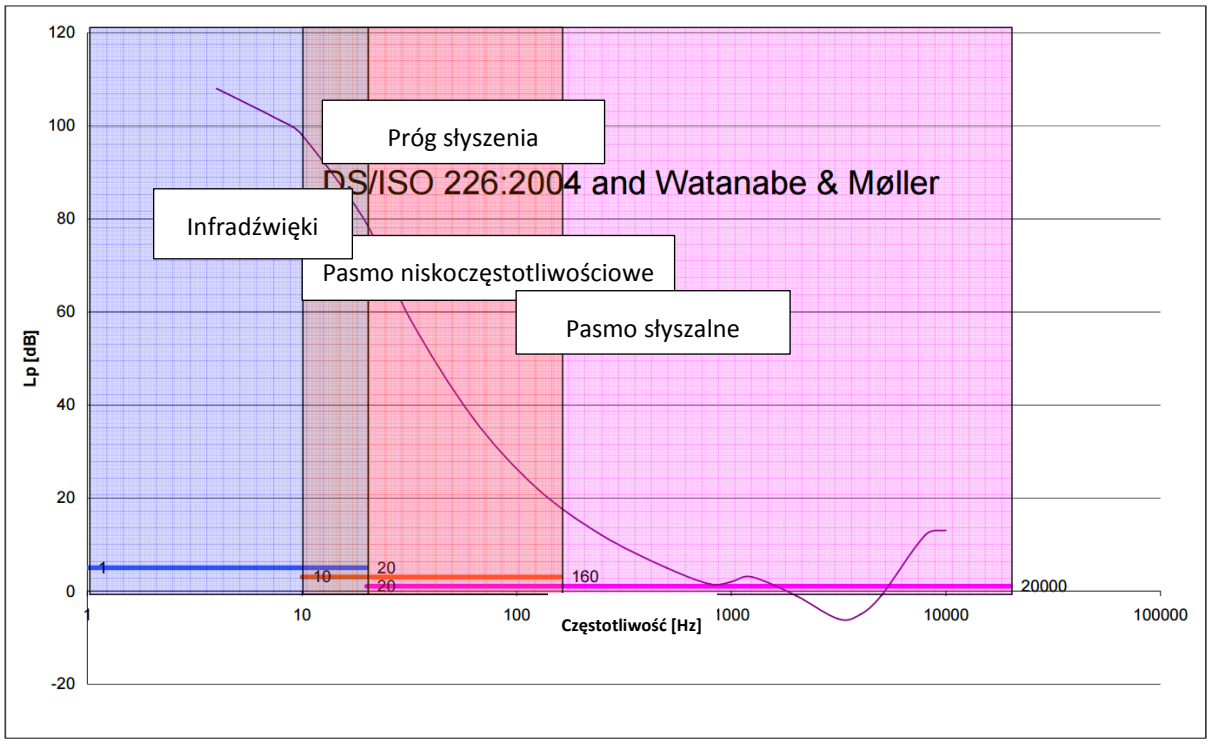
3.1 Zjawisko generacji i cechy sygnałów infradźwiękowych

Sygnały infradźwiękowe to fale dźwiękowe (akustyczne), które powstają w wyniku drgań mechanicznych cząsteczek w ośrodku sprężystym (gaz, ciecz, ciało stałe). Źródłem tych drgań jest ruch mechaniczny (np. membrany), który wywołuje zaburzenie równowagi cząstek znajdujących się w danym ośrodku [17]. 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, zatracane jest 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 [18], 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. Zakresy poszczególnych pasm częstotliwości i odpowiadające im wartości progu słyszenie zaprezentowano na rys. 3.1.



Rys. 3.1 Zakresy częstotliwości sygnałów infradźwiękowych, niskoczęstotliwościowych i słyszalnych oraz przebieg progu słyszenia [19].

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.

Percepcja infradźwięków przez człowieka jest zjawiskiem złożonym i odbywa się drogą słuchową oraz poprzez receptory czucia. Odbiór infradźwięków opisać można jako odczucie ucisku i drgań odbieranych całym ciałem oraz dudnienia w uszach. W większości przypadków ich odbiór odbywa się całym ciałem i objawia się poprzez odczuwanie dyskomfortu i niepokoju. Należy również podkreślić, że pomimo ich niesłyszalności

oddziaływanie infradźwięków może powodować trwałe i szkodliwe zmiany w organizmie ludzkim [20].

Długość rozchodzących się w powietrzu fal infradźwiękowych zawiera się w przedziale od 17 m do 340 m, co w sposób bezpośredni decyduje o rzeczywistym wpływie przeszkód na ich propagację w otwartej przestrzeni. Dla infradźwięków wszystkie obiekty mające wymiary mniejsze od długości ich fal nie stanowią praktycznie żadnej przeszkody. Zjawisko to powoduje, że tłumienie infradźwięków podczas propagacji w powietrzu jest stosunkowo słabe (np.: dla 10 Hz – tłumienie wynosi 0,1 dB/km) i wynika jedynie z odległości między źródłem i odbiornikiem. Z powodu stosunkowo małego tłumienia fale infradźwiękowe charakteryzują się dobrą propagacją, a ich oddziaływanie dla najniższych wartości częstotliwości jest możliwe nawet w odległościach liczonych w dziesiątkach kilometrów. Stosunkowo słabe tłumienie, długość i częstotliwość fali, w połączeniu z możliwością powstawania w pewnych warunkach fal stojących i rezonansu, powoduje, że źródła infradźwięków są w praktyce trudne do dokładnego i jednoznacznego zlokalizowania.

3.2 Naturalne źródła sygnałów infradźwiękowych

Infradźwięki występują w przyrodzie i najczęściej łączą się z dźwiękami normalnie słyszalnymi o niskich częstotliwościach. W środowisku naturalnym główną przyczyną ich powstawania są ruchy powietrza i wody.

Naturalnymi źródłami sygnałów infradźwiękowych są zjawiska występujące w przyrodzie, do których można zaliczyć:

- wiejące z dużymi prędkościami wiatry, które opływając wysokie budynki generują fale infradźwiękowe o natężeniu mogącym przekraczać poziom nawet 100 dB. Podobny efekt powstaje w wyniku wiejących z dużymi prędkościami wiatrów w grotach i pieczarach górskich. Wiejący wiatr napotykając przeszkodę terenową, a następnie opływając ją, przyczynia się do powstania drgań powietrza o częstotliwości zależnej od takich parametrów jak: prędkość przepływu powietrza oraz kształt i wielkość przeszkody;
- fale morskie, które są źródłem fal infradźwiękowych o bardzo niskich częstotliwościach (rzędu 0,2 Hz) [21];

- burze, którym towarzyszą wyładowania atmosferyczne (pioruny);
- duże wodospady (infradźwięki powstają w wyniku rezonansu obszaru między skałą, a płaszczem wodnym);
- lawiny;
- tornada;
- trzęsienia ziemi (fale sejsmiczne);
- wulkany;
- niektóre gatunki zwierząt (słonie, tygrysy, wieloryby);
- zorza polarna (naturalny rezonans jonosferyczny w zakresie infradźwięków);
- bolidy [22, 23, 24].

Poziomy hałasu infradźwiękowego generowanego przez wymienione wyżej źródła zależą głównie od ich wielkości tj. rozmiarów geometrycznych, a także od energii wyzwalającej drgania. Największe wartości poziomu infradźwięków zaobserwowano podczas wybuchu wulkanów i uderzeń meteorytów [25, 26, 27]. Zakres częstotliwości generowanych przez zjawiska występujące w przyrodzie obejmuje całe pasmo infradźwiękowe w zakresie od 0,01 do 20 Hz [28]. Zestawienie porównawcze wielkości i zakresu częstotliwości sygnałów infradźwiękowych generowanych przez naturalne źródła przedstawiono w tabeli 3.1.

Tabela 3.1 Zestawienie porównawcze wybranych naturalnych źródeł infradźwięków z odpowiadającym im poziomem ciśnienia akustycznego i przybliżonym zakresem częstotliwości [25, 29, 30]

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) 110 (25 km/h)
Wodospady	0,5÷20	95÷100
Uderzenie pioruna	1÷10	90÷100

3.3 Sztuczne źródła sygnałów infradźwiękowych

Sztuczne źródła infradźwięków związane są pracą różnego typu urządzeń, środkami komunikacji, a także licznymi procesami technologicznymi. Największe nasilenie ich występowania jest w środowisku pracy oraz w obszarach silnie zurbanizowanych. Podstawowymi źródłami antropogenicznymi infradźwięków są następujące urządzenia i procesy przemysłowe:

- ciężkie pojazdy samochodowe,
- odrzutowce i śmigłowce,
- statki i okręty,
- sprężarki tłokowe, pompy próżniowe i gazowe,
- urządzenia chłodzące i ogrzewające powietrze (klimatyzatory, lodówki),
- młoty kuźnicze,
- wentylatory przemysłowe,
- urządzenia głośnikowe,
- eksplozje,
- rurociągi,
- wieże wiertnicze,
- drgania mostów,
- elektrownie wiatrowe,
- wybuchy atomowe,
- broń akustyczna[31].

Wszystkie wymienione powyżej źródła, z wyłączeniem broni akustycznej, charakteryzują się generacją hałasu infradźwiękowego w połączeniu z hałasem słyszalnym w paśmie niskoczęstotliwościowym, a także średnio- i wysokoczęstotliwościowym. W rzeczywistości najczęściej hałas infradźwiękowy nie występuje samodzielnie i zawsze związany jest hałasem w paśmie słyszalnym [32]. Natomiast o źródle infradźwiękowym można mówić w przypadku, gdy składowe infradźwiękowe mają poziomy znaczenie większe od pozostałych składowych widma [25, 12, 33,27]. Największe poziomy hałasu infradźwiękowego generowane są podczas wybuchów jądrowych i w czasie startów statków

kosmicznych. Zakres wielkości i częstotliwości sygnałów infradźwiękowych generowanych dla wybranych antropogenicznych sztucznych źródeł zostały przedstawione w tabeli 3.2.

Tabela 3.2 Zestawienie porównawcze wybranych sztucznych źródeł infradźwięków z odpowiadającym im poziomem ciśnienia akustycznego i przybliżonym zakresem częstotliwości [34, 35,25]

Źródła antropogeniczne	**Zakres częstotliwości [Hz]**	**Poziom ciśnienia akustycznego [dB]**
Start rakiety w miejscu startu i w odległości 40 km	1÷20	188 (miejsce startu) 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

W przemyśle jednym z głównych źródeł hałasów infradźwiękowych są przepływające z dużymi prędkościami gazy towarzyszące pracy maszyn i urządzeń, do których można zliczyć: sprężarki tłokowe, pompy próżniowe i gazowe, wentylatory przemysłowe, dmuchawy, turbodmuchawy oraz ssawy. Podczas pracy wentylatora powstaje hałas pochodzenia mechanicznego i aerodynamicznego. Do pierwszego typu należą drgania mechaniczne jego elementów składowych, natomiast do drugich zaburzenia strumienia powietrza lub innego gazu przepływającego przez wentylator. Poziom ciśnienia akustycznego występujący na stanowiskach pracy usytuowanych w pobliżu wentylatorów w halach nie przekracza 108 dB. W widmie hałasu wentylatorów dominują składowe w zakresie częstotliwości od 5 do 63 Hz, stanowiące podharmoniczne i harmoniczne wynikające z ich prędkości obrotowej i prędkości przepływu powietrza [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47].

Źródłem hałasu infradźwiękowego w środowisku pracy mogą być również maszyny drogowe, przesiewacze wykorzystywane w młynach zbożowych, a także urządzenia elektrowni konwencjonalnych cieplnych parowych, do których można zaliczyć: młyny węglowe, maszynownie, kominy, kotły i wentylatory kotłowe. Poziomy ciśnienia akustycznego (w pasmach oktawowych o częstotliwościach środkowych w zakresie od 4 Hz do 31,5 Hz), występujące na stanowiskach pracy związanych z wymienionymi wyżej maszynami, najczęściej przyjmują wartości w granicach od 80 dB do 120 dB [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47].

Oprócz wymienionych wyżej urządzeń wykorzystywanych w procesach przemysłowych infradźwięki mogą być także emitowane przez: masy wody w zaporach i kanałach wodnych, drgania mostów, wieże wiertnicze, systemy kanalizacyjne, urządzenia chłodzące i ogrzewające powietrze, rurociągi, wieże chłodnicze, eksplozje, a także wszelkiego rodzaju środki transportu lądowego (samochody w szczególności ciężarówki, autobusy, tramwaje i pociągi), lotniczego oraz wodnego (statki, okręty, promy, kutry, a także szybkie motorówki i jachty dalekomorskie) [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48]. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów hałasów infradźwiękowych w środkach transportu drogowego (autobusach, samochodach ciężarowych) stwierdzono wartości poziomu ciśnienia akustycznego na poziomie ok. 100 dB (w zakresie częstotliwości 12,5 ÷ 20 Hz), który występował we wnętrzu badanych samochodów [49].

Szerokie spektrum źródeł hałasu infradźwiękowego obserwuje się też w lotnictwie. W zakresie prędkości lotu poddźwiękowego najhałaśliwsze są helikoptery generujące infradźwięki zawierające maksima o częstościach odpowiadających liczbie obrotów śmigieł. W zakresie prędkości lotu ponaddźwiękowego najgłośniejsze są samoloty, które przy przekraczaniu bariery dźwięku wytwarzają falę uderzeniową o stosunkowo dużej amplitudzie. Znaczną część składową fali uderzeniowej stanowi energia akustyczna z zakresu infradźwiękowego. Maksimum przenoszonej energii w dużej mierze zależy od wielkości samolotu. Dla przykładu lekkie myśliwce wojskowe powodują fale o maksimum występującym przy częstotliwości ok. 20 Hz. Natomiast dla ciężkich samolotów transportowych i pasażerskich maksimum to przypada przy wartości ok. 2 Hz [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47].

Znaczny poziom hałasu dochodzący nawet do 120 dB, w tym także infradźwiękowy, emitują również odrzutowe silniki lotnicze testowane w hamowniach. Jest to głównie hałas pochodzenia aerodynamicznego, powstający w wyniku mieszania się gazów o różnych prędkościach, oraz w wyniku wypływu strumienia gazu do spokojnej atmosfery [50].

Silna fala uderzeniowa wywoływana jest również podczas wystrzelenia ciężkich rakiet. Podczas startów zdarzały się przypadki, że przy nie sprzyjającym gradiencie temperatury otoczenia, fala akustyczna powodowana podmuchem od startującej rakiety wywoływała uszkodzenia fasad najbliższych zabudowań. Infradźwięki i wibracje występują również podczas startów promów i rakiet przy załogowych lotach kosmicznych, podczas których astronauci eksponowani są na fale akustyczną, której główna część energii znajduje się w zakresie od 1 Hz do 100 Hz [36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46].

Wśród antropogenicznych źródeł hałasu infradźwiękowego istotne są jeszcze źródła komunikacyjne takie jak: transport kolejowy, a także ruch drogowy, które oprócz hałasu wewnątrz pojazdu, mogą wywoływać lokalne pole infradźwiękowe w pasie nawet ok. 200 metrów wzdłuż szlaków komunikacyjnych. Na podstawie wyników przeprowadzonych pomiarów wykazano, że w samochodach osobowych fale infradźwiękowe mogą mieć większe natężenie niż towarzyszący im hałas w zakresie słyszalnym. Źródłem infradźwięków w tych warunkach stają się zawirowania powietrza, szczególnie znaczące w przypadku otwierania okien podczas jazdy samochodem. Dla przykładu przy prędkości poruszania się pojazdu równej 90 km/h, poziom ciśnienia akustycznego może przyjmować wartości w zakresie od 70 do 110 dB, w paśmie częstotliwości od 2 do 250 Hz [51, 52, 53, 54].

3.4 Zakres praktycznego wykorzystania infradźwięków

Pierwszą rejestrację sygnału infradźwiękowego przeprowadzono w 1883 r., podczas wybuchu wulkanu Krakatoa. Jego eksplozja wytworzyła falę infradźwiękową, która kilka razy okrążyła kulę ziemską [55, 25, 27.]. Rejestrację wykonano przy zastosowaniu czułych barometrów wykorzystywanych do pomiarów zmian ciśnienia atmosferycznego. Szacuje się, że poziom ciśnienia powstałego dźwięku w paśmie słyszalnym w odległości 160 km od epicentrum wynosił ponad 180 dB.

Za początek praktycznego wykorzystania sygnałów infradźwiękowych przez człowieka uważa się okres zimnej wojny i lata 50 ubiegłego wieku. Po detonacji pierwszej radzieckiej bomby atomowej w 1949 r., Amerykanie zaczęli poszukiwania skutecznych metod detekcji oraz sposobów dokładnego określania miejsc wybuchów jądrowych. Pomocne w tym zakresie okazały fale infradźwiękowe, ponieważ każdy wybuch generuje dużą ilość energii, której część emitowana jest w postaci fali infradźwiękowej.

Ponieważ fale te ulegają bardzo słabemu tłumieniu podczas propagacji w powietrzu, możliwe było wykonanie rejestracji sygnałów infradźwiękowych generowanych przez wybuchy jądrowe przeprowadzane w odległości nawet kilku tysięcy kilometrów od ich źródła. Dodatkowo dokonując rejestracji w kilku zlokalizowanych w różnych miejscach stacjach pomiarowych, możliwe było dokładne określenie lokalizacji obszaru wybuchu i jego siły, na podstawie różnic w czasach dojścia do nich rejestrowanych sygnałów. Dzięki rozwojowi amerykańskiego programu atomowego został opracowany system, który na podstawie wyników analizy widm sygnałów infradźwiękowych powstających podczas wybuchów oraz opracowanych w trakcie próbnych wybuchów modeli matematycznych, umożliwiał dokładną lokalizację miejsca detonacji wybuchu, określenie jego siły i rodzaju eksplozji (podziemna, podwodna, powietrzna, powierzchniowa). Po podpisaniu układu o zakazie prób broni jądrowej w 1963 r. znaczenie badań prowadzonych przez Amerykanów malało, a systemy pomiarowe wykorzystywane dotychczas do celów wojskowych zaczęto stosować w badaniach źródeł infradźwięków występujących w przyrodzie. Prowadzone w tym zakresie badania przyczyniły się do identyfikacji wielu naturalnych źródeł sygnałów infradźwiękowych. Zestawienie wybranych naturalnych źródeł sygnałów infradźwiękowych, wraz z ich potencjalnym zastosowaniem oraz obszarami wymagających dalszych badań zostało przedstawione w tabeli 3.3 [55].

Tabela 3.3 Naturalne źródła infradźwięków ich potencjalne zastosowania i możliwe obszary prowadzenia dalszych badań [55].

Źródło sygnałów infradźwiękowych	**Możliwe praktyczne zastosowanie**	**Obszary dalszych badań**
Lawiny	Określanie miejsc zejścia, głębokości, czasu trwania oraz statystyk występowania	Stworzenie bazy typów lawin z podziałem na wielkość i typ
Meteoryty	Określanie wysokości, kierunku i typu wejścia w atmosferę oraz wielkości i miejsca wybuchu	Estymacja szacunkowych wielkości i typów, określanie stopnia rozpadu oraz klasy objętości
Fale morskie i oceaniczne	Lokalizacja obszarów interakcji fal, określanie wielkości i widma fal	Monitorowanie powstawania sztormów na morzu, badania dotyczące lokalnych interakcji fal
Sztormy	Określanie lokalizacji i ich wielkości	Studia nad fizyką procesów zachodzących podczas sztormu, opracowanie modelu propagacji akustycznej
Tornada	Detekcja i ostrzeganie, określanie lokalizacji, określanie wielkości rdzenia oraz kształtu leja dla krótkich okresów	Studia nad formowaniem tornad, poszukiwanie infradźwiękowych deskryptorów tornad
Turbulencje	Zapobieganie wlatywania samolotów, szacowanie wysokości, określanie siły i zasięgu oraz miejsc występowania	Rozróżnienie procesów rozrodczych, opracowanie praktycznych systemów wykrywania
Trzęsienia ziemi	Pomiary fal Rayleigha, pomiary dźwięku od epicentrum oraz pośrednich punktów promieniowania	Poszukiwanie infradźwiękowych znaczników oraz połączeń akustyczno-sejsmicznych
Wulkany	Szacowanie lokalizacji i ilości energii uwalnianej podczas wybuchu	Określenie powiązań między infradźwiękami i wstrząsami sejsmicznymi

W przypadku badań nad zjawiskiem powstawania lawin wdrożono próbnie system monitoringu fal infradźwiękowych na autostradzie w pasie gór Teton w stanie Wyoming (USA). Jego podstawowym zdaniem jest wczesne ostrzeganie przed możliwością powstania lawin [56].

Infradźwięki i dźwięki niskiej częstotliwości są również wykorzystywane w muzyce i szeroko pojętym przemyśle rozrywkowym. W tym przypadku wykorzystano sposób, w jaki ludzie odbierają obecność infradźwięków. Chodzi przede wszystkim o wytworzenie i podkreślenie nastroju w muzyce (tzw. „głos boga"), a także wywołanie efektu grozy oraz strachu.

3.5 Skutki oddziaływania hałasu infradźwiękowego na organizmy żywe

Hałas infradźwiękowy oddziałuje na narząd słuchu, organy wewnętrzne, układ oddechowy, nerwowy i naczyniowo-wieńcowy [57, 58, 59]. Jest on odbierany w organizmie specyficzną drogą słuchową (głównie przez narząd słuchu), a poza nią przez receptory czucia wibracji, szczególnie w mięśniach, ścięgnach i stawach oraz bezpośrednio na skórze. Progi tej percepcji znajdują się mniej więcej o (20÷ 30) dB wyżej niż progi słyszenia (wartość ciśnienia akustycznego, przy której zaczyna się słyszenie określonych dźwięków). Ich słyszalność zależy przede wszystkim od poziomu ciśnienia akustycznego oraz od długości czasu ekspozycji. Zatem im wyższy jest poziom ciśnienia akustycznego i dłuższy czas narażenia na hałas w tym infradźwiękowy, tym jest on bardziej szkodliwy.

Historia badań oraz szczegółowy opis możliwych skutków oddziaływania infradźwięków na człowieka zostały szeroko opisane m.in. w pracy [25].

Badania dotyczące percepcji infradźwięków zostały zapoczątkowane w latach 30 ubiegłego wieku. Ich celem były określenie wielkości progów słyszenia (60). Natomiast największa liczba prac naukowo-badawczych dotyczących skutków ich oddziaływania na organizmy żywe była prowadzona w latach 70 i 80 XX wieku, kiedy to Rosjanie i Amerykanie prowadzili badania w ramach programu lotów kosmicznych. Ich celem było zbadanie potencjalnego narażenia astronautów przy dużych i krótkotrwałych natężeniach infradźwięków generowanych podczas startów rakiet. Prace badawcze prowadzono w warunkach laboratoryjnych, gdzie kontrolowane były wszystkie parametry modelowanych

źródeł sygnałów infradźwiękowych. Badano także rzeczywiste źródła infradźwięków, emitujące hałas w pełnym paśmie częstotliwości od infradźwiękowych do słyszalnych. W dużej części uzyskane wówczas wyniki pozostają nadal utajnione, dostępne są jedynie cząstkowe informacje prezentowane przez naukowców podczas międzynarodowych konferencji. Wynika to głównie z zastosowanej metodyki prowadzonych badań, których rezultaty, a przede wszystkim sposób ich uzyskania mogłyby być obecnie zakwestionowane przez medyczne komisje etyczne. Z opublikowanych informacji wynika, że badano małe i związku z tym nie do końca reprezentatywne grupy ludzi, które poddano stosunkowo krótkotrwałym ekspozycjom, przy poziomach generowanych infradźwięków dochodzących nawet do 170 dB [61, 26, 25]. Głównym celem prowadzonych badań było określenie czy podczas startu rakiety człowiek zachowa zdolność koncentracji i możliwość wykonywania jakichkolwiek zadań oraz czy czynności fizjologiczne organizmu ludzkiego nie zostaną zaburzone w sposób zagrażający życiu. Wyniki badań przeprowadzonych przez dwie niezależne grupy naukowców, które zostały zaprezentowane w roku 1973 na konferencji w Paryżu, jednoznacznie sugerowały, że ekspozycja na infradźwięki o poziomie powyżej 180 dB grozi śmiercią, a odpowiednio ekspozycja dwuminutowa o poziomie w zakresie od 150 do 172 dB jest tolerowana. Natomiast wielogodzinna ekspozycja na poziomy z zakresu (120÷ 140) dB wywołuje zmęczenie i może powodować zaburzenia zdrowotne [25].

Celem większość badań, których wyniki prezentowane są w czasopismach naukowych było określenie wpływu infradźwięków i hałasu niskoczęstotliwościowego na organizm człowieka. W szczególności wykonywano badania w warunkach laboratoryjnych w celu oceny ich wpływu na narząd słuchu i równowagi, stopień znużenia oraz zachowanie możliwości wykonywania określonych zadań [25]. Do tej pory jest stosunkowo mało publikacji poświęconych skutkom zdrowotnym długotrwałej ekspozycji zawodowej na hałas w zakresie niskich częstotliwości. Badania w tym zakresie były prowadzone głównie wśród kierowców i pracowników lotnictwa oraz osób eksponowanych na hałas komunikacyjny z udziałem składowych niskoczęstotliwościowych [25, 62, 63, 64].

Problem hałasu infradźwiękowego o długim czasie ekspozycji i stosunkowo małych poziomach jest najmniej przebadanym zjawiskiem, które z racji coraz większej liczby źródeł, które mogą znajdować się zarówno w środowisku pracy, jak również w środowisku ogólnie

dostępnym (transport drogowy, lotniczy, wodny, elektrownie wiatrowe, itd.), jest obecnie powodem zwiększonego zainteresowania tym zagadnieniem.

3.5.1 Percepcja słuchowa

Podstawowym problemem przy określeniu progów słyszenia infradźwięków jest zanik rozróżniana tonalności dźwięków. Odbiór sygnałów infradźwiękowych przez narząd słuchu opisywany jest jako ucisk w uszach, trzaskanie, sapanie, świstanie, dudnienie, czy pulsowanie [65, 66, 25]. Spowodowane jest to głównie poprzez zachodzenie zjawisk nieliniowych w uchu środkowym, w wyniku których powstają zniekształcenia w paśmie słyszalnym [67]. W pracy [66] przedstawiono przegląd wyników badań dotyczących problematyki określenia wartości progu słyszenia infradźwięków. Natomiast w tabeli 3.4 przedstawiono zestawienie wartości średnich progów słyszenia dla określonych poziomów częstotliwości w zakresie infradźwięków.

Tabela 3.4 Średnie wartości progów słyszenia w paśmie (1 – 20) Hz [25]

Badane progi	**Częstotliwość [Hz]**							
	1	**2**	**4**	**8**	**10**	**12,5**	**16**	**20**
Wartości średnie progów słyszenia prezentowane przez Mollera i Pedersena [66], wyrażone w dB	122	115	108	98	92	89	82	74
Progi słyszenia według Watanabe i Moller [68], wyrażone w dB			108	100	97	92	88	79

Pomimo licznych publikacji naukowych prezentujących uzyskane w tym zakresie wyniki, uzyskane wartości progów słyszenia nie zostały wprowadzone zarówno do norm krajowych, jak również międzynarodowych, analogicznie jak to jest w przypadku dźwięków w paśmie słyszalnym [69].

Zgodnie z obecnym stanem wiedzy, udokumentowanym licznymi pracami badawczymi, percepcja infradźwięków drogą słuchową stanowi podstawowy sposób ich odbioru [66]. Autorzy niektórych pozycji literaturowych, podejmujących tematykę określenia stopnia uciążliwości wywołanej infradźwiękami sugerują, że może być ona bezpośrednio związana z ich percepcją [70]. Jak wykazuje Moller [66] nie stwierdza się znaczących różnic między progami słyszenia kobiet i mężczyzn. Jedynie po 50 roku życia próg słyszenia podnosi się o około 6 dB [71, 72]. Jednocześnie część populacji wykazuje zwiększoną wrażliwość charakteryzującą się progiem słyszenia mniejszym o około 10 dB od jego wartości uśrednionej [25].

W akustyce, oprócz progu słyszenia, wyróżnia się także pojęcie progu bólu, który dla częstotliwości infradźwiękowych zmienia się w zakresie poziomu ciśnienia nie ważonego krzywymi od 135 dB dla 50 Hz, przez 145 dB dla 20 Hz, 155 dB dla 5 Hz do odpowiednio 165 dB dla 2 Hz [25]. Jego wystąpienie jest ostatnim ostrzeżeniem przed zagrożeniem bezpośredniego uszkodzenia narządu słuchu. Odstęp między wartościami progu słyszenia i bólu w paśmie infradźwiękowym znacznie się zawęża do (30 ÷ 40) dB dla najniższych częstotliwości (1 ÷ 5) Hz, podczas gdy w paśmie (1000 ÷ 5000) Hz odstęp ten wynosi (120 ÷ 140) dB [73]

Długotrwała ekspozycja na hałas infradźwiękowy może powodować trwałe lub czasowe zmiany w narządzie słuchu, objawiające się podwyższeniem progów słyszenia. Trwałe skutki ekspozycji zostały słabo przebadane i w literaturze przedmiotu można spotkać opisy tylko dwóch tego typu przypadków. Przy czym oba dotyczą sytuacji występowania ekspozycji jednocześnie na hałas infradźwiękowy i słyszalny [25]. W większości prezentowanych badań opisywane są jedynie czasowe zmiany progu słyszenia (TTS), które występowały po ekspozycji na hałas infradźwiękowy. Zestawienie uzyskanych w tym zakresie wyników przedstawiono w tabeli 3-5.

Tabela 3.5 Zestawienie wyników badań czasowego przesunięcia progu słyszenia (TTS), które zostały stwierdzone po ekspozycji na sygnały infradźwiękowe [25]

Ekspozycja	**Czasowe zmiany progu słyszenia (TTS)**	**Czas powrotu**	**Piśmiennictwo**
Maszynownia okrętu	podwyższenie progu słyszenia	kilka godzin po	Tonndorf 1950 (cyt.

podwodnego ze składowymi (10 ÷ 20) Hz, poziom nie podany	ustalony na podstawie czasu, w jakim kamerton zaczął być słyszany	zakończeniu ekspozycji	za Johnson 1982)
Ekspozycja 2-minutowa na dźwięki z zakresu (10 ÷ 20) Hz o poziomach (150 ÷ 154) dB;	brak TTS po 1 h		Mohr i in. 1965
Ekspozycja 3-minutowa, (7 ÷ 12) Hz, (119 ÷ 144) dB	TTS w paśmie (3 ÷ 6) kHz (10 ÷ 22) dB u 11 osób z 19 eksponowanych	powrót do 30 min	Jerger i in. 1966 (cyt. za Johnson 1982)
26 s, (1 ÷ 10) Hz, 171 dB, 1 osoba	TTS = 0		Johnson 1973 (cyt. za Johnson 1980)
7 Hz, 168 dB, 1 osoba	TTS = 0		
5 min, 7 Hz, 155 dB, 2 osoby	TTS = 0		
30 min, 4, 7 i 12 Hz, 140 dB, 1 osoba	TTS w paśmie (2 ÷ 6) kHz rzędu (14 ÷ 17) dB	do 30 minut	
5 min, 4; 7 i 12 Hz, 140 dB, 8 osób	TTS = 8 dB u 1 osoby	do 30 minut	
5 min, 0,6; 1,6 i 2,9 Hz, 135 dB, 12 osób	TTS = 0		
5 min, 0,6; 1,6 i 2,9 Hz, 126 dB, 11 osób	TTS = 0		
5; 10; 15; 20; 25 i 30 min, 14 Hz, 140 dB, 3 osoby	TTS = 20 ÷ 25 dB u 1 osoby	do 30 minut	Nixon 1973 (cyt. za Berglund 1996)
15 min, 7 Hz, 142 dB, 16 osób	TTS = 0		Nixon 1973 (cyt. za

			Berglund 1996)
8 i 24 h, 63; 125 i 250 Hz, 84 i 90 dB	TTS (7 ÷ 15) dB dla 24-godzinnej ekspozycji o poziomie 84 dB TTS (13 ÷ 18) dB dla 8-godzinnej ekspozycji o poziomie 90 dB	powrót do 48 h	Mills i in. 1983 (cyt. za Berglund 1996)

Zagrożenie dla narządu słuchu zależne jest od poziomu i czasu ekspozycji. Przyjmuje się, że dla ekspozycji o wartości 150 dB i czasu trwania do 30 minut lub ekspozycji o poziomie 118 dB i odpowiednio czasu trwania do 24 godzin, nie ma zagrożenia dla narządu słuchu [67]. W przypadku hałasu w zakresie słyszalnym przyjmuje się, że TTS może być predyktorem trwałych zmian słuchu. W celu potwierdzenia takich zależności oddziaływania w zakresie infradźwięków należałoby przeprowadzić szersze badania, na zróżnicowanej i większej liczbie ludzi. Przeprowadzone do tej pory badania, z powodu małych liczebności populacji, nie mogą stanowić podstaw do formułowania tego typu wniosków.

3.5.2 Percepcja pozasłuchowa

Podstawowe informacje historyczne dotyczące badań nad pozasłuchową percepcją sygnałów infradźwiękowych zostały przedstawione w pracy [25].

Wzrost zainteresowania skutkami ekspozycji na infradźwięki związany był z rozpoczęciem na przełomie lat 50-60 ubiegłego wieku programów badań kosmicznych w Stanach Zjednoczonych i Związku Radzieckim. Związane to było z rejestrowaniem podczas startów pojazdów kosmicznych poziomów dźwięku dochodzących do 180 dB bezpośrednio w otoczeniu platformy startowej, których maksimum energii zlokalizowane było w zakresie niskich częstotliwości. Brak wiedzy na temat wpływu tak dużej energii akustycznej na organizm człowieka zapoczątkował podjęcie w tym zakresie intensywnych badań naukowych. Już na początku lat 50 ubiegłego wieku, zaobserwowano, że wysokie poziomy infradźwięków prowadzą do zaburzeń równowagi. Ponieważ silniki rakietowe i odrzutowe oprócz hałasu infradźwiękowego emitują hałas niskoczęstotliwościowy oraz wyższe składowe częstotliwościowe, przeprowadzenie badań w zakresie oddziaływania tylko infradźwięków wymagało utworzenia wysoko specjalistycznych laboratoriów, w których w ściśle kontrolowanych warunkach, możliwe było przeprowadzanie badań naukowych. Dla tych potrzeb w latach 60 XX wieku utworzono w Stanach Zjednoczonych Aerospace Reaserch

Laboratories, w którym zainstalowano komorę The Dymanic Pressure Chamber, AMRL High Intensity Sound System oraz specjalistyczne stanowisko badawcze NASA/Low Frequency Noise Facility. Podobne badania były prowadzone w Związku Radzieckim [11, 61 26]. Na podstawie uzyskanych wyników dokonywano ocen zarówno obiektywnych (typu zapis EKG), jak również o charakterze subiektywnym (typu orientacja przestrzenna) tolerancji ludzi na hałas infradźwiękowy. Stwierdzono, że przy ekspozycjach rzędu (131 ÷ 153) dB w zakresie (3 ÷ 23) Hz i przy czasie ekspozycji do 1 h, występują głównie zmiany pozasłuchowe. Wśród głównych dolegliwości, jakie były zgłaszane przez badane osoby były: wibracje ścian klatki piersiowej, zaburzenia rytmu oddychania, odczucie zatykania ust, ból głowy, kaszel, zaburzenia widzenia oraz zmęczenie [61].

Przy percepcji pozasłuchowej odbiór fal infradźwiękowych odbywa się w wyniku wnikania do organizmu wibracji. W celu opisu tego zjawiska, ciało ludzkie traktuje się jako układ połączonych sprężyście mas o różnych częstotliwościach rezonansowych dla poszczególnych narządów i części ciała. Ponieważ częstotliwości drgań własnych większości struktur w organizmie znajdują się w zakresie niskich częstotliwości, możliwe jest wprawienie ich w rezonans podczas ekspozycji na hałas infradźwiękowy. Jak wykazały prowadzone badania infradźwięki są odbierane przez receptory czucia wibracji. Progi percepcji tą drogą są o mniej więcej (20 – 30) dB wyższe niż progi słyszenia [70].

W przypadku wibracji o częstotliwościach mniejszych niż 2 Hz ciało reaguje jak całość, natomiast w przypadku wyższych częstotliwości pojawiają się zjawiska rezonansowe. Częstotliwości rezonansowe poszczególnych części ciała wywoływane ekspozycją na wibracje dla większości narządów są mniejsze od 20 Hz. Wyjątek stanowią: głowa (30 Hz), gałki oczne (60 ÷ 90 Hz) i dłonie (30 ÷ 50 Hz), dla których próg ten jest przekroczony.

Na podstawie wyników badań prezentowanych w pracy [74] stwierdzono, że wiele osób eksponowanych na duże poziomy infradźwięków, rzędu (140 – 150) dB, odczuwa uczucie wibracji organów wewnętrznych, a większość tych wibracji odczuwanych jest w klatce piersiowej i okolicach brzucha [61]. Badania, których rezultaty zaprezentowano w pracach innych naukowców [25, *75*, 61 *76*, *77*] wykazały, że dopiero dla infradźwięków o wartościach powyżej poziomu 130 dB, możliwe jest wywołanie odczucia wibrowania ciała, a jego wielkość zależna jest od współczynnika masy ciała. Wraz ze wzrostem poziomu

infradźwięków (do 150 dB) pojawiają się takie objawy jak: bóle głowy, oznaki zmęczenia, uczucie łaskotania i duszenia w gardle prowokujące kaszel oraz modulacje amplitudowe głosu. W tabeli 3-6 przestawiono podsumowanie wyników badań zaprezentowanych w publikacji [57].

Tabela 3.6 Skutki ekspozycji człowieka na infradźwięki o poziomach powyżej 130 dB [57, cyt. za 25]

Eksponowana część ciała	Częstotliwość, [Hz]	Skutek
Całe ciało	poniżej 2	ruch całego ciała
Wszystkie narządy	4	uczucie wibrowania wszystkich narządów jamy brzusznej, płuc i ścian klatki piersiowej
Całe ciało	5	główny rezonans, największy dyskomfort
Narządy	7	zniszczenie struktury narządów
Głowa	4	rezonans
Głowa	2 ÷ 20	rezonans powodujący dyskomfort
Gardło	10 ÷ 20	głos może drżeć
Oczy	15 ÷ 60	zamazanie ostrości widzenia
Gałka oczna	1 ÷ 100, głównie powyżej 8, silnie 20 ÷ 70 ????	trudności w widzeniu
Płuca	40 ÷ 60	ciśnienie wewnętrzne przeciwdziała ruchowi klatki piersiowej i jamy brzusznej

Jak wykazano na podstawie prezentowanych w artykułach naukowych wyników przeprowadzonych badań, infradźwięki w zakresie częstotliwości (1 ÷ 100) Hz i poziomie ciśnienia akustycznego rzędu (140 ÷ 160) dB, już przy bardzo krótkim czasie oddziaływania, są w stanie wywołać u większości osób dezorientację, silne bóle i zawroty głowy, mdłości i wymioty, zaburzenia równowagi, zaburzenia pamięci i funkcji wzroku, dzwonienie i uczucie ucisku w uszach, a także stany lękowe oraz depresje. Efekt ten wykorzystuje się przy zastosowaniu tzw. pocisków akustycznych [*78*].

Głównym efektem oddziaływania infradźwięków na organizm człowieka, spotykanym zarówno w ekspozycji zawodowej, jak również w środowisku ogólnie dostępnym, jest ich wpływ na sprawność psychomotoryczną i komfort psychiczny [79, 80, 81, 82, 83, 84]. Na podstawie wyników badań kierowców eksponowanych na infradźwięki o częstotliwościach w zakresie (2 ÷ 200) Hz i poziomach ciśnienia akustycznego (115 ÷ 120) dB stwierdzono wydłużenie czasu reakcji o (30 ÷ 40) % w teście sprawności psychomotorycznej, a także dodatkowo uczucie senności [85].

Generalnie pozasłuchowe skutki ekspozycji na hałas niskoczęstotliwościowy są identyfikowalne ale dokładny ich wpływ na człowieka w zależności od czasu ich ekspozycji, poziomu ciśnienia akustycznego oraz częstotliwości, nie jest precyzyjnie określony. W szczególności brak jest wyników badań uzyskanych dla długotrwałej ekspozycji w warunkach rzeczywistych, poza laboratorium. Brakuje także badań w zakresie ekspozycji na infradźwięki o umiarkowanych poziomach ciśnienia akustycznego (poniżej, poziomów badanych w aeronautyce) [25].

Oprócz wyżej opisanych skutków ekspozycji na hałas infradźwiękowy, w doniesieniach literaturowych, można spotkać opis jednostki chorobowej określonej jako choroba wibroakustyczna (VAD). Pojęcie to wprowadził zespół portugalskich badaczy pod kierownictwem Nuno Castelo Branco i Marainy Alves-Pereira [86, 87], którzy na podstawie przeprowadzonych badań personelu technicznego lotniczych zakładów produkcyjno-naprawczych Portugalskich Sił Powietrznych stwierdzili znacznie częstsze występowanie u nich napadów padaczki w porównaniu do całej populacji mieszkańców Portugali (10% vs 0,2%)[25]. Zgodnie z definicją podaną przez autorów tej jednostki chorobowej, VAD jest chorobą całego organizmu wywołaną ekspozycją na hałas niskoczęstotliwościowych o częstotliwościach do 500 Hz, która wywołuje powiększenie (przerost) substancji międzykomórkowej, objawiającej się zgrubieniem struktur sercowo-naczyniowych oraz włókien w płucach. Według autorów główną przyczyną choroby jest długotrwała ekspozycja, która jest niezależna od parametrów sygnału tj.: częstotliwości i poziomu ciśnienia akustycznego**.** Przy czym, Autorzy rozróżniają trzy etapy choroby, w zależności od długości czasu ekspozycji. Objawami VAD są inne jednostki chorobowe, które według badaczy są skutkiem choroby wibroakustycznej. Analizując doniesienia literaturowe z ostatnich 25 lat, tj.

od momentu wprowadzenia pojęcia choroby VAD, jedynym źródłem informacji o jej przyczynach i objawach są jedynie jej odkrywcy. Brak jest natomiast wyników badań prezentowanych przez inne ośrodki naukowe, które potwierdziłyby sformułowane przez nich wnioski [25]. Dodatkowo do oceny hałasu infradźwiękowego wykorzystywane są poziomy hałasu ważone krzywą korekcyjną A, którą stosuje się do opisu hałasu w paśmie słyszalnym, co znacząco obcina pasmo niskich i infradźwiękowych częstotliwości. Ponadto w większości przypadków obaj badacze bazowali na ekspozycji bez stopniowania jej dawki, która jak wykazują inni naukowcy, znacząco wpływa na oddziaływanie infradźwięków na człowieka. Mając na uwadze bieżący stan wiedzy wynikający z prowadzonych badań nad chorobą wibroakustyczną VAD brak jest podstaw do jednoznacznego sformułowania hipotezy o szkodliwym wpływie na organizm człowieka wyłącznie sygnałów infradźwiękowych i hałasu niskoczęstotliwościowego. Istnieje natomiast potrzeba przeprowadzenia wszechstronnych i wieloośrodkowych badań nad oddziaływaniem infradźwięków na organizm człowieka, w szczególności mając na uwadze liczne prace dotyczących wpływu hałasu infradźwiękowego na pozasłuchowe zmiany w organizmie [25, 73, 88, 89, 90,].

3.5.3 Percepcja słuchowa i pozasłucchowa

Podstawą reakcją człowieka na długotrwałą ekspozycję na hałas infradźwiękowy jest rozdrażnienie i irytacja, co jest przyczyną dodatkowych skutków ubocznych. Przy czy poziom irytacji zależy od poziomu i intensywności sygnałów infradźwiękowych, ich zmian w czasie, impulsywności, a także wartości częstotliwości.

Skala efektów odczuwanych przez człowieka zależy o poziomu ekspozycji, który można podzielić na kilka charakterystycznych zakresów:

- poniżej 90 dB: brak jakichkolwiek reakcji,
- 115 dB: odczucie zmęczenia, apatii, ucisk w brzuchu, u niektórych osób występuje nadciśnienie,
- 120 dB: próg bólu przy 10 Hz,
- powyżej 120 dB: ekspozycja 24 godzinna powoduje uszkodzenia fizjologiczne[25].

Należy podkreślić, że w dostępnej literaturze naukowej nie ma żadnych dowodów nawet najsłabszej kategorii tzw. EVB (ang. Evidence Based Medecine) – medycynie opartej na dowodach naukowych, że ekspozycja na infradźwięki poniżej progu percepcji wywołuje jakiekolwiek skutki fizjologiczne i psychologiczne [25].

Podsumowując, hałas infradźwiękowy o poziomie poniżej 90 dB nie jest odczuwalny przez większość społeczeństwa, a w przypadku osób szczególnie wrażliwych wartością graniczna jest 85 dB.

3.6 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 dużych 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. „wdechy”, „pompowanie”, „dudnienie”);
- **impulsowe:** dźwięki w postaci krótkich impulsów zmiennych w czasie, powodowane głównie niejednorodnością w atmosferze i różnicą dróg pokonywanych przez falę akustyczną [91].

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.

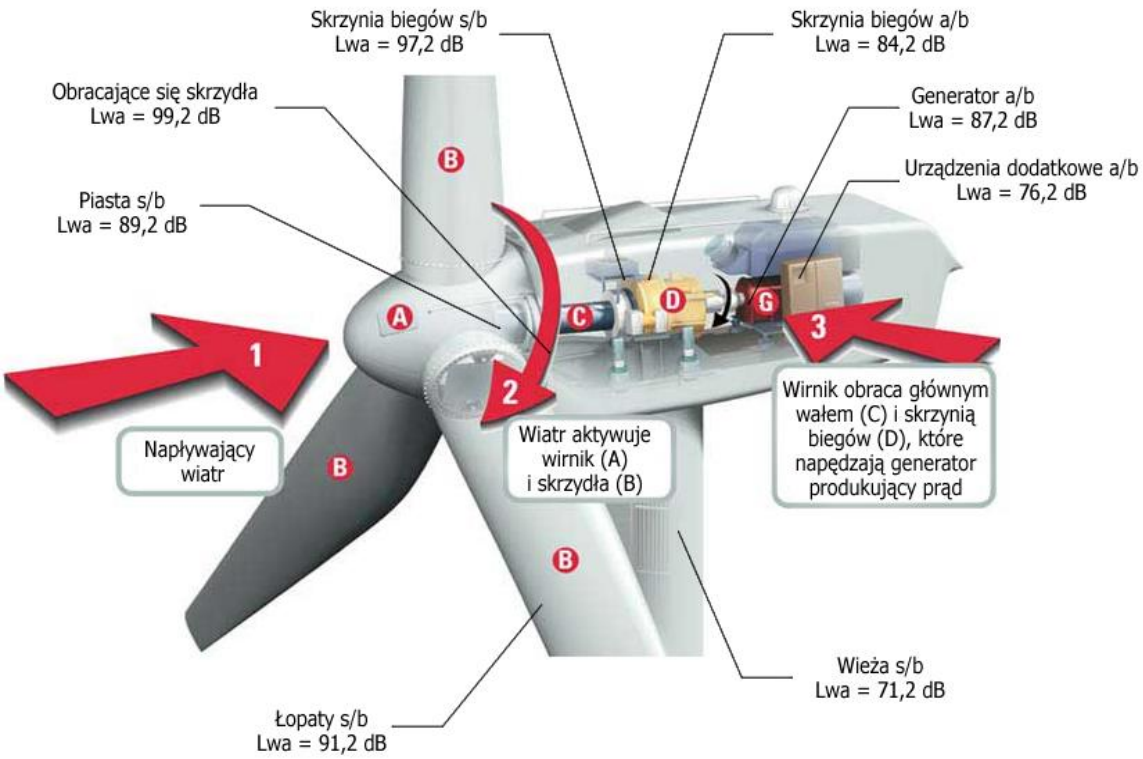
Szczegółowy opis zjawiska generacji dźwięku przez oba wyżej wymienione typy źródeł można znaleźć m.in. w książce Wagnera [91].

3.6.1 Hałas mechaniczny

Hałas mechaniczny pochodzi od ruchu względnego elementów mechanicznych i dynamicznych reakcji między nimi. Źródłem hałasu mechanicznego w turbinie wiatrowej są:

- skrzynia biegów,
- przekładnie,
- generator,
- napędy do ustawiania turbiny i łopat,
- system chłodzenia,
- wyposażenie dodatkowe (np. hydraulika) [91].

Ponieważ większość emitowanego hałasu generowana jest przez obracające się urządzenia mechaniczne, stąd jest to hałas szerokopasmowy zawierający składowe tonalne. Dodatkowo cała konstrukcja turbiny, w postaci wieży, gondoli, wirnika i piasty może działać jak pudło rezonansowe, które przenosi hałas poszczególnych urządzeń i emituje go do otoczenia. Ścieżkę transmisji dźwięków mechanicznych można podzielić na drogę: powietrzną oraz materiałową. Droga powietrzna, to droga bezpośredniej emisji hałasu od źródła do atmosfery. Droga materiałowa, to droga emisji pośredniej poprzez elementy konstrukcyjne turbiny wiatrowej. Przykład poziomów mocy akustycznej emitowanej przez poszczególne źródła hałasu wraz podziałem na sposób emisji przedstawiony został na Rys. 32. W przypadku źródeł mechanicznych największym poziomem mocy charakteryzuje się skrzynia biegów, która emituje hałas obiema drogami.



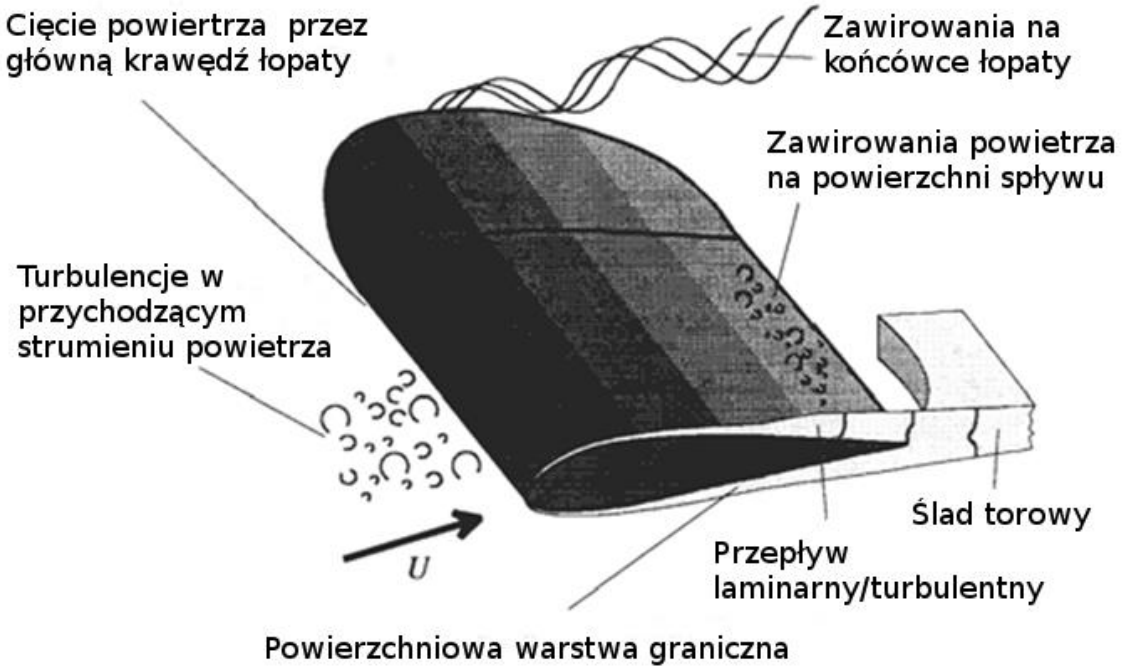
Rys. 3.2 Przykładowe poziomy mocy akustycznej poszczególnych źródeł hałasu wraz z mocą wypadkową oraz zaznaczonymi drogami emisji dla turbiny wiatrowej o mocy znamionowej 2 MW (a/b – powietrzną i s/b – materiałową) [92].

3.6.2 Hałas aerodynamiczny

Aerodynamiczny dźwięk szerokopasmowy ma zazwyczaj największy udział w emisji akustycznej turbin wiatrowych i stanowi główne źródło hałasu. Powstaje on w wyniku przepływu powietrza wokół łopat. Jak pokazano na Rys. 3.3, na łopacie rotora występuje duża liczba złożonych zjawisk przepływu, z których każde może wygenerować dźwięk, na ogół zwiększający się wraz z prędkością obrotową wirnika. Aerodynamiczne mechanizmy wytwarzania dźwięku, można podzielić na trzy grupy:

- **hałas nisko częstotliwościowy**: dźwięk w niskiej części częstotliwości pasma jest generowany, gdy obracająca się łopata napotyka brak płynności powietrza w wyniku jego przepływu wokół wieży, zmiany prędkości wiatru, lub napotkania obszaru cienia z innych łopat;
- **hałas w wyniku turbulencji**: zależy od ilości turbulencji atmosferycznych, występujących lokalnie wokół łopaty lub wahania ciśnienia lokalnego wokół ostrza;

- **hałas własny przepływu łopaty przez powietrze**: dźwięk wytwarzany przez przepływ powietrza wzdłuż powierzchni łopaty. Ten typ dźwięku jest zazwyczaj szerokopasmowy [91].

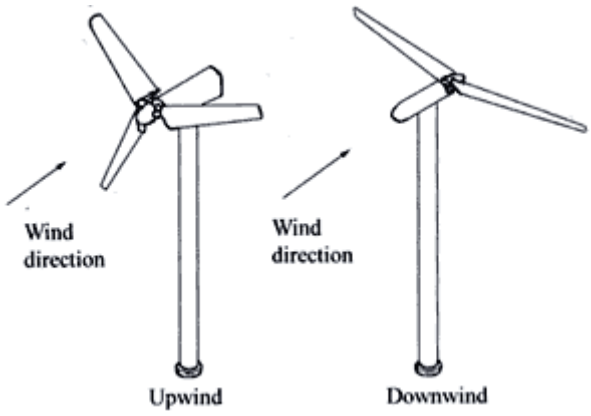


Rys. 3.3 Schemat przepływu powietrza wokół łopaty wirnika [91].

3.6.3 Hałas infradźwiękowy

Dla potrzeb analizy zjawiska generacji sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbiny wiatrowe istotne jest rozróżnienie dwóch typów konstrukcji, przedstawionych na Rys. 3-4:

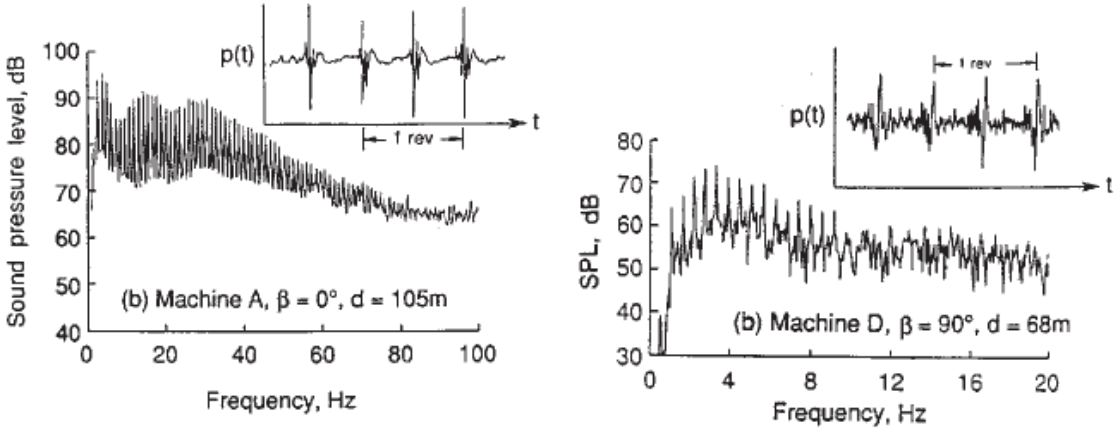
- pod wiatr (ang. upwind): większość współcześnie stosowanych, w których wirnik znajduje się przed wieżą i pierwszy przyjmuje podmuchy wiatru;
- z wiatrem (ang. downwind): pierwsze konstrukcje coraz rzadziej stosowane, w których wirnik znajduje się za wieżą i otrzymuje wiatr po przejściu przez wieżę.



Rys. 3.4 Rodzaje konstrukcji turbin wiatrowych [93].

Miejscem 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 [94]. Przykładowe przebiegi widm hałasu przedstawiono w celach porównawczych dla obu typów instalacji na Rys. 3.5.



Rys. 3.5 Przykład widm hałasu turbiny wiatrowej MOD-1 typu downwind (lewy rysunek) i MOD-5B typu upwind (prawy rysunek) [95].

3.7 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) [96], które zostało uchylone (Dz.U. 2009 nr 105 poz. 873 [97]). Usunięcie hałasu infradźwiękowego z rozporządzenia wynikała z odniesienia się w nim do wartości opisujących próg percepcji słuchowej, a nie szkodliwości [98]. 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 [98]. Główne wymagania, w postaci wartości odniesienia do oceny ryzyka oddziaływania hałasu infradźwiękowego na organizm człowieka, przedstawione są w znowelizowanej normie PN-Z-01338:2010. Zgodnie w/w normą hałas infradźwiękowy na stanowiskach pracy charakteryzowany jest przez:

- równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G odniesiony do 8-godzinnego dnia pracy;
- równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G odniesiony do tygodnia pracy (w przypadku hałasu infradźwiękowego oddziałującego na organizm człowieka w sposób nierównomierny w poszczególnych dniach tygodnia);
- równoważny poziom ciśnienia akustycznego skorygowany charakterystyką częstotliwościową G w czasie pobytu pracownika na stanowisku pracy (na stanowiskach do wykonywania prac koncepcyjnych wymagających szczególnej koncentracji uwagi).

Wielkości wartości dopuszczalnych określonych w normie PN-Z-01338 przedstawione zostały w tabeli 3.7. Prezentowane w normie wartości zostały przyjęte z uwzględnieniem obecnego stanu wiedzy na temat skutków oddziaływania infradźwięków na organizm człowieka.

Tabela 3.7 Wartości dopuszczalne hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy stanowiące kryterium uciążliwości wg PN-Z-01338 [99]

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

W normie zrezygnowano z określenia wartości maksymalnych i szczytowych obowiązujących w rozporządzeniu [100].

Jak już wspomniano w Polsce bark jest przepisów regulujących problem oddziaływania i uciążliwości hałasu infradźwiękowego w środowisku ogólnodostępnym. Istnieją jedynie zalecenia i kryteria sformułowane w pracy Mirowskiej [101], oparte na progach słyszenia. Zgodnie z tymi zaleceniami hałas infradźwiękowy w środowisku nie powinien przekraczać progów słyszenia. Dopuszczalne poziomy infradźwięków w środowisku proponowane w pracy [101] zostały przedstawione w tabeli 3.8, gdzie dodatkowo wskazano wartości kryterialne obowiązujące w wybranych krajach UE. 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 [25].

Tabela 3.8 Zestawienie obowiązujących w różnych krajach norm i zaleceń dotyczących dopuszczalnych poziomów hałasu niskoczęstotliwościowego w pomieszczeniach [25]

Częstotliwość [Hz]	Dopuszczalny poziom hałasu L_{eq} [dB]						
	Polska [101]	Dania [102]	Wielka Brytania [103]	Niemcy [104]		Holandia [105]	Szwecja [106]
				Dzień	Noc		
8	-	-	-	108	103	-	-
10	80,4	90,4	92	100	95	-	-
12,5	73,4	83,4	87	91,5	86,5	-	-
16	66,7	76,7	83	84	79	-	-
20	60,5	70,5	74	76	71	74	-
25	54,7	64,7	64	68	63	64	-
31,5	49,3	59,4	56	60,5	55,5	55	56
40	44,6	54,6	49	53	48	46	49
50	40,2	50,2	43	45	40	39	43
63	36,2	46,2	42	38,5	33,5	33	41,5
80	32,5	42,5	40	38	33	27	40
100	29,1	39,1	38	38,5	33,5	22	38
125	26,1	36,1	36	-	-	-	36
160	23,4	33,4	34	-	-	-	34
200	20,9	-	-	-	-	-	32
250	18,6	-	-	-	-	-	-

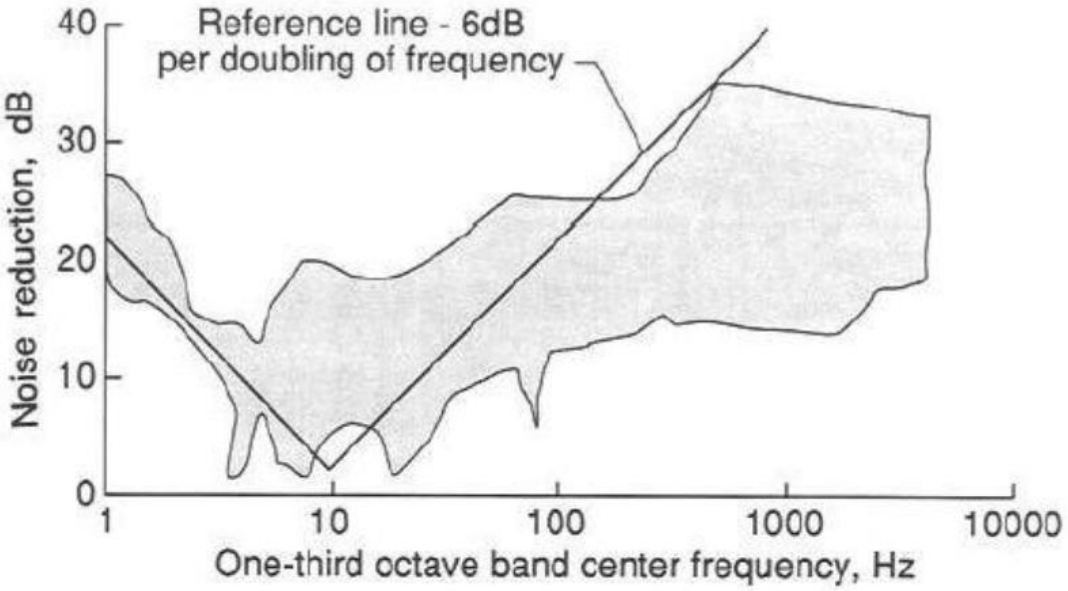
W Danii od 2011 roku obowiązują przepisy prawne szczegółowo regulujące sposób oceny hałasu słyszalnego i niskoczęstotliwościowego (wraz z infradźwiękowym w zakresie od 10 do 160 Hz) emitowanego przez turbiny wiatrowe [107]. Przepisy duńskie obejmują wszystkie inwestycje w energetyce wiatrowej powstałe po 1 stycznia 2012 roku. W przepisach tych określono dopuszczalny poziom hałasu niskoczęstotliwościowego w pomieszczeniach mieszkalnych o wartości 20 dB ważonych krzywą korekcyjną A. Poziom ten

ma być dotrzymany dla turbin pracujących przy prędkości wiatru rzędu 6 i 8 m/s, mierzonym na wysokości 10 m. W celu oceny rzeczywistego oddziaływania, sprawdzenie dopuszczalnych poziomów odbywa się metodą pośrednią. W pierwszym kroku wykonuje się pomiary poziomu dźwięku w pasmach 1/3 oktawy, w celu określenia poziomu mocy akustycznej badanej turbiny. Prezentowana metoda pomiaru jest zgodna z normą PN-ISO-61400 [6]. W drugim kroku przy użyciu ściśle określonych w przepisach wzorów oraz współczynników propagacji określa się metodami obliczeniowymi poziom hałasu w punkcie kontrolnym podlegającym ocenie. W przypadku hałasu niskoczęstotliwościowego przepisy z góry zakładają stałą widmową izolacyjność przegród budowlanych. Poziom hałasu otrzymany w wyniku przeprowadzonej oceny nie musi odzwierciedlać poziomu rzeczywistego, na który oprócz hałasu turbin wiatrowych składają się również inne źródła hałasu. Prezentowane podejście pozwala za to na dosyć dokładne określenie widm poziomu mocy akustycznej w zakresie infra- i nisko-częstotliwościowym.

3.8 Sposoby ograniczania oddziaływania infradźwiękowego na środowisko

Przy ograniczaniu oddziaływania na środowisko źródeł sygnałów infradźwiękowych obowiązują wymagania i zasady analogiczne jak dla hałasu słyszalnego. Ograniczenia wynikają bezpośrednio z ich własności. Z powodu dużej długości fali infradźwiękowej (od 17 do 340 m) możliwość jej ekranowania przez przeszkody jest zredukowana do minimum. Jedynie przeszkody, których rozmiary są większe od długości fali dźwiękowej, mogą pełnić funkcję ekranującą. Dodatkowo zjawiska fizyczne zachodzące przy przejściu fali infradźwiękowej przez przeszkodę sprawiają, że tłumienie jej również jest stosunkowo małe. Spowodowane jest to głównie silną zależnością izolacyjności przegród od częstotliwości sygnału. Zgodnie z założeniami teoretycznymi , poniżej rezonansu podstawowego izolacyjność określana jest przez właściwości sprężyste przegrody i maleje z nachyleniem 6 dB/oktawę. Natomiast powyżej rezonansu o izolacyjności decyduje masa ściany przypadająca na jednostkę powierzchni. W tym zakresie izolacyjność rośnie odpowiednio 6 dB/oktawę. Najmniejsza izolacyjność występuje dla częstotliwości podstawowego rezonansu, który dla typowych ścian wynosi kilka Hz. Od tego teoretycznego przebiegu występują odchylenia spowodowane niejednorodnościami i czynnikami konstrukcyjnymi.

Typowy przebieg izolacyjności w zakresie małych częstotliwości pokazano na Rys. 3.6. Z przedstawionej zależności wynika, że izolacyjność akustyczna jest najmniejsza w zakresie częstotliwości infradźwiękowych, chociaż jest zwykle większa, niż wynika to z rozważań teoretycznych. Dlatego tradycyjne metody redukcji, które mogłyby być zlokalizowane na drodze propagacji fali, są mało skuteczne. Dodatkowo w niektórych przypadkach, w skutek rezonansu elementów konstrukcyjnych, pomieszczeń czy nawet całych budynków, fale infradźwiękowe mogą ulec dodatkowemu wzmocnieniu.



Rys. 3.6 Izolacyjność akustyczna przegrody budowlanej z zaznaczonym przebiegiem teoretycznym ±6 dB/oktawę [70].

Praktycznie jedyną metodą redukcji infradźwięków jest eliminacja bezpośrednio w źródle ich powstawania, a więc w maszynach i urządzeniach. Większość sposobów redukcji hałasu infradźwiękowego została opracowana dla urządzeń występujących w środowisku pracy. Głównymi metodami redukcji emisji infradźwiękowej w źródle są [108]:

- stosowanie absorpcyjnych i refleksyjnych tłumików akustycznych (głównie w maszynach na wlotach i wylotach powietrza);
- właściwe fundamentowanie maszyn i urządzeń;
- usztywnianie konstrukcji ścian i budynków w przypadku ich rezonansu;
- zmiana geometrii pomieszczeń w przypadku występowania fal stojących i rezonansów;

- stosowanie aktywnych metod redukcji hałasu (poprzez aktywne pochłanianie i kompensacje dźwięku).

Przy czym, zastosowanie niektórych środków ochrony w przypadku turbin wiatrowych, wiązałoby się z podjęciem działań bezpośrednio w obszarze punktu odbioru, a nie w źródle. Źródło, jakim jest turbina, znajduje się w przestrzenni otwartej, z której emisja odbywa się bez jakichkolwiek przeszkód. Zmiana konstrukcji budynku oraz geometrii pomieszczeń przy hałasie infradźwiękowym turbin wiatrowych możliwa jest tylko w budynkach, gdzie stwierdzono występowanie podwyższonych poziomów hałasu. W przypadku turbin wiatrowych najlepszym wyjściem byłoby dokładne zbadanie źródeł generacji fali infradźwiękowej i przeprojektowanie konstrukcji tak aby zminimalizować zjawiska je powodujące.

4 Przegląd doniesień literaturowych dotyczących tematyki rozprawy

Problem hałasu infradźwiękowego, sposoby jego pomiaru oraz ocena uciążliwości są obecnie zagadnieniami często podejmowanymi przez środowiska naukowo-badawcze w wielu krajach.

Na podstawie przeglądu artykułów naukowych traktujących o problematyce hałasu infradźwiękowego generowanego przez turbiny wiatrowe do środowiska i uciążliwości tego hałasu na okolicznych mieszkańców, można stwierdzić, że brak jest jednoznacznej odpowiedzi na pytanie czy poziom generowanego hałasu infradźwiękowego jest na tyle duży, że może oddziaływać negatywnie na zdrowie ludzi. W celu zbadania problemu, pierwszym etapem powinno być dokładne zmierzenie poziomu hałasu infradźwiękowego generowanego przez turbiny wiatrowe, a dopiero w kolejnych etapach ocena jego wpływu na zdrowie ludzi.

Wiele prac dotyczy jedynie teoretycznych rozważań na temat hałasu infradźwiękowego turbin wiatrowych, przy czym najczęściej brak jest informacji dotyczących oddziaływania kompletnych konstrukcji. Dodatkowo w prezentowanych pracach stosowane są różne metody badań hałasu oraz prezentacji rezultatów, co dodatkowo utrudnia interpretację i analizę porównawczą uzyskanych wyników.

Pierwsze usystematyzowane badania hałasu generowanego przez turbiny wiatrowe prowadzone były przez pracowników NASA [109, 110], którzy przez ponad dwie dekady badali pracę kilku rodzajów turbin o mocy znamionowej dochodzącej nawet do 4,2 MW. Wynikiem tych badań było zarejestrowanie, a następnie wyjaśnienie, na podstawie opracowanych modeli numerycznych, że w wyniku różnic w prędkościach wiatru nacierającego na wirnik oraz impulsów tworzonych podczas przejścia łopaty wirnika przez ślad wieży, turbina generuje składowe infradźwiękowe. Jednocześnie w wyniku powstających turbulencji w napływającym powietrzu również w widmie hałasu słyszalnego pojawiają się składowe niskoczęstotliwościowe. Dodatkowo analizując zjawisko propagacji sygnałów infradźwiękowych zaobserwowano, że w wyniku refrakcji atmosferycznej kształt fali w pewnej odległości (większej niż 1000 m) zmienia się na cylindryczny, co sprawia że hałas

maleje jedynie o 3 dB przy podwojeniu odległości, a nie jak w przypadku fali kulistej 6 dB. W przypadku infradźwięków zaobserwować można także występowanie większej uciążliwości wewnątrz pomieszczeń, która powodowana jest zjawiskiem rezonansu oraz słabej izolacyjności przegród. Na podstawie przeprowadzanych prac stwierdzono także, że poziom hałasu infradźwiękowego był zawsze poniżej progu słyszenie, a skargi na jego uciążliwość wynikały jedynie z drgań elementów budowlanych, takich jak okna itp.

Wyniki pomiarów, wykonanych przez Legertona [111] przy dwóch turbinach o mocy 450 kW w odległości 100 metrów, wykazały, że poziomy dźwięków emitowane w pasmach tercjowych poniżej 20 Hz są znacznie poniżej progów słyszenie, podczas gdy poziom hałasu w tercji 31,5 Hz znajduje się tylko niewiele poniżej tego progu.

W pracach [112] i [113], przestawiono technikę redukcji zakłóceń generowanych przez szum wiatru w rejestrowanych sygnałach hałasu o niskiej częstotliwości. W tym celu ich Autorzy wykonali pomiary dwoma mikrofonami umieszczonymi na powierzchni ziemi w odległości 10 m oraz zastosowali korelację krzyżową oraz funkcję autokorelacji badanych sygnałów. W odległości w zakresie od 200 do 500 m, mierzone przez nich widmo sygnału, miało charakter ciągły z pikami rezonansowymi występującymi przy częstotliwości przejścia łopat i jej wyższych harmonicznych. Poziom hałasu ważony krzywą G badanych sygnałów nie przekraczał wartości 63,9 dB.

Szczegółową analizę uzyskanych wyników trzech opisanych powyżej badań [109, 110, 112, 113] wykonał Jakobsen [114]. Polegała ona na przeprowadzeniu porównania danych z raportów z informacjami uzyskanymi bezpośrednio od ich Autorów. Po uśrednieniu wyników uzyskanych z 10 turbin o mocy elektrycznej w zakresie od 50 kW do 4,2 MW oraz zastosowaniu krzywej korekcyjnej G, stwierdził, że poziom hałasu infradźwiękowego dla turbin typu upwind wynosi około 70 dB, a dla turbin typu downwind był wyższy od 10 do 30 dB. Ponadto wykazał, że poziom hałasu turbin typu upwind, zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz, jest poniżej granicy 85 dB podanej w duńskich zaleceniach dla hałasu nisko i infra-częstotliwościowego [115, 116]. Natomiast w przypadku turbin typu downwind, poziom ten może zostać przekroczony w odległości do kilkuset metrów. Jakobsen rozpatrywał także zarzut, że hałas infradźwiękowy turbin wiatrowych jest odczuwany w odległości 2 km. W swoich badaniach porównał poziomy infradźwiękowe

wewnątrz pomieszczeń, z wartościami mierzonymi w paśmie słyszalnym na zewnątrz. Stwierdził, że w przypadku występowania przekroczeń w paśmie słyszalnym na zewnątrz pomieszczeń, poziom hałasu infradźwiękowego wewnątrz jest powyżej wartości 20 dB ważonych krzywą korekcyjną A, który stanowi poziom dopuszczalny przyjęty w duńskim prawodawstwie .

Van den Berg [117] zauważył, że fragment pola wirnika z przodu wieży powoduje powstawanie hałasu infradźwiękowego, ale co ważniejsze, powoduje on też modulację hałasu przy wyższych częstotliwościach, która postrzegana jest jako gwizdanie. Przy stabilnych parametrach atmosferycznych, które często występują w porze nocy, różnica w prędkości wiatru między górą i dołem wirnika jest znacząca i zmienia gwizd odpowiednio w „klaskanie, bicie lub pulsowanie". Efekt wywołany w paśmie słyszalnym był zauważalny nawet w odległości 1 km od farmy składającej się 17 turbin o mocy 2 MW. Pomiary, wykonane w odległości 100 m od każdej z turbin oraz 750 m od grupy turbin, wykazały, że hałas w pasmach tercjowych poniżej 20 Hz był znacznie poniżej progów słyszenia, nawet w punktach zlokalizowanych bezpośrednio przy siłowniach wiatrowych. Poziomy powyżej progu słyszenia występowały dopiero od częstotliwości 31,5 Hz, nawet w odległości dochodzących do 750 m.

Pedresen i Møller [118] analizowali hałas niskoczęstotliwościowy i infradźwiękowy w czterech domach położonych w pobliżu turbin wiatrowych w odległości w zakresie od 90 do 525 metrów. W żadnym z analizowanych zabudowań nie stwierdzono występowania w widmie sygnału harmonicznych częstotliwości przejścia łopaty w rejonie wieży. Występowały natomiast piki w zakresie niskich częstotliwości oraz wykazano podwyższony poziom dźwięku bez składowych tonalnych. Ważony krzywą G poziom hałasu nie przekraczał wartości 65 dB, czyli znajdował się znaczniej poniżej progów percepcji, w związku z czym stwierdzono, że nie może on powodować uciążliwości. Ważony krzywą A poziom hałasu w zakresie częstotliwości (10 ÷ 160) Hz był w pobliżu poziomu 20 dB, czyli wartości granicznej dla pory dnia i nocy obowiązującej w duńskim prawie. Najwyższe poziomy obserwowano przy wiatrach o prędkości 6,6 m/s w odległości 90 m oraz odpowiednio przy prędkości 9,4 m/s w odległości 325 m. Pomiary wykonane były zgodnie z duńskimi wytycznymi [115], ale bez określania miejsc z najgłośniejszym poziomem. Podczas pomiarów nie analizowano także poziomów tła

akustycznego, ale starano się analizować tylko okresy bez występowania źródeł zakłócających. Dodatkowe wyniki pomiarów otrzymane w dwóch domach sugerowały, że może wystąpić sytuacja z podwyższonymi poziomami hałasu w punktach pomiarowych zlokalizowanych w innych miejscach pokoju, niż te które zalecają wytyczne.

Firma Hayes McKenzie Partnership Ltd. Consultancy [119] wykonała pomiary infradźwięków w odległości 360 m od dwunastu turbin wiatrowych, każda o mocy 1,65 MW. Przy prędkościach wiatru do 20 m/s poziomy hałasu, ważone krzywą G, nie przekraczały poziomu 80 dB. Wykonano także badania, w których mierzono hałas infradźwiękowy w trzech domach, których mieszkańcy skarżyli się na ich uciążliwość. Wyniki badań, pokazały, że mierzone w zakresie (10 ÷ 160) Hz, poziomy sygnałów infradźwiękowych znajdują się poniżej kryteriów zaproponowanych przez brytyjski departament środowiska (DEFRA) [120, 121], a także kryterium duńskie. W przypadku opisywanych badań wewnątrz budynków stwierdzono okresowe występowanie podwyższonych poziomów, powodowane w pierwszym przypadku przez płynący przy domu strumień, natomiast w drugim przez otwarte okno. Przypadki te skłoniły autorów do zastanowienia się, w jakich warunkach należy wykonywać pomiary oraz jak jednoznacznie stwierdzić, czy zmierzony hałas generowany jest bezpośrednio i tylko przez pracujące turbiny wiatrowe.

Gastmeier i Howe [122], przeprowadzili pomiary hałasu infradźwiękowego wewnątrz domu w odległości 325 m od najbliżej turbiny z zespołu kilkunastu instalacji, każda o mocy 1,8 MW. Przy prędkości wiatru 5 m/s zmierzony przez nich poziom hałasu był co najmniej o 30 dB poniżej normalnego progu słyszenia dla wszystkich częstotliwości mniejszych od 20 Hz.

Ramakrishnan [123] zmierzył hałas w pobliżu pojedynczej turbiny o mocy 660 kW i bezpośrednio przy jednej z turbin wchodzącej w skład parku wiatrowego złożonego z ponad 50 turbin, każda o mocy 1,5 MW. W obu przypadkach zarejestrowane poziomy hałasu ważone krzywą G nie przekraczały wartości 70 dB.

Harrison [124] stwierdził, że ponieważ wzrost turbulencji jest istotny dla emisji hałasu o niskiej częstotliwości, stąd należy je kontrolować w czasie pomiarów.

W opisanych powyżej badaniach zastosowano różne metody pomiarowe, a większość danych nie może być porównywana bezpośrednio. W niektórych z prezentowanych wyników

brakuje podstawowych informacji, dotyczących m. in. : parametrów badanych turbin, odległości punktów pomiarowych od źródeł emisji, danych o kierunku i prędkości wiatru, wartości innych parametrów opisujących warunki atmosferyczne, pasma częstotliwości analizowanych sygnałów, poziomu hałasu tła, izolacji akustycznej przegród budowlanych, pory dnia lub nocy kiedy pomiary zostały wykonane wewnątrz budynków, itp.

Jednakże na podstawie prezentowanych w literaturze wyników badań hałasu infradźwiękowego generowanego przez pracujące turbiny wiatrowe można stwierdzić, że:

- przejście łopaty wirnika przez obszary o różnej prędkości wiatru i gęstość powietrza moduluje dźwięk w wyższych częstotliwościach, ale także emituje składowe infradźwiękowe i niskoczęstotliwościowe. Głównym czynnikiem generującym fale infradźwiękowe jest zaburzenie ciśnienia powstające przy przechodzeniu łopat wirnika przez obszar wieży turbiny. Modulowanie dźwięku przy wyższych częstotliwościach może, ze względu na niską częstotliwość modulacji, być błędnie interpretowane jako infradźwięki.
- Turbiny typu upwind emitują hałas infradźwiękowy znacznie poniżej progu słuchu, dotyczy to również sygnałów mierzonych bezpośrednio przy źródle dźwięku, nawet w pobliżu turbiny. Natomiast w turbinach typu downwind, przejście łopat poprzez ślad wieży generuje infradźwięki, które mogą przekroczyć próg słyszenia w ich pobliżu i ewentualnie powodować grzechotanie, np. okien, nawet w sąsiednich budynkach. Należy podkreślić, że większość nowoczesnych turbin jest typu upwind.

Określenie stopnia uciążliwości hałasu turbin wiatrowych w zakresie niskich częstotliwości oraz identyfikacja jego źródeł jest zmienną wielu czynników, w tym typu turbiny, odległości między źródłem i punktem pomiaru, warunków atmosferycznych, itp.

Ponadto należy wspomnieć, że oprócz informacji dotyczących hałasu infradźwiękowego instalacji wiatrowych prezentowanych w monografiach, artykułach naukowych, referatach konferencyjnych, białych księgach oraz zaleceń, norm i wytycznych opracowanych przez instytucje do tego uprawnione, występują liczne źródła, głównie strony i artykuły internetowe, w których prezentowane informacje i poglądy są nierzetelne. Często można spotkać przypisywanie oddziaływaniu infradźwięków skutków i objawów

zdrowotnych bez jakiegokolwiek związku przyczynowego. Dodatkowo infradźwięki i hałas o niskiej częstotliwości często nie są prawidłowo rozpoznawane, czego konsekwencją jest przypisywanie wielu efektów uciążliwości infradźwiękom, z pominięciem składowych niskoczęstotliwościowych. Dodatkowo nieprawidłowości przy dokonywaniu oceny oddziaływania hałasu infradźwiękowego wynika z błędnego posługiwania się różnymi krzywymi ważenia, które opisują wrażenie słuchowe wywoływane przez różne rodzaju hałasu.

5 Dobór układu do pomiaru i analizy infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe

5.1 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. 5.1 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.

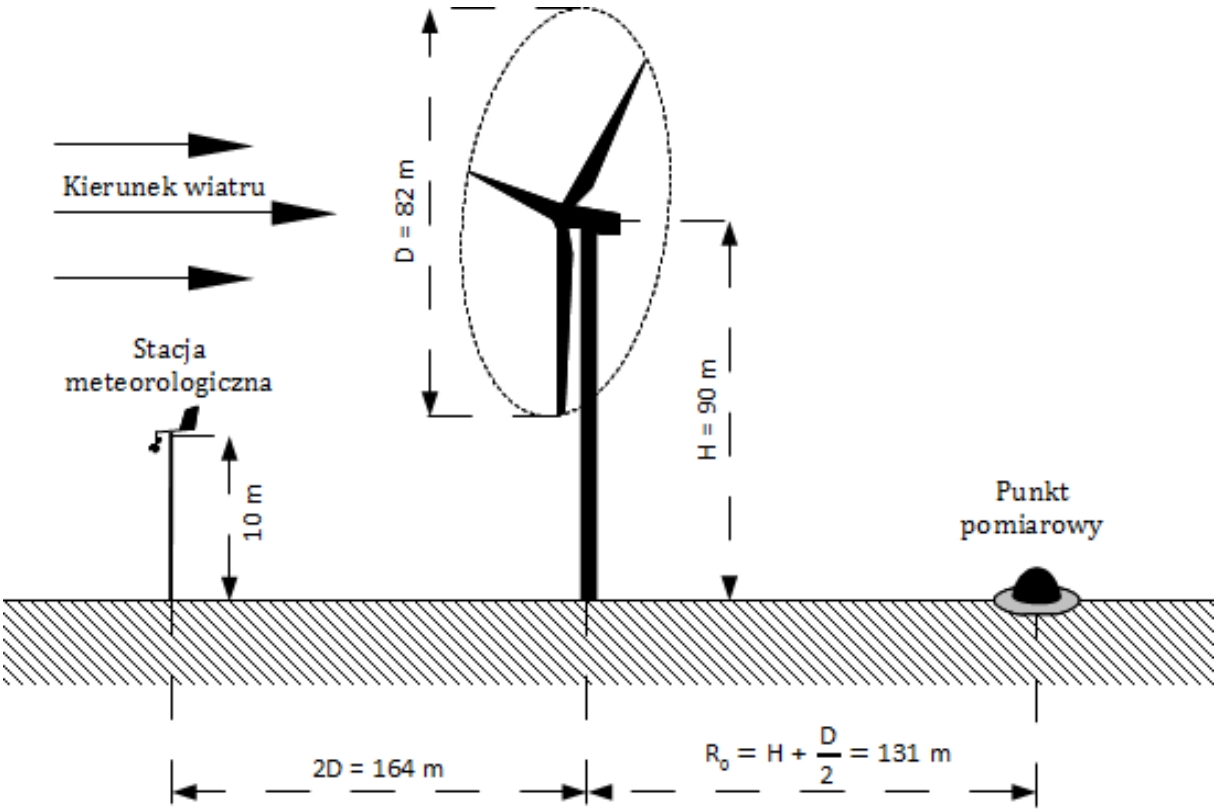
W przeprowadzonych badaniach skupiono się na pomiarze poziomu ciśnienia akustycznego, nie przeliczając go na poziom mocy akustycznej. Podejście takie pozwala określić zakres potencjalnego oddziaływania infradźwięków bezpośrednio w miejscu usytuowania punktu pomiarowego. Równocześnie z pomiarem poziomu ciśnienia akustycznego prowadzono, zgodnie z założeniami norm [6, 7], pomiary prędkości i kierunku wiatru, a także innych podstawowych parametrów meteorologicznych. Dodatkowo, w przypadku dostępu do sterownika turbiny, rejestrowano także parametry elektryczne pracy turbiny.

W celu sprawdzenie toru pomiarowego, przed i po każdym z pomiarów, przeprowadzano kalibrację toru przy pomocy kalibratora akustycznego klasy 1 firmy B&K typ 4231. Sygnałem testowym była częstotliwość 1 kHz o poziomie 94 dB. Procedura kalibracji przeprowadzona została zgodnie instrukcją producenta sprzętu pomiarowego.

Wszystkie uzyskane wyniki skorelowano z mierzonymi równocześnie parametrami meteorologicznymi i poddano osobnej analizie. Zakres wykonanych analiz objął wyznaczenie przebiegów obrazujących zmiany czasowe i wyznaczenie widm częstotliwościowych oraz

spektrogramów czasowo-częstotliwościowych zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych. Dokonano także oceny wpływu rejestrowanych parametrów pracy na wartości emitowanych infradźwięków. W podsumowaniu uzyskane z pomiarów wielkości zostały odniesione i porównane z wartościami granicznymi określonymi w obowiązujących w tym zakresie normach i przepisach dotyczących stanowisk pracy.

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. Przy wyborze czasu pomiaru należy dokładnie obserwować prognozy pogody, tak aby w badanej dobie wystąpiło możliwie najwięcej różnych prędkości wiatru. Sytuacja taka występuje najczęściej podczas zmian pogody, w sytuacji gdy wyże ustępują miejsca niżom. Jednakże podczas takich zmian często występują opady deszczu, które uniemożliwiają prowadzenie badań. Wszystkie elementy powodują, że przeprowadzenie pomiarów dla jednej turbiny jest zadaniem wymagającym wielu przygotowań oraz stosunkowo dużej liczby godzin prowadzonych pomiarów.



Rys. 5.1 Usytuowanie mikrofonu i stacji meteorologicznej względem badanej turbiny wiatrowej zgodnie z normą PN-EN 61400-11.

5.2 Opis zastosowanej aparatury pomiarowej

Mierzoną wielkością fizyczną były zmiany poziomu ciśnienia akustycznego. Do ich rejestracji zastosowano mikrofony pojemnościowe, w których zmiany ciśnienia akustycznego wprawiają w drgania membranę. Membrana ta, będąc ruchomą okładziną kondensatora zmienia pojemność elektryczną w takt zmian ciśnienia, a ponieważ mikrofon jest wstępnie polaryzowany, a obie okładziny są ze sobą połączone rezystorem, to na wyjściu mikrofonu można mierzyć proporcjonalne zmiany napięcia. Ponieważ impedancja wyjściowa mikrofonu jest mała (rzędu kilkudziesięciu Ω), dlatego w celu przesłania rejestrowanych sygnałówu na większą odległość należy zastosować przedwzmacniacz mikrofonowy, którego rolą jest zwiększenie impedancji.,. Do rejestracji sygnału mierzonego przez mikrofon zastosowano cyfrowy miernik sygnału z funkcją rejestracji. W mierniku sygnał analogowy przy pomocy przetworników A/C jest próbkowany i kwantowany na postać cyfrową, którą można już dowolnie przetwarzać i analizować.

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.

Podczas doboru elementów składowanych zastosowanego układu pomiarowego należało uwzględnić specyficzny charakter badanych sygnałów. Dopiero po określeniu ich parametrów, możliwe było odpowiednie dobranie aparatury pomiarowej. W tabeli 5-1 przedstawiono przyjęte parametry aparatury pomiarowej, dobranej do pomiarów sygnałów infradźwiękowych.

Tabela 5.1 Wymagania stawiane zestawowi pomiarowemu

Cecha	Wymagania
Badana wielkość fizyczna	zmiany poziomu ciśnienia akustycznego wyrażone w Paskalach
Zakres mierzonych częstotliwości	od 1 Hz do 20 kHz
Dynamika zmian mierzonego sygnału	do 70 dB
Szybkość zmian mierzonego sygnału	pojedyncze sekundy
Sygnały zakłócające	podmuchy wiatru, inne źródła hałasu
Pomiary towarzyszące	prędkość i kierunek wiatru, temperatura, wilgotność ciśnienie atmosferyczne

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 5.1, wchodzą następujące elementy:

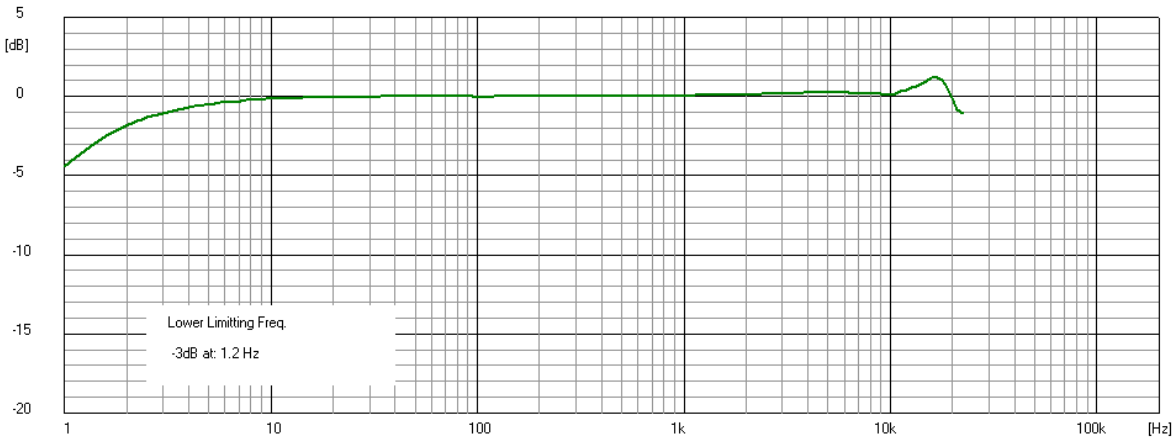
- mikrofon typ 4190 z przedwzmacniaczem typ 2669L firmy Brüel&Kjær,
- miernik LAN-XI typ 3050-A-60 firmy Brüel&Kjær,

- 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 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 p[pomiarowej przedstawiono na Rys. 5-1 ÷ 5-4.

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 ±3 dB od 1,2 Hz do 20 kHz (Rys. 5.2). 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, jakie zostały przedstawione w tabeli 5.1.



Rys. 5.2 Charakterystyka przenoszenia mikrofonu typ 4190 z osłoną dla kierunku 0^0 [125].

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. Wybrane parametry techniczne miernika zestawiono w tabeli 5.2.

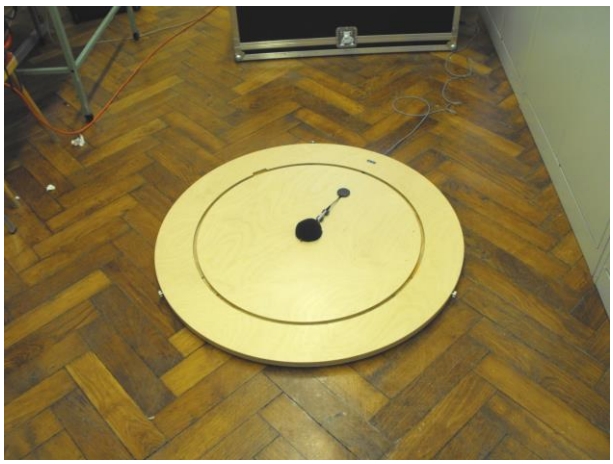
Tabela 5.2 Specyfikacja techniczna miernika typu 3050-A-060 [126]

Cecha		Specyfikacja techniczna
Zakres mierzonych częstotliwości		do 51,2 kHz dolny zakres definiowany przez użytkownika przy pomocy filtrów górnoprzepustowych (0,7 Hz, 7 Hz)
Próbkowanie		131 000 próbek na sekundę
Kwantowanie		2x24 bit umożliwia pomiar w jednym zakresie pomiarowym od 0 do 160 dB
Charakterystyka przenoszenia		0,1 dB względem częstotliwości 1 kHz, od najniżej do najwyższej częstotliwości mierzonego zakresu
Linowość amplitudy	od 0 do 80 dB	±0,05 dB, typowe: ±0,01 dB
	od 80 do 100 dB	±0,2 dB, typowe: ±0,02 dB
	od 100 do 140 dB	typowe ±0,02 dB
	od 140 do 160 dB	typowe ±1,00 dB
Szumy własne	Sygnał < 316 mV_{peak}	<13 μV_{rms}
	Sygnał > 316 mV_{peak}	<350 μV_{rms}
Zniekształcenia harmoniczne		-80 dB, typowe: -100 dB dla 1 kHz
Przesłuchy międzykanałowe		-100 dB, typowe: -140 dB

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 cześć zestawu pomiarowego. Oprogramowanie to, oprócz możliwości dokładnego skonfigurowania przyrządu, umożliwia rejestrację mierzonych sygnałów oraz ich przetwarzanie w trybie offline. Zagadnienie to szerzej opisano w Rozdz.5.5.

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°C do + 65°C, przy dokładności równej +/- 0,1°C. Pomiar wartości ciśnienia atmosferycznego wykonywany był z dokładnością +/-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 +/- 0,2 m/s. Wykorzystana stacja meteorologiczna oprócz, odczytu bieżących parametrów, umożliwia rejestrację mierzonych warunków w celu ich dalszej obróbki statystycznej. Wszystkie zmierzone wartości zostały zestawione z wynikami pomiarów poziomu hałasu i poddane szczegółowej analizie (patrz: Rozdz. 5.5).

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 N/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 ±0,2 dB. Natomiast stabilność generowanej częstotliwości wynosi ±0,1%, przy zniekształceniach mniejszych od 1 %.



Rys. 5.3 Mikrofon umieszczony na odbijającej powierzchni pomiarowej z osłoną przeciwwietrzną.

Rys. 5.4 Widok dodatkowej osłony przeciwwietrzna.

Rys. 5.5 Miernik typ 3050-A-060.

Rys/ 5.6 Stacja meteorologiczna typu Vantage Pro 2.

Rys. 5.7 Mikrofon B&K typ 4190.

5.3 Ocena niepewności zastosowanego układu pomiarowego

Przeprowadzenie oceny niepewności układu pomiarowego umożliwia określenie jakości otrzymywanych wyników. Niepewność przyrządów pomiarowych jest niepewnością typu B, czyli taką dla której wartość określa się przy pomocy budżetu niepewności, a nie jak ma to miejsce przy niepewności typu A metodami statystycznymi. Określenie budżetu niepewności sprowadza się do identyfikacji źródeł niepewności na podstawie:

- danych dotyczących niepewności oraz błędów granicznych przyrządów pomiarowych wynikających z ich klasy dokładności oraz danych technicznych deklarowanych przez producenta;
- informacji z norm i podręczników;
- elementów zastosowanej metody badawczej na podstawie doświadczenia i znajomości badanego zjawiska

Niepewność standardową typu B, wynikającą z powyższych elementów, oblicza się jako pierwiastek sumy kwadratów poszczególnych składowych budżetu, zgodnie z wzorem (5.1).

$$U_B = \sqrt{\sum_j U_{Bj}^2}\ , \tag{5.1}$$

gdzie:

U_{Bj} – niepewność standardowa typu B „cząstkowa” pochodząca od czynnika j

U_B – niepewność standardowa typu B [127].

Natomiast niepewność rozszerzoną przy poziomie ufności 95% określona jest zależnością (5.2):

$$U_{B,95} = k \cdot U_B\ , \tag{5.2}$$

gdzie:

k – współczynnik rozszerzenia (=2) [127].

Podczas pomiarów hałasu na niepewność typu B, składają się głównie niepewności związane z kalibracją oraz niepewności wynikające z klasy dokładności przyrządu pomiarowego.

W celu obliczenia niepewności typu B zastosowanego układu pomiarowego określone zostały, w ramach budżetu niepewności, graniczne błędy poszczególnych elementów, które wyznaczono dla pełnego zakresu pomiarowego. Źródłem danych były informacje zawarte w:

- Rozporządzeniu Ministra Gospodarki w sprawie wymagań, którym powinny odpowiadać mierniki poziomu dźwięku, oraz szczegółowego zakresu badań i sprawdzeń wykonywanych podczas prawnej kontroli metrologicznej tych przyrządów pomiarowych [Dz.U. nr 105 poz. 717 z 2007r.];
- Polskiej Normie PN-79/T-06460 „Mierniki poziomu dźwięku. Ogólne wymagania i badania";
- Danych producenta;
- Innych wiarygodnych źródłach (przewodnikach dobrych praktyk, zaleceń instytucji kontrolujących hałas itp.).

Przy szacowaniu niepewności pomiarowej typu B przyjęto, że odchylenie standardowe poszczególnych niepewności cząstkowych jest równe 1/3 wartości granicznych poszczególnych błędów przyrządów pomiarowych (przy założeniu, że mają one rozkład normalny).

W przypadku niepewności wzorca, gdzie rozkład wartości określonego błędu jest prostokątny przyjęto, że niepewność standardowa cząstkowa wynikająca z w/w błędów jest równa $1/\sqrt{3}$ jego wartości granicznej.

Budżet niepewności, oszacowany zgodnie z powyższymi założeniami, wraz obliczoną niepewnością standardową typu B oraz niepewnością rozszerzoną w przedziale ufności 95% przedstawiono w tabeli 5.3.

Tabela 5.3 Niepewność zastosowanego układu pomiarowego

Czynnik	Niepewność standardowa
Niepewność wzorca kalibracji	0,23
Rozrzut wyników wzorcowania	0,05
Tolerancja wzorcowania	0,12
Wpływ ciśnienia atmosferycznego	0,10
Wpływ temperatury	0,17
Wpływ zmian wilgotności	0,17
Wpływ czasu pracy	0,10
Wpływ charakterystyki częstotliwościowej	0,10
Wpływ charakterystyki kierunkowej mikrofonu	0,13
Wpływ współczynnika szczytu	0,03
Błędy liniowości	0,07
Rozrzut wyników wskazań przyrządu	0,03
Niepewność standardowa typu B	**0,43**
Niepewność rozszerzona typu B w przedziale ufności 95%	**0,86**

Oszacowanie niepewności aparatury pomiarowej stanowi główny składnik niepewności typu B, nie jest on jednak wystarczającym sposobem oceny niepewności pomiaru, za wyjątkiem pomiarów hałasu wykonywanych metodą obserwacji ciągłej.

W ramach rozprawy doktorskiej analizowane sygnały odnoszą się do sytuacji pomiaru ciągłego w zadanym czasie odniesienia.

5.4 Eliminacja zakłóceń występujących podczas pomiarów

Lokalizacja badanych turbin wiatrowych, położnych w przeważającej większości na polach uprawnych z dala od dróg, umożliwiało prowadzenie pomiarów bez dodatkowych zdarzeń zakłócających. Do głównych czynników zakłócających, które mogą mieć wpływ na wyniki pomiarów można zaliczyć:

- uderzenia podmuchu wiatru;

- przejazdy samochodów po okolicznych drogach;
- prowadzone na polach prace rolnicze.

Większość zakłóceń była eliminowana poprzez usytuowanie punktów pomiarowych, które lokalizowano jak najbliżej badanego źródła, zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 61400:11. Dzięki temu odstęp sygnału do szumu w większości przypadków przekraczał 10 dB i możliwe było pominięcie jego wpływu na wynik końcowy. W przypadku mniejszej różnicy konieczne było pomniejszenie wyniku końcowego o wpływ tła, zgodnie z zależnością (5.3). Różnica między poziomem tła i mierzonym sygnałem nie powinna być mniejsza od 3 dB, a w przypadku obliczania poziomu mocy akustycznej zgodnie z normą nie powinna być mniejsza niż 6 dB.

$$L_p = 10 \cdot \log\left(10^{0,1 \cdot L_{p,zm}} - 10^{0,1 \cdot L_T}\right), \tag{5.3}$$

gdzie:

L_p – poziom ciśnienia akustycznego badanego źródła,

$L_{p,zm}$ – zmierzony poziom ciśnienia akustycznego,

L_T – poziom ciśnienia akustycznego tła, przy wyłączonym badanym źródle [6]

Wpływ podmuchów i uderzeń wiatru w membranę mikrofonu zminimalizowany był poprzez zastosowanie dwóch osłon przeciwwietrznych oraz umieszczeniu mikrofonu na poziomie terenu bezpośrednio na powierzchni odbijającej, zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 61400:11. Zastosowanie we wszystkich pomiarach jednakowej powierzchni odbijającej dodatkowo minimalizowało wpływ powierzchni gruntu na rejestrowane przebiegi.

Wpływ zakłóceń wprowadzanych przez przejeżdżające pojazdy i wprowadzanych przez pracujące na polach maszyny rolnicze eliminowany był poprzez rejestrację czasu ich występowania w celu ich usunięcie z dalszych analiz zarejestrowanych w tym czasie wyników.

Dodatkowo w przypadku stwierdzenia na etapie analizy występowania w widmie rejestrowanych danych nietypowych zmian oraz dużych wahań w dynamice sygnałów użyta

aparatura umożliwiała odsłuchanie danego fragmentu sygnału, co umożliwiało określenie źródła możliwych zakłóceń.

5.5 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. Mierzony sygnał próbkowany był z częstotliwością 51,2 kHz, co umożliwiało jego rejestrację w pełnym paśmie infradźwiękowym i słyszalnym do częstotliwości 25,6 kHz. Mierzony sygnał można było odsłuchiwać oraz przeprowadzać analizy w całości lub na wskazanych fragmentach, analogicznie jak w przypadku standardowego odtwarzania.

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.

Overall Analyzers jest odpowiednikiem miernika poziomu dźwięku klasy 1 zgodnie z normą IEC 651. Umożliwia on wykonywanie pomiarów poziomu dźwięku dla zadanego pasma częstotliwości, a uzyskane wyniki są przedstawiane w postaci jednoliczbowej. Umożliwia on zdefiniowanie jednego z ośmiu sposobów pomiarów, z czego do analizy badanych sygnałów użyty został tryb wykładniczego uśrednia z stałą czasową 125 ms. Odzwierciedla on pracę typowego całkującego miernika poziomu dźwięku ze stałą czasową „Fast”. Dodatkowo prezentowany wynik może być przedstawiony przy zastosowaniu jednej z pięciu krzywych ważenia: Liniowa, A, B, C, D, z których do analiz użyte zostały trzy pierwsze [patrz: Rozdz. 5.6].

CPB Analyzres jest analizatorem widma sygnału przy pomocy filtrów 1/1, 1/3, 1/12 i 1/24 oktawowych o stałej procentowej szerokości pasm. Najniższa dolna granica analizowanych częstotliwości wynosi 90 mHz dla filtrów 1/24 oktawowych. Podobnie jak przy analizie ogólnej, opisanej powyżej, możliwe jest zdefiniowanie jednej z kilku metod uśredniania sygnału. Dodatkowo filtry umożliwiają analizę o zadanej dokładności pomiaru, stałej dla wszystkich analizowanych pasm. Realizowane jest to przy pomocy zmiennego czasu uśrednia, definiowanego osobo dla każdego z filtrów. Własność ta jest szczególnie istotna przy analizie sygnałów niskoczęstotliwościowych, dla których dobór zbyt krótkiej stałej czasowej uśredniania może prowadzić do analizy odpowiedzi chwilowej sygnału, co w praktyce oznacza brak uśredniania. W przypadku badanych sygnałów najniższą analizowaną częstotliwością była częstotliwość 1 Hz, dla której przy poziomie ufności 2 dB czas uśrednia wynosił 64 sekundy dla filtrów 1/3 oktawowych i odpowiednio 16 sekund dla filtrów oktawowych. Dla wyższych częstotliwości czasy uśrednia ulegają zmniejszeniu [128].

FFT Analyzers jest analizatorem widm czasowo-częstotliwościowych wykorzystującym dyskretną transformatę Fouriera. Rozdzielczość przeprowadzonych analiz definiowana jest w programie poprzez liczbę liczonych prążków (w zakresie od 50 do 6400) oraz pasma analizy (w zakresie od 1 Hz di 204,8 kHz). Do przeprowadzanych obliczeń ustawiano zakres analizy do 200 Hz oraz 6,4 kHz i obliczano FFT z rozdzielczością 1 Hz. Podobnie jak poprzednio należy określić jeden z trzech sposobów uśrednia sygnału. Dla analizowanych sygnałów użyto wykładniczego uśrednia, przy czym obliczano transformatę oddzielnie dla każdej zmierzonej sekundy pomiaru. W ten sposób uzyskano czasowy rozkład zmian widma, który rejestrowano w mutlibuforze i wyznaczono dwuwymiarowe spektrogramy STFT. Obliczone spektrogramy przedstawiają zmiany poziomu ciśnienia akustycznego dla poszczególnych częstotliwości z krokiem czasowym 1 sekunda i krokiem częstotliwościowym 1 Hz.

Po przetworzeniu sygnału przy wykorzystaniu narzędzi obliczeniowych programu LabShop uzyskane wyniki analizy akustycznej wyeksportowano do plików tekstowych. 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. Wybór deskryptorów stosowanych do opisu mierzonych sygnałów infradźwiękowych przedstawiono w rozdz. 5.7

Większość przeprowadzonych analiz dotyczyła sygnałów nieważonych, tzn. uzyskanych przy zastosowaniu płaskiego liniowego filtru 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.

5.6 Zastosowanie filtrów wagowych do korekcji częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów

Do oceny poziomu hałasu infradźwiękowego wykorzystano poziom ciśnienia akustycznego określony zależnością (5.4):

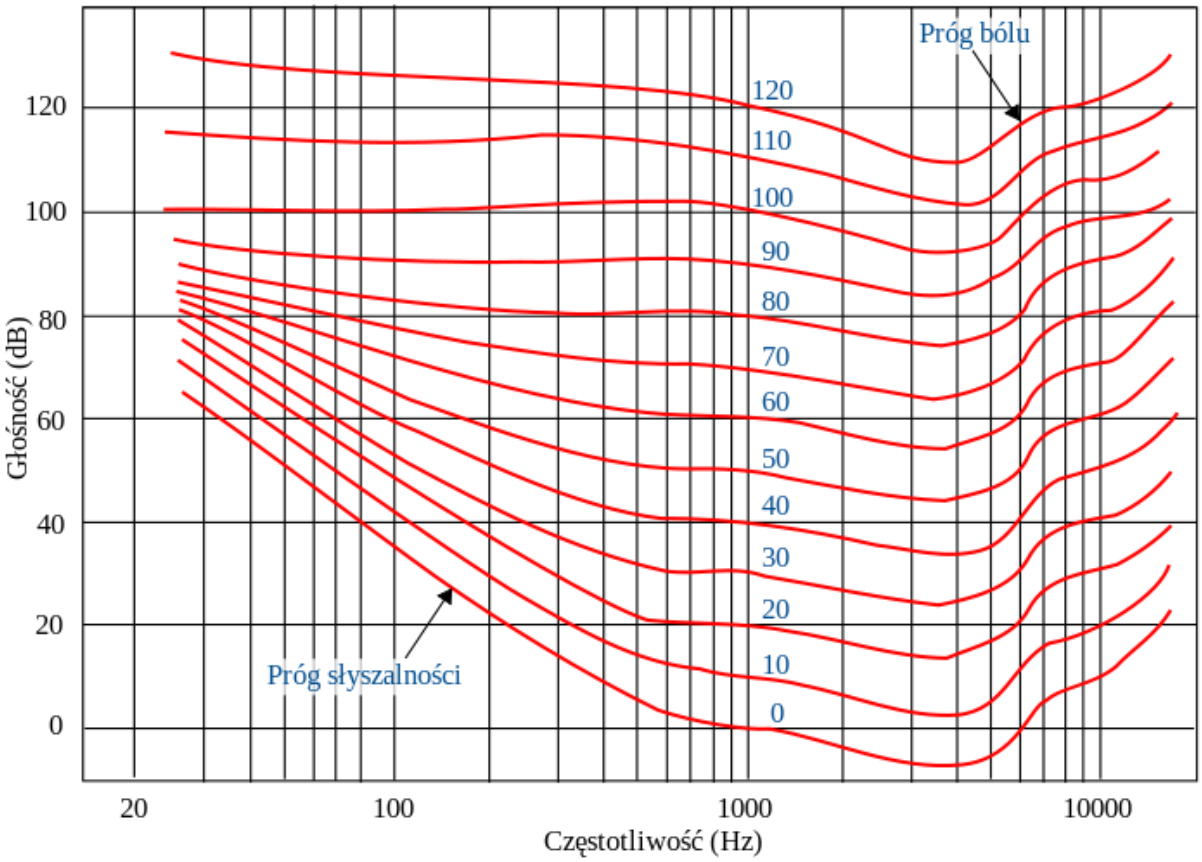
$$L_p = 10 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right), \tag{5.4}$$

gdzie:

p – mierzona wartość ciśnienia akustycznego w Pa

p_0 – wartość odniesienia równa $2x10^{-5}$ Pa (próg słyszenia dla częstotliwości 1 kHz) [129].

Wielkość poziomu ciśnienia akustycznego wyznaczona za pomocą zależności (5.4) 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 [69].



Rys. 5.8 Krzywe jednakowej głośności (izofony) "normalnego" ucha według Fletchera i Munsona. Wartości fonów są oznaczone na niebiesko [69].

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. Kształt krzywej A i C opisany jest zależnościami (5.5) i (5.6):

$$R_A(f) = \frac{12200^2 \cdot f^4}{\left(f^2 + 20{,}6^2\right) \cdot \sqrt{\left(f^2 + 107{,}7^2\right) \cdot \left(f^2 + 737{,}9^2\right)} \cdot \left(f^2 + 12200^2\right)}, \qquad (5.5)$$
$$A(f) = 2{,}0 + 20 \cdot \log_{10}\left(R_A(f)\right)$$

$$R_C(f) = \frac{12200^2 \cdot f^2}{\left(f^2 + 20{,}6^2\right) \cdot \left(f^2 + 12200^2\right)}, \qquad (5.6)$$
$$C(f) = 0{,}06 + 20 \cdot \log_{10}\left(R_C(f)\right)$$

gdzie:

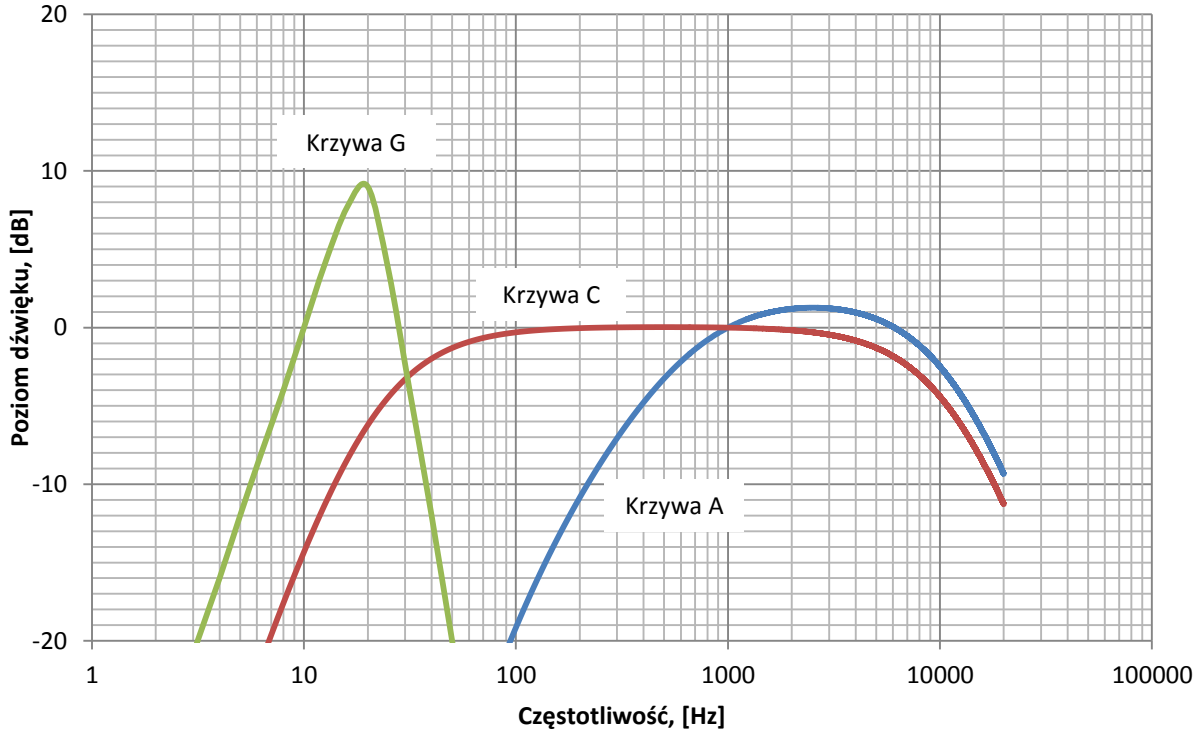
f – częstotliwość [Hz],

A(f) i C(f) – zależności opisujące krzywą ważenia [130].

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 takaż inne charakterystyki jednakże ich użycie uzasadnione jest tylko w specyficznych sytuacjach, jak krzywa D stosowana do oceny hałasu lotniczego [131], czy B stosowana do oceny zestawów audio [130].

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 [132].

Zestawienie porównawcze przebiegów krzywych ważenia A, C oraz G przedstawiono na Rys. 5.8.



Rys. 5.9 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.

5.7 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 określenie uciążliwości dla człowieka badanych sygnałów oraz wskazania różnic w rejestrowanych zależnościach konieczne było przedstawienie wyników uzyskanych po zważeniu odpowiednimi krzywymi ważenia.

W celu określenie jednoliczbowej ekspozycji na hałas, opisującej oddziaływania odpowiadające czasowi pomiaru, wprowadzono pojęcie równoważnego poziomu hałasu, który opisany jest zależnością (5.6):

$$L_{eq} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right), \tag{5.6}$$

gdzie:

T – czas pomiaru [s],

p – zarejestrowane zmiany ciśnienia akustycznego [Pa],

p_0 – ciśnienie odniesienia ($2 \cdot 10^{-5}$ Pa - próg słyszenia dla 1 kHz) [129, 130].

Uzyskane wyniki przedstawiano w postaci:

- równoważnego poziom dźwięku,
- charakterystyki częstotliwościowej rozkładu poziomu dźwięku w pasmach oktawowych,
- 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,
- ważone krzywą ważenia A,
- ważone krzywą ważenia C,
- ważone 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.

6 Wyniki przeprowadzonych pomiarów i ich analiz

6.1 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:

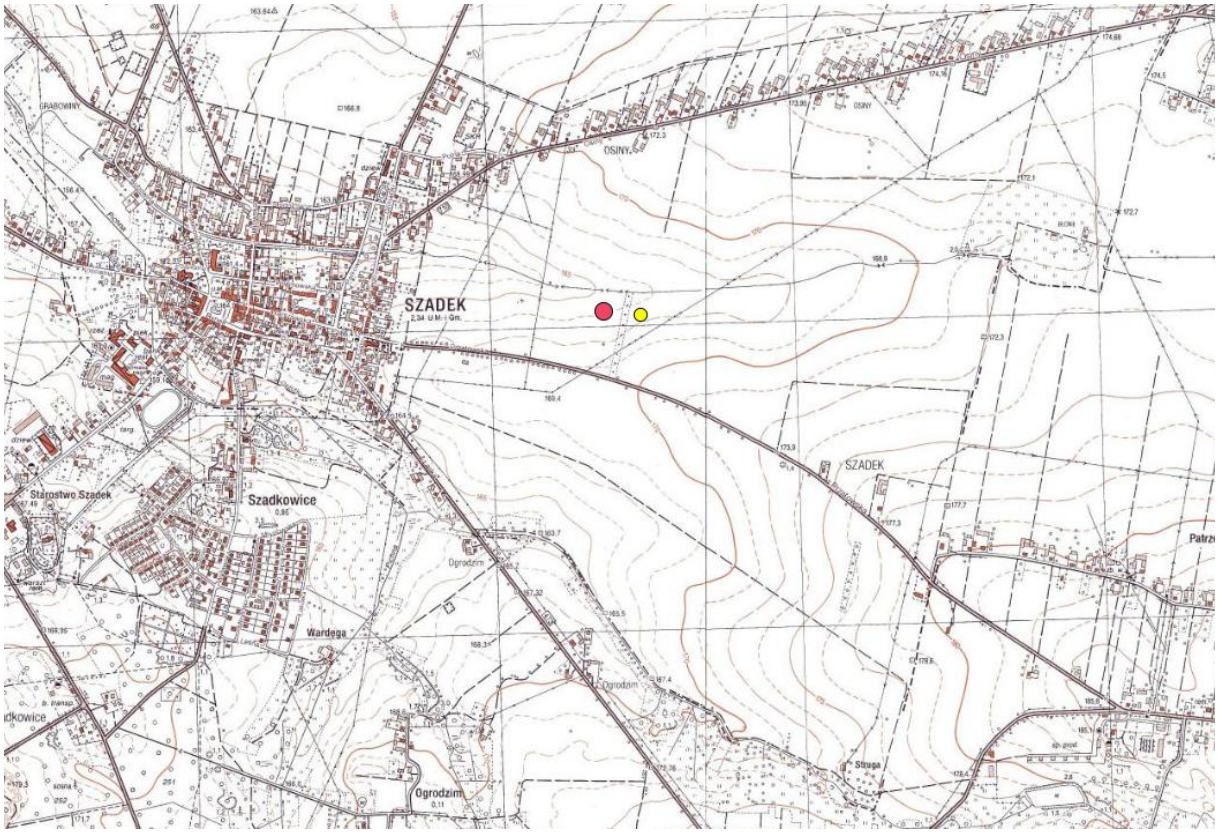
- wielkość mocy znamionowej (powyżej 1 MW),
- popularność zainstalowanych turbin (udział rozwiązań konstrukcyjnych danego producenta w populacji wszystkich turbin zainstalowanych w Polsce),
- dostęp do danych elektrycznych związanych z wielkością mocy elektrycznej oddawanej przez turbiny do systemu elektroenergetycznego,
- 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. 6.1.

Rys. 6.1 Lokalizacja badanych farm wiatrowych (żółte kwadraty).

Pierwszym badanym obiektem była pojedyncza turbina wiatrowa firmy Vensys typ 62 o znamionowej mocy elektrycznej 1,2 MW (Lokalizacja 1), ale sąsiadująca z instalacjami wiatrowymi wchodzącymi w skład innych elektrowni wiatrowych, które znajdowały się w odległości w zakresie od 1,2 km do 2,3 km. Badana turbina jest eksploatowana od 2009 roku. Średnica łopat turbiny wynosiła 62 m, a wysokość jej wieży odpowiednio 69 m. Sąsiadujące turbiny znajdowały się na kierunku wschodnim. W dniu pomiaru wiał wiatr zachodni. Pozwoliło to zminimalizować wpływ hałasu niskoczęstotliwościowego emitowanego przez pozostałe turbiny, ponieważ były one zlokalizowane od strony zawietrznej. Badana turbina usytuowana jest na wschód od miejscowości Szadek, w odległości ok. 600 m od terenów

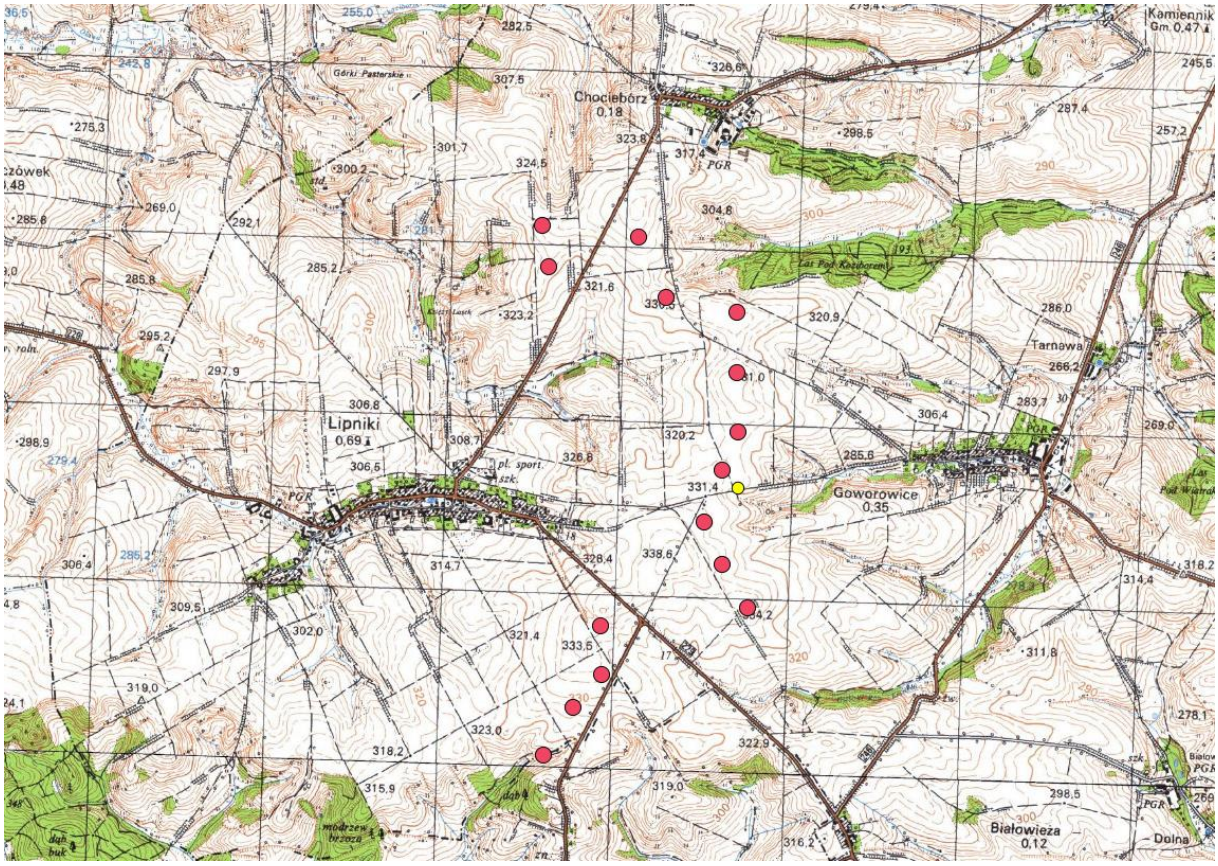
zabudowanych. Na kierunku północnym i południowym, w odległości ok. 580 m i ok. 800 m, przebiegają drogi wojewódzkie nr 710 oraz 473 [patrz: Rys. 6.2]. Otoczenie to, z powodu małych odległości jest źródłem stałego poziomu tła akustycznego w zakresie infradźwiękowym.



Rys. 6.2 Usytuowanie turbin i punktu pomiarowego dla lokalizacja 1, gdzie: czerwone kropki – turbiny; żółte kropki – punkt pomiarowy.

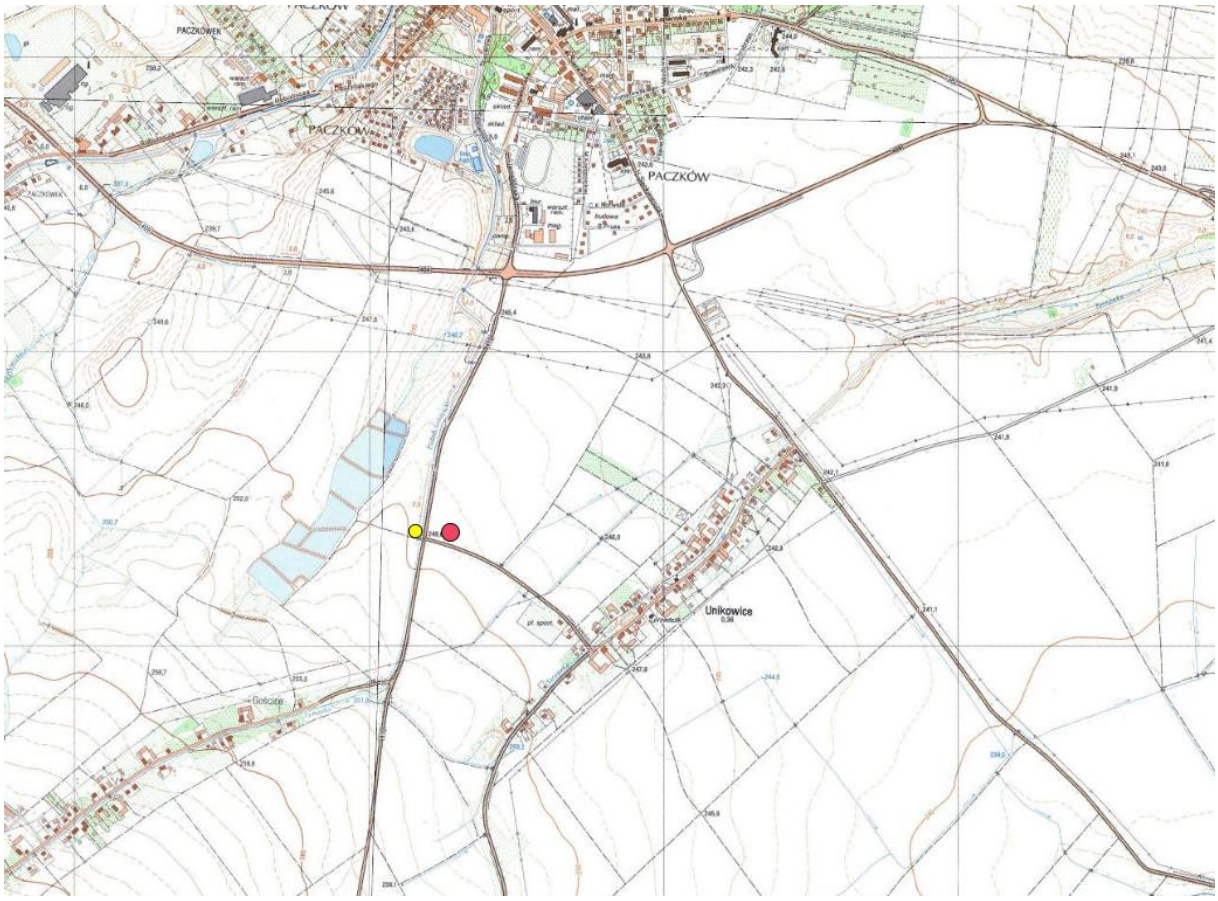
Drugim badanym obiektem była turbina wiatrowa firmy REPOWER typ MM92 o znamionowej mocy elektrycznej 2 MW (Lokalizacja 2), wchodząca w skład nowo oddanej do użytkowania farmy wiatrowej składającej się z 15-stu jednakowych turbin, o sumarycznej mocy elektrycznej równej 30 MW. Turbina była eksploatowana przez okres około jednego roku. Średnica łopat turbiny wynosiła 92 m, a wysokość jej wieży odpowiednio 80 m. Do badań wybrano turbinę stojącą w osi prostopadłej do kierunku wiatru. W ten sposób zminimalizowano wpływ hałasu niskoczęstotliwościowego emitowanego przez pozostałe turbiny. Badana turbina zlokalizowana jest na wschód od miejscowości Lipniki, w odległości ok. 850 m od terenów zabudowanych. Na kierunku północno-zachodnim i południowo-zachodnim, w odległości ok. 1250 m i ok. 950m, przebiegają drogi powiatowe nr 1659O oraz

1654O [patrz: Rys. 6.3]. Otoczenie to, z powodu dużych odległości oraz niedużej uciążliwości akustycznej, jest źródłem niskiego poziomu tła akustycznego w zakresie infradźwiękowym.



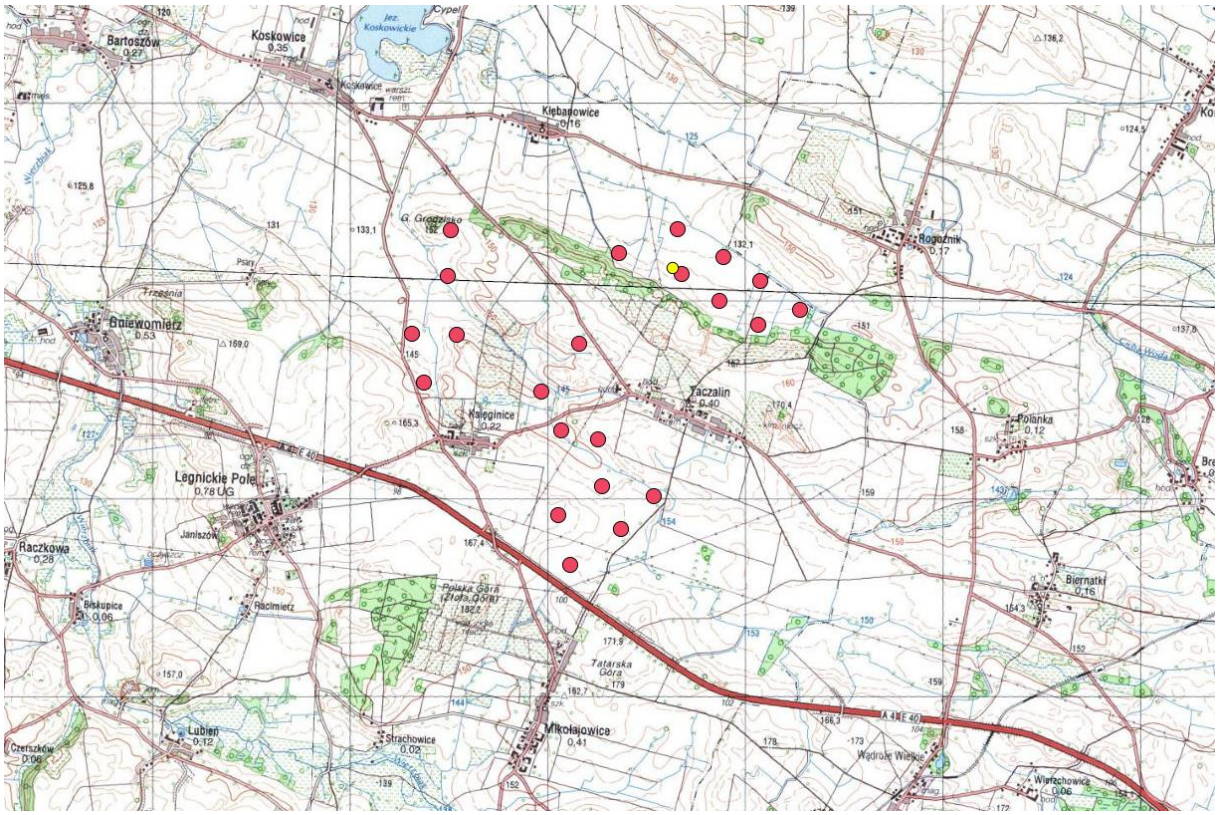
Rys. 6.3 Usytuowanie turbin i punktu pomiarowego dla lokalizacja 2, gdzie: czerwone kropki – turbiny; żółte kropki – punkt pomiarowy.

Trzecim badanym obiektem była pojedyncza turbina wiatrowa firmy Vensys typ 64 o znamionowej mocy elektrycznej równej 1,2 MW (Lokalizacja 3). Podczas przeprowadzonych pomiarów badana turbina była pojedynczą instalacją. Natomiast w chwili obecnej obok badanej turbiny inwestor zlokalizował dwie kolejne. Turbina eksploatowana jest od 2011 roku. Średnica łopat turbiny wynosiła 64 m, a wysokość wieży była równa 85 m. Badana siłowania zlokalizowana była na południe od miejscowości Paczków, w odległości ok. 600 m od terenów zabudowanych wsi Unikowice. Na kierunku północnym i bezpośrednio przy turbinie, w odległości ok. 900 m i odpowiednio ok. 100 m, przebiegają droga krajowa nr 56 oraz droga wojewódzka nr 382 [patrz: Rys. 6.4]. Otoczenie to, z powodu stosunkowo małych odległości oraz dużej uciążliwości akustycznej związanej z ruchem samochodów jest źródłem stałego i wysokiego poziomu tła akustycznego w zakresie infradźwiękowym.



Rys. 6.4 Usytuowanie turbin i punktu pomiarowego dla lokalizacji 3, gdzie: czerwone kropki – turbiny; żółte kropki – punkt pomiarowy.

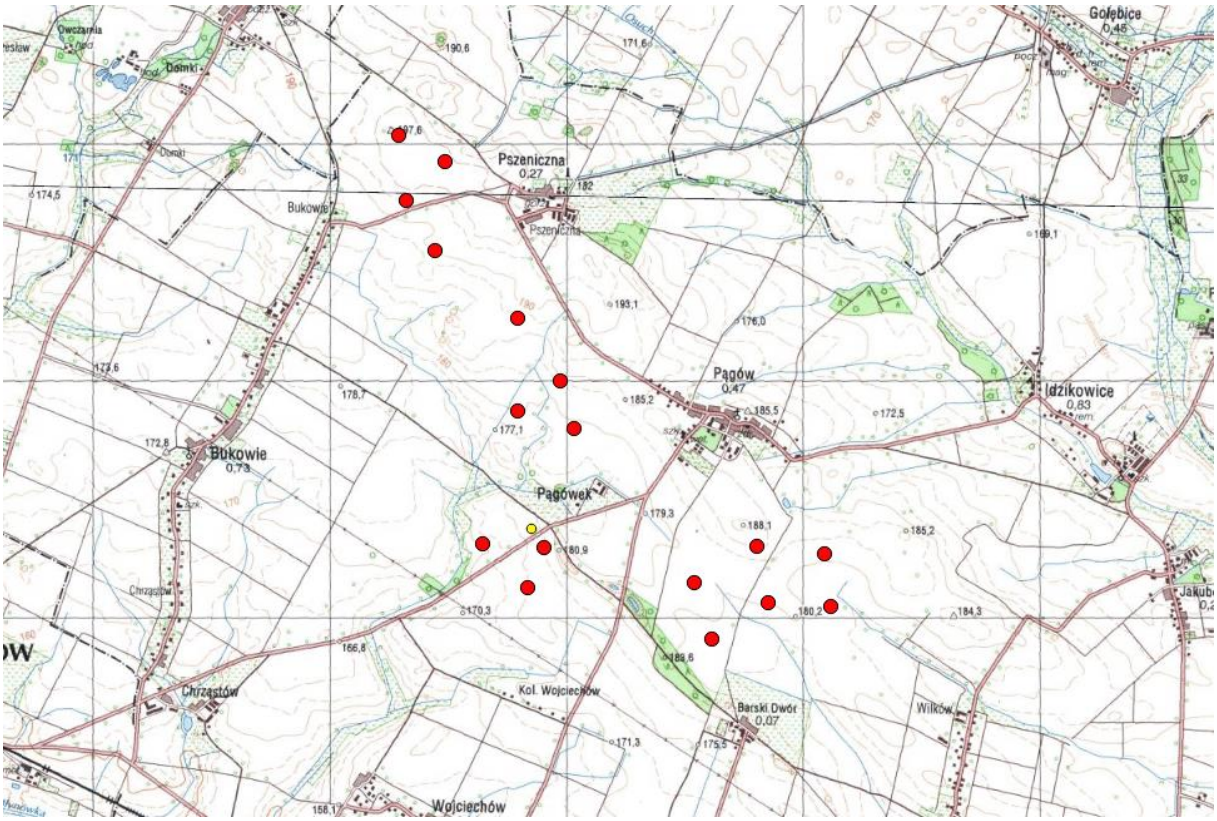
Czwartym badanym obiektem była turbina wiatrowa firmy REPOWER typ MM92 o znamionowej mocy elektrycznej 2 MW (Lokalizacja 4), wchodząca w skład nowo oddanej do użytkowania farmy wiatrowej składającej się z 22 jednakowych turbin, o sumarycznej mocy elektrycznej 45 MW. Turbina była eksploatowana od około trzech miesięcy. Średnica łopat turbiny wynosiła 92 m, a wysokość jej wieży była równa 100 m. Do badań wybrano turbinę usytuowaną, w północnej części farmy. W jej bezpośrednim otoczeniu, pracowało kilka innych turbin. W ten sposób określono emisję hałasu niskoczęstotliwościowego emitowanego na tle pozostałych turbin. Badana turbina zlokalizowana jest na północ od miejscowości Taczalin, w odległości ok. 1200 m od terenów zabudowanych. Na kierunku południowym oraz północnym, w odległości ok. 3300 m i odpowiednio ok. 1000 m, przebiegaja autostrada A4 oraz droga powiatowa nr 2192D [patrz: Rys. 6.5]. Otoczenie to, z powodu dużej uciążliwości akustycznej związanej z ruchem samochodów jest źródłem stałego i wysokiego poziomu tła akustycznego w zakresie infradźwiękowym.



Rys. 6.5 Usytuowanie turbin i punktu pomiarowego dla lokalizacji 4, gdzie: czerwone kropki – turbiny; żółte kropki – punkt pomiarowy.

Piątym badanym obiektem była turbina wiatrowa firmy Vestas typ V112 o mocy elektrycznej 3 MW (Lokalizacja 5), wchodząca w skład nowo oddanej do użytkowania farmy wiatrowej składającej się z 17 jednakowych turbin, o sumarycznej mocy elektrycznej 51 MW. Turbina była eksploatowana od około jednego roku. Średnica łopat turbiny wynosiła 112 m, a wysokość wieży 119 m. Do badań wybrano turbinę usytuowaną, w południowej części farmy. W jej w otoczeniu pracowały pozostałe turbiny wchodzące w skład farmy wiatrowej. W ten sposób określono emisję hałasu niskoczęstotliwościowego emitowanego na tle pozostałych turbin. Badana turbina zlokalizowana jest na południowy-zachód od miejscowości Pągów, w odległości ok. 1600 m od terenów zabudowanych. Na kierunku południowym, w odległości ok. 4200 m, przebiega droga wojewódzka nr 451 [patrz: Rys. 6.6]. Otoczenie to, z powodu niedużej uciążliwości akustycznej oraz stosunkowo dużej odległości jest źródłem niskiego poziomu tła akustycznego w zakresie infradźwiękowym.

Na rys. 6.7 i 6.8 przedstawiono widok stacji meteorologicznej oraz zastosowanej aparatury podczas pomiarów infradźwięków generowanych pracą turbiny wiatrowej dla przykładowej lokalizacji.



Rys. 6.6 Usytuowanie turbin i punktu pomiarowego dla lokalizacji 5, gdzie: czerwone kropki – turbiny; żółte kropki – punkt pomiarowy.

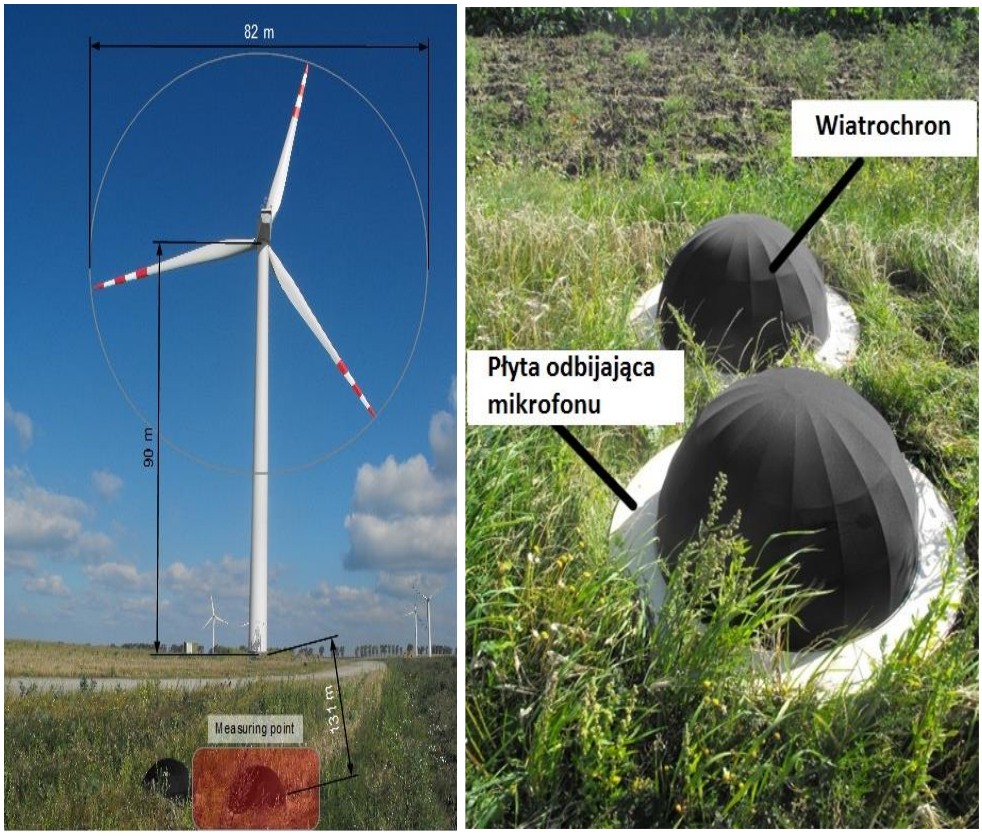
Parametry techniczne wszystkich badanych turbin zestawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1 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

Rys. 6.7 Widok przykładowej lokalizacji stacji meteorologicznej względem badanej turbiny.



Rys. 6.8 Widok przykładowej lokalizacji miejsca pomiaru infradźwięków względem badanej turbiny wiatrowej.

6.2 Wyniki analizy częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych

Pierwszym etapem analizy częstotliwościowej zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych było określenie poziomu dźwięku w paśmie od 1 do 200 Hz. W tym celu oddzielnie dla każdej badanej turbiny wiatrowej obliczone zostały wartości następujących parametrów:

- jednoliczbowy równoważny poziom hałasu,
- poziom hałasu w pasmach oktawowych,
- poziom hałasu w pasmach tercjowych,
- poziom hałasu dla poszczególnych częstotliwości.

Otrzymane w ten sposób wyniki przedstawiają rzeczywiste oddziaływanie rejestrowanych sygnałów infradźwiękowych, reprezentowane przez poziomy nieważone żadną krzywą. W celu przeprowadzenia oceny statystycznej badanych infradźwięków

obliczano, a następnie poddano analizie wartości podstawowych wskaźników statystyk opisowych

W celu sprawdzenia uciążliwości zarejestrowanych zmian poziomu dźwięku w paśmie infradźwiękowym oraz określenia wpływu na otrzymane wyniki stosowanych w akustyce krzywych ważenia, w kolejnym kroku przedstawiono poziomy hałasu dla poszczególnych częstotliwości po ważeniu kolejno krzywymi: A, C i G oraz porównawczo bez ważenia.

Dla obliczonych widm amplitudowych zmierzonych sygnałów infradźwiękowych przeprowadzono porównanie wyników uzyskanych dla badanych turbin wiatrowych. W tym celu zestawiono ze sobą wyniki poziomu hałasu dla poszczególnych częstotliwości bez ważenia oraz odpowiednio po ważeniu kolejno krzywymi: A, C i G.

W następnym etapie wykonanych analiz, dla obliczonych widm zmian poziomu dźwięku w funkcji częstotliwości, przeprowadzono aproksymację otrzymanych przebiegów. Zastosowanie aproksymacji miało na celu uwydatnienie częstotliwości rezonansowych mogących wystąpić w wyznaczonych widmach sygnałów infradźwiękowych. W celu znalezienia najlepszej funkcji aproksymującej przeprowadzono testy porównawcze z wykorzystaniem różnych modeli, a jako kryterium oceny zastosowano współczynnik determinacji R^2.

Ostatnim krokiem przeprowadzonych analizy było obliczenie rozkładów czasowo-częstotliwościowych zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych, które umożliwiły obserwację zmian czasowych w zarejestrowanych widmach częstotliwościowych hałasu.

6.2.1 Wyniki pomiarów badanych turbin

6.2.1.1 Lokalizacja 1 - Szadek

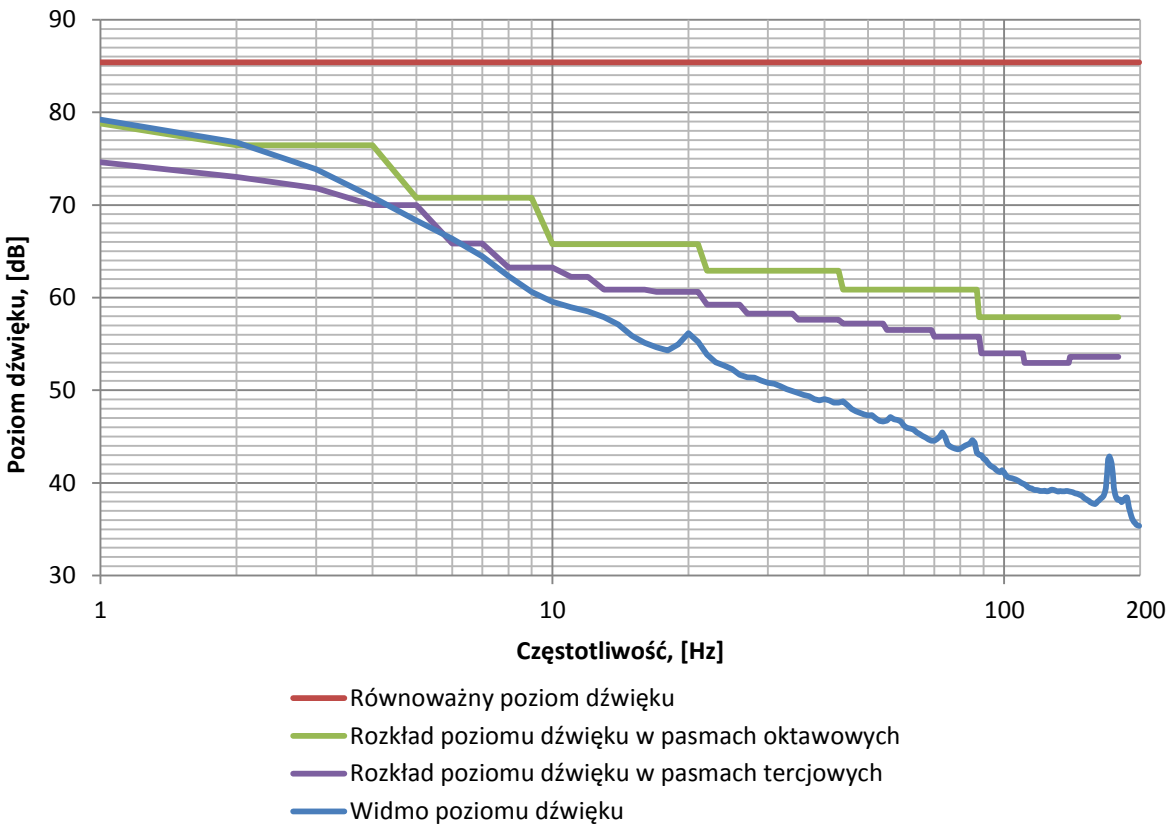
Pomiary dla lokalizacji 1 przeprowadzono jesienią, w dniu o dużej amplitudzie zmian prędkości wiatru. Umożliwiło to rejestrację poziomu hałasu w możliwie szerokim spektrum zmian parametrów znamionowych pracy badanej turbiny. Czas pomiaru wynosił cztery godziny i uzależniony był jedynie pojemnością posiadanych baterii obsługujących sprzęt pomiarowy. Zakresy zmian zarejestrowanych parametrów charakteryzujących warunki meteorologiczne występujące podczas pomiarów przedstawione został w tabeli 6.2.

Tabela 6.2 Zestawienie wartości parametrów meteorologicznych występujących podczas pomiarów dla lokalizacji 1

Mierzony parametr	Wartość maksymalna	Wartość minimalna	Wartość średnia
Temperatura [°C]	5,9	5,1	5,6
Wilgotność [%]	79	75	77,5
Punkt rosy [°C]	2,3	1,6	2,0
Ciśnienie [hPa]	1021,9	1021,2	1021,5
Prędkość wiatru [m/s]	9,8	3,6	6,2
Wielkośc opadów [mm]	0	0	0

Z przedstawionych w tabeli 6.2 danych wynika, że podczas wykonywanych pomiarów zmianie ulegała jedynie prędkość wiatru. W przypadku turbin wiatrowych parametr ten jest głównym czynnikiem wpływającym na wydajność energetyczną i decyduje o pracy całego układu mechaniczno-elektrycznego. Podczas pomiarów zarejestrowano zmiany prędkości wiatru w zakresie od 3,6 m/s do 9,8 m/s, co odpowiada praktycznie całemu spektrum zmian wydajności energetycznej turbiny wynikającej z przebiegu krzywej mocy. Przy prędkości około 4 m/s następował rozruch badanej turbiny, natomiast przy prędkości ok. 10 m/s turbina osiąga pełną wydajność energetyczną (znamionowe optymalne warunki pracy), która utrzymuje się na stałym poziomie aż do maksymalnej prędkości wiatru równej 24 m/s, przy której następuje automatyczne wyłączenie ze względów bezpieczeństwa obracających się łopatek wirnika turbiny.

Zarejestrowane Wyniki zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, reprezentującym oddziaływanie badanej turbiny w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości przedstawiono na Rys. 6.9.



Rys. 6.9 Zależność zmian poziomu hałasu infradźwiękowego od wartości częstotliwości dla turbiny T1.

Na podstawie uzyskanych zależności można stwierdzić, że do oceny hałasu w paśmie niskich i infradźwiękowych częstotliwości najodpowiedniejsze jest widmo poziomu dźwięku, otrzymane w wyniku przekształcenia częstotliwościowego z wykorzystaniem transformaty FFT, z krokiem równym 1 Hz. Uzyskane w tym zakresie wyniki umożliwiły dokładne wyznaczenie przebiegu zmian widma częstotliwościowego zarejestrowanych sygnałów. Wraz ze zmianą sposobu analizy badanych sygnałów na coraz bardziej ogólną, zacierają się szczegóły analizowanych widm, a w przypadku ich jednoliczbowej prezentacji, można jedynie mówić o ogólnym poziomie hałasu. Generalnie wraz ze wzrostem szczegółowości wykonywanych analiz wyznaczone wartości poziomu hałasu mają niższe wartości . Jedynie dla częstotliwości poniżej 4 Hz dla filtrów tercjowych i odpowiednio poniżej 2 Hz dla pasm oktawowych, rejestrowane wartości są mniejsze niż dla widm obliczonych za pomocą przekształcenia FFT, co wynika z faktu, że dla tych częstotliwości szerokość filtrów jest mniejsza niż 1 Hz.

W przypadku badanej turbiny, ogólny poziom hałasu, bez ważenia krzywą korekcyjną, w zakresie od 1 do 200 Hz wynosił 85,4 dB. Analizując rozkład widma w badanym paśmie częstotliwości wyraźnie widać, że maksymalne poziomy hałasu występują w zakresie pojedynczych herców, a ich wartości mieszczą się w przedzialeok. (73-79) dB. Wraz ze wzrostem częstotliwości mierzone poziomy zmniejszają się od 4 do 10 dB na oktawę i przy częstotliwości 200 Hz osiągają poziom 35 dB. W zarejestrowanym widmie wyszczególnić można dwie częstotliwości tonalne, dla których występuje wzrost poziomu ciśnienia akustycznego. Dla częstotliwości 21 Hz można wyróżnić pierwszy wzrost hałasu odpowiednio o (2-3) dB względem sąsiednich częstotliwości, co odpowiada podwojeniu energii akustycznej. Drugie wzmocnienie występuje dla częstotliwości 172 Hz i ma większą dynamikę, rzędu 4 dB, co odpowiada wzrostowi energii akustycznej o 150 %.

W celuotrzymania pełniejszego opisu wyznaczonych widm amplitudowych zarejstrowanego poziomu dźwięku, obliczono wartości podstawowych wskaźników statystyk opisowych, a uzyskane w tym zakresie wyniki przedstawiono w tabeli 6.3.

Tabela 6.3 Zestawienie wartości wskaźników statystyk opisowych obliczonych dla widma amplitudowego poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości infradźwiękowych turbiny T1

Parametr		**Poziom dźwięku [dB]**	**Częstotliwość [Hz]**
Częstotliwość medianowa	dla zakresu 1 ÷ 100 Hz	47,4	50
	dla zakresu 1 ÷ 200 Hz	41,6	96
Częstotliwości rezonansowe		56,2	21
		42,5	172
Maksymalny poziom dźwięku		79,7	1
Minimalny poziom dźwięku		35,4	200
Średni poziom dźwięku		61,6	9 ÷ 10

6.2.1.2 Lokalizacja 2 - Lipniki

Pomiary wykonane dla lokalizacji 2 przeprowadzono w okresie letnim, w dniu o dużej amplitudzie zmian prędkości wiatru i przy zmieniającej się wartości temperatury powietrza. Umożliwiło to rejestrację zmian poziomu hałasu w możliwie szerokim spektrum pracy badanej turbiny. Czas pomiaru wynosił cztery godziny. Zakresy zmian wartości parametrów

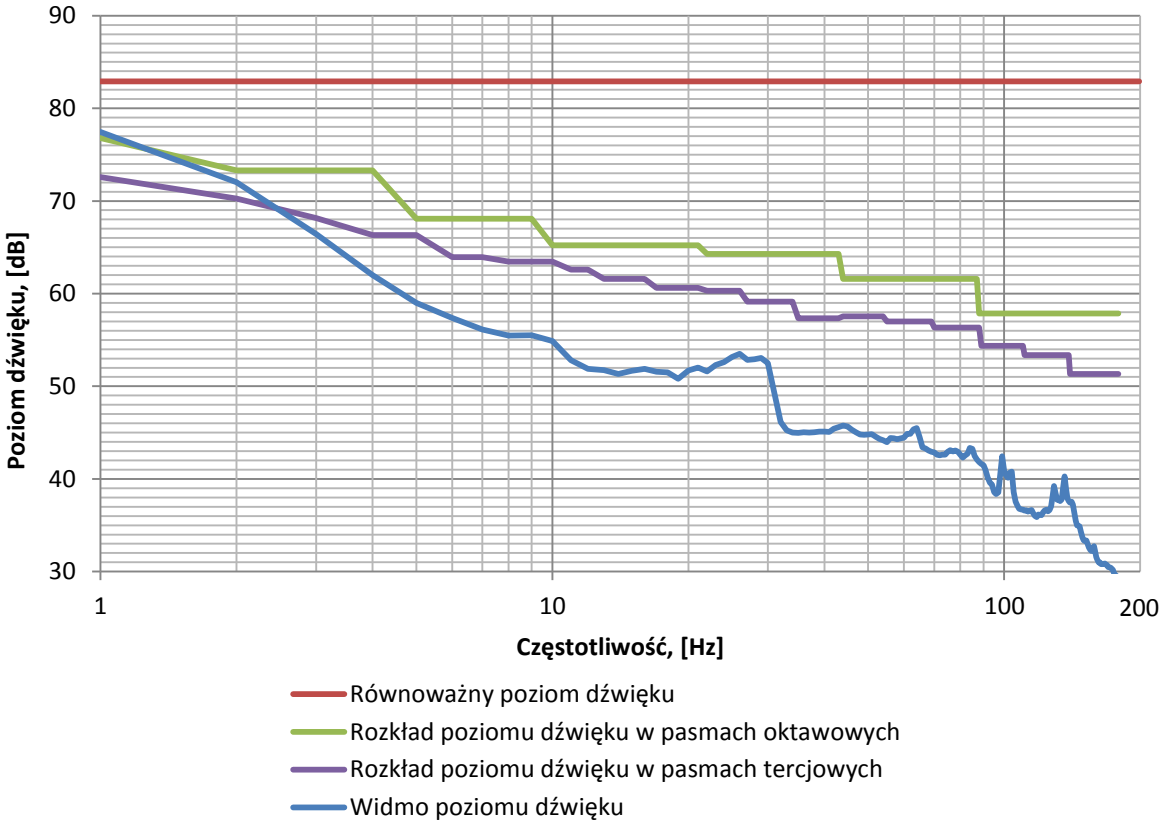
charakteryzujących warunki meteorologiczne, które występowały podczas pomiarów przedstawionoe w tabeli 6.4.

Tabela 6.4 Zestawienie wartości parametrów meteorologicznych występujących podczas pomiarów dla lokalizacji 2

Mierzony parametr	Wartość maksymalna	Wartość minimalna	Wartość średnia
Temperatura [°C]	24,8	17,1	21,2
Wilgotność [%]	71	44	56,5
Punkt rosy [°C]	13,2	11,2	12,0
Ciśnienie [hPa]	1001,6	1000,2	1000,8
Prędkość wiatru [m/s]	7,6	1,3	4,8
Wielkość opadów [mm]	0	0	0

Podobnie jak w przypadku lokalizacji 1 podczas pomiarów zmianie ulegała głównie prędkość wiatru. Zakres zmian prędkości wiatru w przedziale od 1,3 m/s do 7,6 m/s, odpowiada całemu spektrum zmian wydajności energetycznej turbiny. Przy prędkości około 3,5 m/s badana turbina włączała się, osiągając jedynie kilka procent maksymalnej mocy znamionowej. Natomiast przy prędkości bliskiej 8 m/s turbina osiągała około dziewięćdziesięciu procent swojej znamionowej wydajności energetycznej. Maksymalną wydajność turbina osiąga przy prędkości wiatru równej 10 m/s, która utrzymuje się na stałym poziomie, aż do maksymalnej prędkości wiatru równej 24 m/s, przy której następuję wyłączenie turbiny ze względów bezpieczeństwa.

Wyniki zarejestrowanych podczas pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, reprezentującym oddziaływanie turbiny w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości przedstawione zostały na Rys.6.10.



Rys. 6.10 Zależność zmian poziomu hałasu infradźwiękowego od wartości częstotliwości dla turbiny T2.

Podobnie jak w przypadku turbiny T1, na podstawie wyznaczonych zależności można zauważyć, że do oceny hałasu w paśmie niskich i infradźwiękowych częstotliwości najodpowiedniejsza jest widmo poziomu dźwięku, otrzymane w wyniku przekształcenia FFT z krokiem 1 Hz. Prezentowane charakterystyki obrazują przebiegi widm zmierzonych sygnałów uzyskane w wyniku zastosowania różnych narzędzi obliczeniowych o różnej dokładności częstotliwościowej. Analogicznie jak w przypadku turbiny T1, w zakresie najniższych częstotliwości, poniżej 3 Hz dla filtrów tercjowych oraz poniżej 2 Hz dla pasm oktawowych, rejestrowane poziome są mniejsze niż uzyskane dla analizy FFT, co wynika z faktu, że dla tych częstotliwości szerokość filtrów jest mniejsze niż 1 Hz.

W przypadku badanej turbiny ogólny poziom hałasu, bez ważenia krzywą korekcyjną, w zakresie od 1 do 200 Hz wynosił 82,9 dB. Analizując rozkład widma w badanym paśmie częstotliwości można zauważyć , że maksymalne poziomy hałasu występują w zakresie pojedynczych herców i mieszczą się w przedziale wartości ok. (72-79) dB. Wraz ze wzrostem częstotliwości, do wartości 10 Hz, mierzone poziomy dźwięku znacząco maleją do poziomu

ok. 55 dB. Powyżej 10 Hz dynamika redukcji znacząco maleje i poziom hałasu nieco się stabilizuje, a od częstotliwości 20 Hz do 31 Hz ulega nawet zwiększeniu. Następnie występuje znaczące zmniejszenie się wartości poziomu dźwięku, rzędu (7-8) dB, po którym następuje dalsze ale stosunkowo wolniejsze zmniejszanie się jego wartości . Powyżej częstotliwości 100 Hz poziom dźwięku znowu zaczyna znacząco opadać, przy czym występują dwa podbicia tonalne, odpowiednio dla częstotliwości 100 Hz i 137 Hz. Dla uzyskanych zależności brak jest wyraźnych składowych tonalnych. Jedynie powyżej częstotliwości 100 Hz wskazać można charakterystyczne piki w uzyskanym widmie sygnału. Badana turbina charakteryzuje się natomiast pasmową emisją w zakresie od 20 do 31 Hz, gdzie następuje zwiększenie poziomu hałasu do poziomu 53 dB.

W celu otrzymania pełniejszej charaketertstyki wyznaczonego widma amplitudowego poziomu dźwięku obliczono podstawowe wskaźniki statystyk opisowaych, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 6.5.

Tabela 6.5 Zestawienie wartości wskaźników statystyk opisowych obliczonych dla widma amplitudowego poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości infradźwiękowych turbiny T2

Parametr		**Poziom dźwięku [dB]**	**Częstotliwość [Hz]**
Częstotliwość medianowa	dla zakresu 1 ÷ 100 Hz	45,0	36
	dla zakresu 1 ÷ 200 Hz	41,6	93
Częstotliwości rezonansowe		42,4	100
		40,3	137
Maksymalny poziom dźwięku		79,2	1
Minimalny poziom dźwięku		28,2	190
Średni poziom dźwięku		59,3	6

6.2.1.3 Lokalizacja 3 - Paczków

Rejestracje sygnałów infradźwiękowych dla lokalizacji 3 przeprowadzono w okresie jesieni, w dniu, w którym występowała stałą wartość prędkości wiatru. Umożliwiło to wykonanie pomiarów przy stałych parametrach pracy turbiny. Zakresy zmian wartości parametrów charakteryzujących występujące podczas badań warunki meteorologiczne przedstawione zostały w tabeli 6.6. W czasie prowadzonych pomiarów stwierdzono

występowanie bardzo dużej liczby zdarzeń zakłócających wykonywane rejestracje. W bezpośrednim otoczeniu turbiny, między wieżą i punktem pomiarowym, przebiegała droga wojewódzka nr 382, łącząca drogę krajową nr 46 z granicą polsko-czeską. Na drodze tej panował wzmożony ruch pojazdów samochodowych, co w sposób znaczący wpływało na zwiększenie poziomu tła akustycznego. Podczas pomiarów prowadzone były także prace rolne na otaczających polach, podczas których traktor kilka razy przejeżdżał obok punktu pomiarowego. Dodatkowo po uruchomieniu układu pomiarowego, badana turbina przestała pracować i przełączyła się w tryb monitorujący zmiany prędkości wiatru, w celu ponownego uruchomienia. Wymienione wyżej zdarzenia sprawiły, że po niespełna godzinnym pomiarze, wstrzymano rejestrację, a otrzymane wyniki postanowiono przedstawić jako tło towarzyszące pracy turbiny wiatrowej.

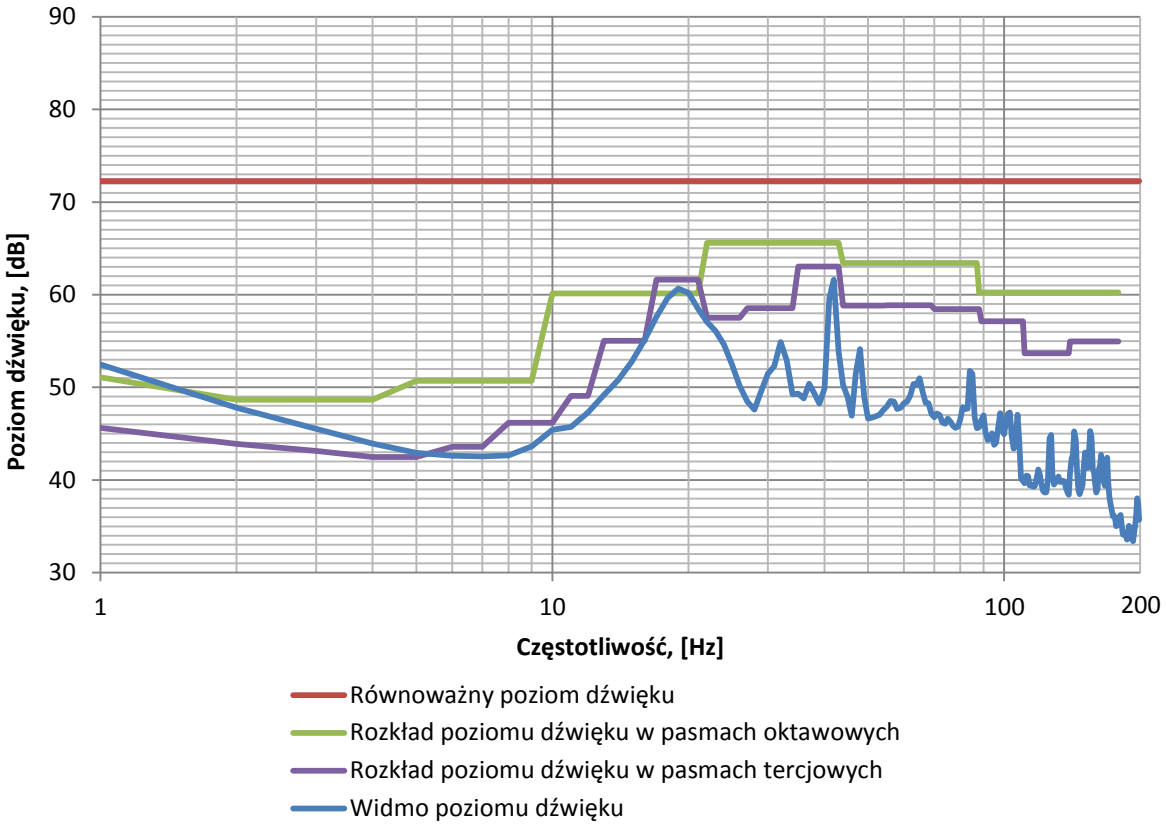
Tabela 6.6 Zestawienie wartości parametrów meteorologicznych występujących podczas pomiarów dla lokalizacji 3

Mierzony parametr	Wartość maksymalna	Wartość minimalna	Wartość średnia
Temperatura [°C]	14	13	13,5
Wilgotność [%]	70	60	65,0
Punkt rosy [°C]	2,0	4,0	3,0
Ciśnienie [hPa]	1028,7	1028,6	1028,6
Prędkość wiatru [m/s]	4,0	0,8	3,0
Wielkość opadów [mm]	0	0	0

Podczas wykonanych pomiarów badana turbina pracował jedynie przez kilka pierwszych minut. Przez pozostały czas miernik rejestrował jedynie zdarzenia akustyczne związane bezpośrednio z przejeżdżającymi pojazdami po sąsiadujących drogach oraz hałasy towarzyszące prowadzonym pracom sprzętu rolniczego na pobliskich polach. Podczas badań warunki meteorologiczne utrzymywały się na stałym poziomie i jedynie prędkość wiatru zmniejszała się do wartości, przy której nastąpiło wyłączenie turbiny.

Wyniki zarejestrowanych podczas pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, reprezentującym tło towarzyszące oddziaływaniu turbiny

wiatrowej w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości przedstawione zostały na charakterystykach zilustrowanych na Rys. 6.11



Rys. 6.11 Zależność zmian poziomu hałasu infradźwiękowego od wartości częstotliwości dla turbiny T3.

Na przedstawionych zależnościach zauważalny jest brak występowania maksymalnych wartości poziomu dźwięku poniżej częstotliwości 10 Hz. Inaczej niż w omawianych wcześniej przypadkach , maksymalne poziomy występują powyżej częstotliwości 10 Hz. Dodatkowo przebieg widma sygnału jest dużo bardziej zróżnicowany i posiada wiele składowych tonalnych, których poziomy są większe o wartość (4-10) dB. Kształt prezentowanego widma rejestrowanych sygnałów odzwierciedla warunki panujące w otoczeniu badanej turbiny wiatrowej. Duża liczba składowych powyżej 10 Hz, z maksimum przy 19 i 43 Hz, wynikała głównie z przejazdu samochodów oraz pracy traktora w pobliżu punktu pomiarowego. Odległość tych zdarzeń od punktu pomiarowego wynosiła od 4 do 10 m. Ze względu na odległości od źródeł, nastąpiło przesunięcie maksymalnych składowych powyżej częstotliwości 10 Hz.

W przypadku badanej turbiny wiatrowej ogólny poziom hałasu, bez ważenia krzywą korekcyjną, w zakresie od 1 do 200 Hz wynosił 72,3 dB. Analizując rozkład widma w badanym paśmie częstotliwości można zauważyć, że maksymalne poziomy hałasu występują w zakresie (13 – 57) Hz i wynoszą ok. (60-62) dB. Powyżej częstotliwości 100 Hz poziom dźwięku zaczyna zmniejszać wartość, przy czym występuje kilka podbić tonalnych. W przypadku badanej turbiny istniała jedynie możliwość zarejestrowania tła akustycznego towarzyszącego jej pracy. Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że w przypadku zlokalizowania turbiny bezpośrednio przy ruchliwych szlakach komunikacyjnych oraz podczas prac rolniczych prowadzonych na polach, widmo hałasu w zakresie niskich i infradźwiękowych składowych posiada duża liczbę składowych innego pochodzenia, a ogólny klimat akustyczny nie jest znacząco niższy od klimatu występującego podczas pracy turbiny.

W celu otrzymania pełniejszego obrazu dla zmierzonego widma poziomu dźwięku obliczono wartości podstawowych statystyk opisowych, a uzyskane wyniki zostały przedstawione w tabeli 6.7.

Tabela 6.7 Zestawienie wartości wskaźników statystyk opisowych obliczonych dla widma amplitudowego poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości infradźwiękowych turbiny T3

Parametr		**Poziom dźwięku [dB]**	**Częstotliwość [Hz]**
Częstotliwość medianowa	dla zakresu 1 ÷ 100 Hz	48,2	40
	dla zakresu 1 ÷ 200 Hz	44,7	105
Częstotliwości rezonansowe		20	60,6
		43	61,6
Maksymalny poziom dźwięku		61,6	43
Minimalny poziom dźwięku		33,4	194
Średni poziom dźwięku		49,2	-

6.2.1.4 Lokalizacja 4 - Taczalin

Pomiary sygnałów infradźwiękowych dla lokalizacji 4 przeprowadzono w okresie jesieni, w dniu podczas, którego występowała stabilna wartość prędkości wiatru. Umożliwiło to wykonanie rejestracji podczas stabilnej pracy badanej turbiny wiatrowej. Z powodu małej zmienności prędkości wiatru, która stanowi czynnik determinującym wielkość produkowanej

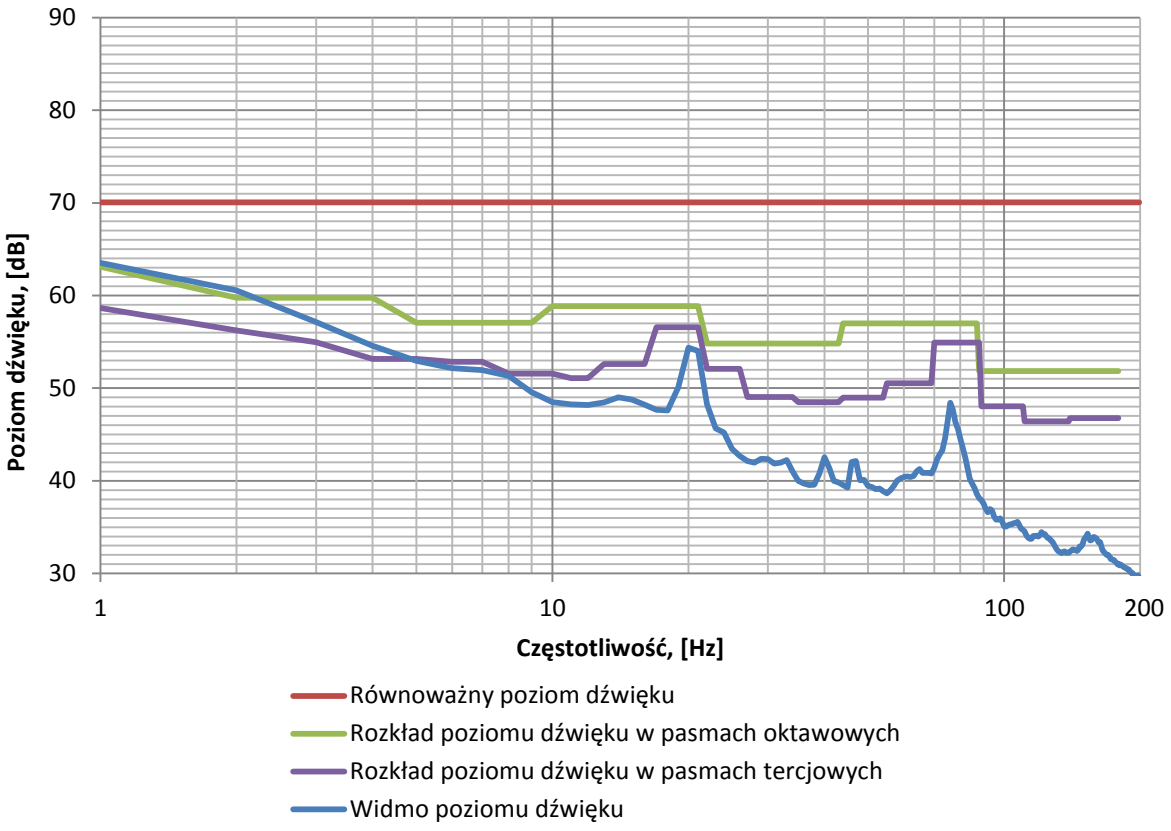
energii, pomiar zakończono po czterdziestu minutach. Zakresy zmian parametrów charakteryzujących warunki meteorologiczne, które występowały podczas pomiarów przedstawiono w tabeli 6.8.

Tabela 6.8 Zestawienie wartości parametrów meteorologicznych występujących podczas pomiarów w lokalizacji 4

Mierzony parametr	Wartość maksymalna	Wartość minimalna	Wartość średnia
Temperatura [°C]	4	2	3
Wilgotność [%]	90	81	85,2
Punkt rosy [°C]	0,3	1,4	0,7
Ciśnienie [hPa]	1024,2	1023,8	1023,9
Prędkość wiatru [m/s]	7,2	6,7	7,0
Opady [mm]	0	0	0

W trakcie pomiarów nie wystąpiły żadne zjawiska zakłócające, a w bezpośrednim otoczeniu punktu pomiarowego nie były zlokalizowane inne dodatkowe źródła hałasu. Podczas pomiarów występowały stabilne warunki meteorologiczne, charakteryzujące się stałą wartością prędkości wiatru i stosunkowo małymi zmianami pozostałych parametrów. Średnia prędkość wiatru podczas pomiarów wynosiła 7 m/s, co odpowiadało pracy turbiny z wydajnością energetyczną powyżej dziewięćdziesięciu procent.

Wyniki zarejestrowanych podczas przeprowadzonych pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, reprezentującym oddziaływanie badanej turbiny wiatrowej w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości, przedstawiono na Rys. 6.12.



Rys. 6.12 Zależność zmian poziomu hałasu infradźwiękowego od wartości częstotliwości dla turbiny T4

Podobnie jak w przypadku turbiny T1 i T2, na podstawie prezentowanych wykresów można stwierdzić, że do oceny hałasu w paśmie niskich i infradźwiękowych częstotliwości najodpowiedniejsza jest analiza z wykorzystaniem przekształcenia FFT.

W przypadku badanej turbiny wiatrowej ogólny poziom hałasu, bez ważenia krzywą korekcyjną, w zakresie od 1 do 200 Hz wynosił 70,0 dB. Analizując rozkład widma w badanym paśmie częstotliwości można zauważyć , że maksymalne poziomy hałasu występują w zakresie pojedynczych herców i wynoszą ok. (57-63) dB. Wraz ze wzrostem częstotliwości, do poziomu 10 Hz, zarejestrowane poziomy dźwięku zmniejszają wartość do poziomu ok. 50 dB. W zakresie od 10 do 29 Hz poziom dźwięku stabilizuje się. Dla częstotliwości 21 Hz występuje pierwsze maksimum w widmie i poziom dźwięku rośnie o 6 dB. W zakresie od 22 do 73 Hz następuje kolejne ustabilizowanie się poziomu hałasu, a następnie dla częstotliwości 77 Hz po raz kolejny wzrasta o 6 dB. Powyżej częstotliwości 80 Hz poziom hałasu dynamicznie zmniejsza wartość do 29 dB dla częstotliwości 200 Hz.

W celu otrzymania pełniejszej dla charakterystyki wyznaczonych widm poziomu dźwięku obliczono wartości podstawowe wskaźników statystyk opisowych, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 6.9.

Tabela 6.9 Zestawienie wartości wskaźników statystyk opisowych obliczonych dla widma amplitudowego poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości infradźwiękowych turbiny T4

Parametr		Poziom dźwięku [dB]	Częstotliwość [Hz]
Częstotliwość medianowa	dla zakresu 1 ÷ 100 Hz	41,4	71
	dla zakresu 1 ÷ 200 Hz	35,6	100
Częstotliwości rezonansowe		54,3	21
		48,4	77
Maksymalny poziom dźwięku		63,5	2
Minimalny poziom dźwięku		29,4	200
Średni poziom dźwięku		46,8	76

6.2.1.5 Lokalizacja 5 - Pągów

Pomiary sygnałów infradźwiękowych dla lokalizacji 5 przeprowadzono w okresie jesieni, w dniu podczas, którego występowała stabilna wartość prędkości wiatru. Umożliwiło to wykonanie rejestracji podczas stabilnej pracy badanej turbiny wiatrowej. Tak samo jak w przypadku turbiny T4, z powodu małej zmienności prędkości wiatru, która stanowi czynnik determinującym wielkość produkowanej energii, pomiar zakończono po dziesięciu minutach. Zakresy zmian parametrów charakteryzujących warunki meteorologiczne, które występowały podczas pomiarów przedstawiono w tabeli 6.10.

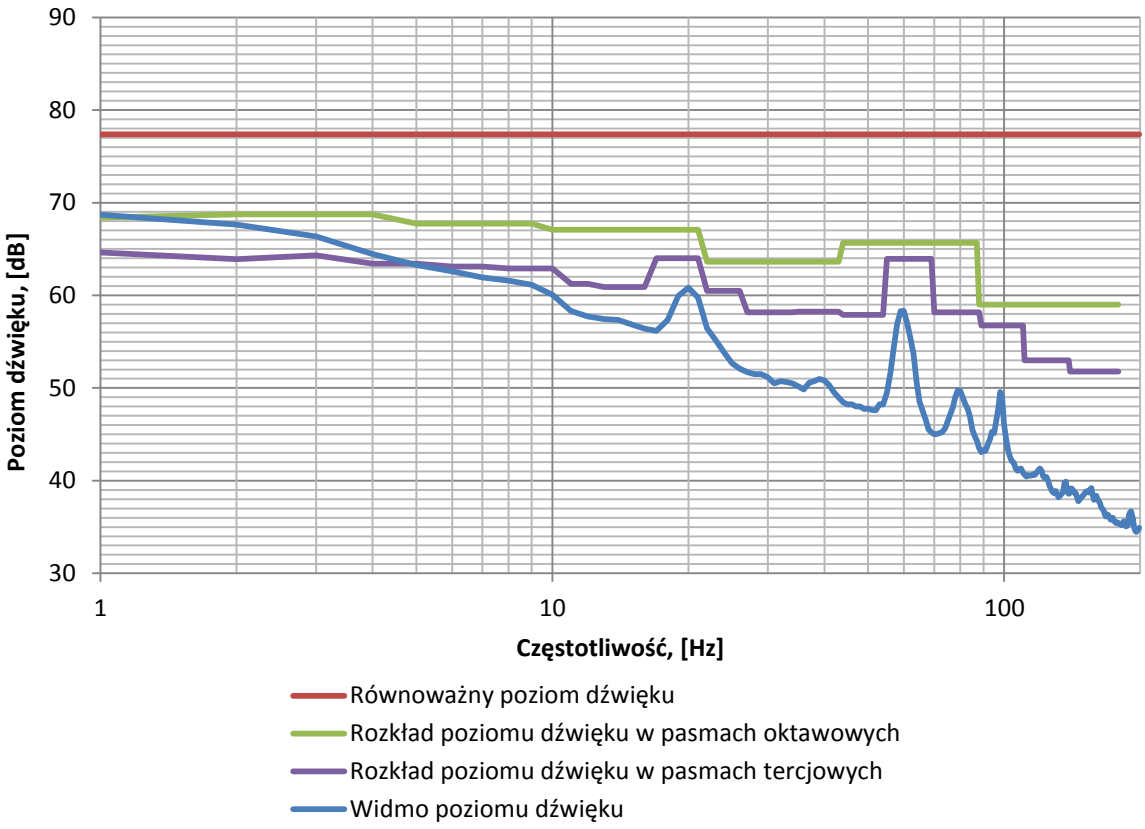
Tabela 6.10 Zestawienie wartości parametrów meteorologicznych występujących podczas pomiarów w lokalizacji 5

Mierzony parametr	Wartość maksymalna	Wartość minimalna	Wartość średnia
Temperatura [°C]	7	5	6
Wilgotność [%]	80	70	76
Punkt rosy [°C]	3	2	2,7
Ciśnienie [hPa]	1020,4	1019,6	1020,1

Prędkość wiatru [m/s]	7,4	7,1	7,3
Opady [mm]	0	0	0

Podczas pomiarów występowały stabilne warunki meteorologiczne, charakteryzujące się stałą wartością prędkości wiatru i stosunkowo małymi zmianami pozostałych parametrów. Średnia prędkość wiatru podczas pomiarów wynosiła 7 m/s, co odpowiadało pracy turbiny z wydajnością energetyczną powyżej dziewięćdziesięciu procent. W trakcie pomiarów nie wystąpiły żadne zjawiska zakłócające, a w bezpośrednim otoczeniu punktu pomiarowego nie były zlokalizowane inne dodatkowe źródła hałasu.

Wyniki zarejestrowanych podczas przeprowadzonych pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, reprezentującym oddziaływanie badanej turbiny wiatrowej w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości, przedstawiono na Rys. 6.13.



Rys. 6.13 Zależność zmian poziomu hałasu infradźwiękowego od wartości częstotliwości dla turbiny T5

Podobnie jak w przypadku turbiny T4, na podstawie prezentowanych wykresów można stwierdzić, że do oceny hałasu w paśmie niskich i infradźwiękowych częstotliwości najodpowiedniejsza jest analiza z wykorzystaniem przekształcenia FFT.

W przypadku badanej turbiny wiatrowej ogólny poziom hałasu, bez ważenia krzywą korekcyjną, w zakresie od 1 do 200 Hz wynosił 77,4 dB. Analizując rozkład widma w badanym paśmie częstotliwości można zauważyć , że maksymalne poziomy hałasu występują w zakresie pojedynczych herców i wynoszą ok. (68-64) dB. Wraz ze wzrostem częstotliwości, do poziomu 10 Hz, zarejestrowane poziomy dźwięku zmniejszają wartość do poziomu ok. 61 dB. W zakresie od 10 do 19 Hz poziom dźwięku stabilizuje się. Dla częstotliwości 21 Hz występuje pierwsze maksimum w widmie i poziom dźwięku rośnie o 3 dB. W zakresie od 26 do 55 Hz następuje łagodne zmniejszanie się poziomu hałasu, a następnie dla częstotliwości 61 Hz po raz kolejny wzrasta o 10 dB. Powyżej częstotliwości 61 Hz, pojawiają się jeszcze dwa podbicia poziom hałasu, dla częstotliwości 81 Hz i 99 Hz, a po nich następuje dalsze zmniejszanie wartość do 35,0 dB dla częstotliwości 200 Hz.

W celu otrzymania pełniejszej dla charakterystyki wyznaczonych widm poziomu dźwięku obliczono wartości podstawowe wskaźników statystyk opisowych, a uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 6.11.

Tabela 6.11 Zestawienie wartości wskaźników statystyk opisowych obliczonych dla widma amplitudowego poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości infradźwiękowych turbiny T5

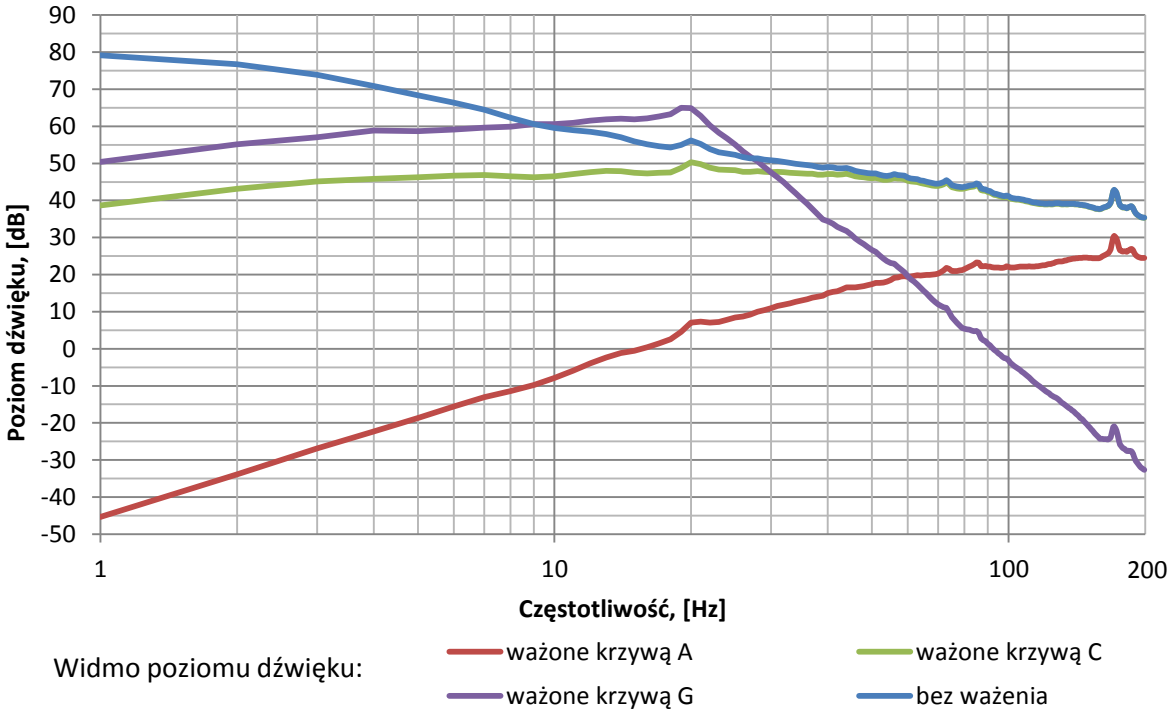
Parametr		**Poziom dźwięku [dB]**	**Częstotliwość [Hz]**
Częstotliwość medianowa	dla zakresu 1 ÷ 100 Hz	50,2	36
	dla zakresu 1 ÷ 200 Hz	43,4	103
Częstotliwości rezonansowe		60,8	21
		58,3	61
Maksymalny poziom dźwięku		68,7	2
Minimalny poziom dźwięku		34,5	197
Średni poziom dźwięku		54,2	25

6.2.2 Zastosowanie krzywych ważenia

Omównione w rozdz. 6.2.1 wyniki przedstawiają zmiany poziomu ciśnienia akustycznego, jakie otrzymano bez zastosowania korekcji wagowej. W celu odniesienia zmierzonych wartości do sposobu percepcji dźwięku przez człowieka konieczne było zastosowanie filtrów wagowych. W zakresie częstotliwości słyszalnych najczęściej wykorzystuje się krzywe ważenia A i C [100]. Natomiast w celu oceny wpływu dźwięków z zakresu infradźwiękowego stosuje się krzywą ważenia G. Szczegółowy opis zastosowanych w przeprowadzonych analizach krzywych ważenia przedstawiono w rozdz. 5.6. Ponieważ najbardziej szczegółowy obraz widm zarejestrowanych infradźwięków otrzymano przy zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera, dlatego ich przebiegi zostały poddane korekcji krzywymi ważenia . W kolejnych podrozdziałach przedstawiono obliczone w tym zakresie wyniki, oddzielnie dla poszczególnych lokalizacji .

6.2.2.1 Lokalizacja 1 – Szadek

Wyniki ważenie krzywymi A, C i G oraz przebieg widma wejściowego bez ważenia, otrzymane podczas pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na Rys. 6.14.



Rys. 6.14 Przebiegi widm hałasu turbiny T1 po zastosowaniu różnych krzywych ważenia.

Zastosowanie krzywych ważenia znacząco zmienia obraz oddziaływania badanych turbin wiatrowych. Równoważny poziom hałasu, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

- poziom dźwięku bez ważenia (FFT) – 85,4 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą A – 45,9 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą C – 66,7 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą G – 75,0 dB .

Krzywe ważenia A i C, opracowane dla potrzeb oceny hałasu w paśmie słyszalnym, poniżej 60 Hz w przypadku krzywej C oraz w całym analizowanym paśmie w przypadku krzywej A, tłumią mierzony sygnał, co w rezultacie daje znacząco niższe wartości równoważnego poziomu dźwięku, stanowiącego podstawę oceny jego uciążliwości dla człowieka.

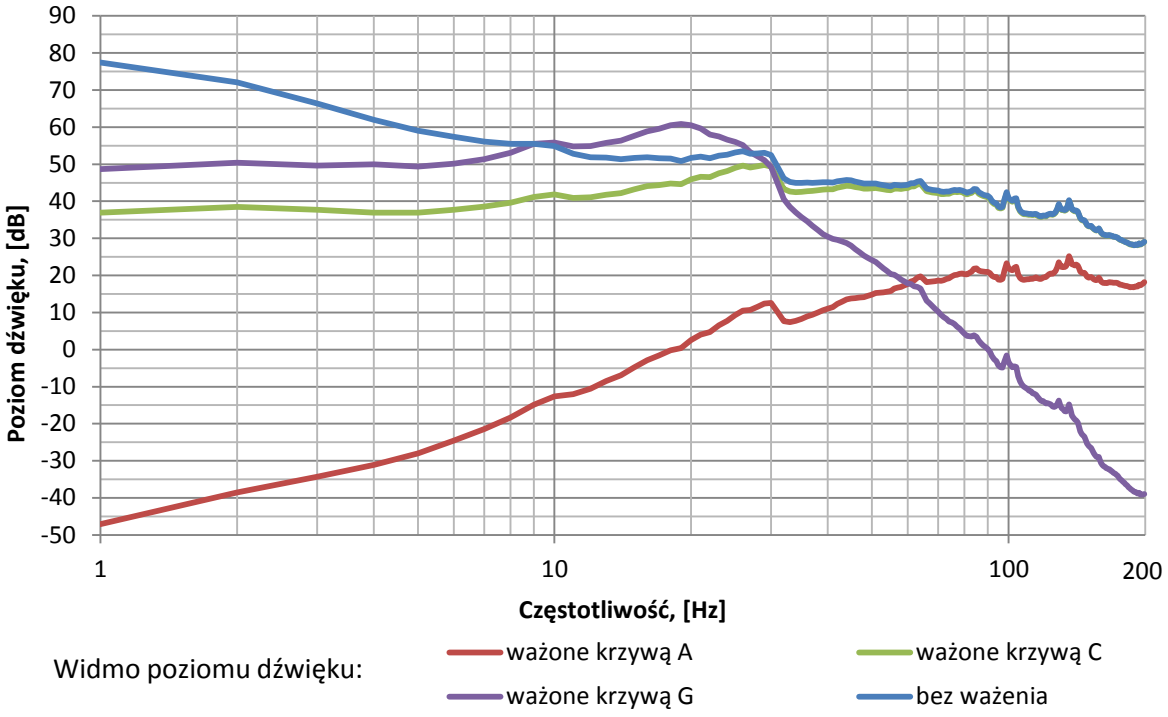
Krzywa ważenia G, która dedykowana jest do oceny uciążliwości hałasu w paśmie infradźwiękowym, posiada charakterystyczne podbicie mierzonych wartości w zakresie od 10

do 30 Hz. Równoważny poziom dźwięku ważony krzywą ważenia G umożliwia wykonanie oceny uciążliwości infradźwięków na organizm ludzki.

W przypadku badanej turbiny wiatrowej kluczowym czynnikiem, wpływającym na wynik oceny uciążliwości akustycznej przy zastosowaniu krzywej ważenia G, jest tonalne podbicie w okolicy 20 Hz.

6.2.2.2 Lokalizacja 2 – Lipniki

Wyniki ważenie krzywymi A, C i G oraz przebieg widma wejściowego bez ważenia, otrzymane podczas pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na Rys. 6.15.



Rys. 6.15 Przebiegi widm hałasu turbiny T2 po zastosowaniu różnych krzywych ważenia.

Równoważny poziom hałasu, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

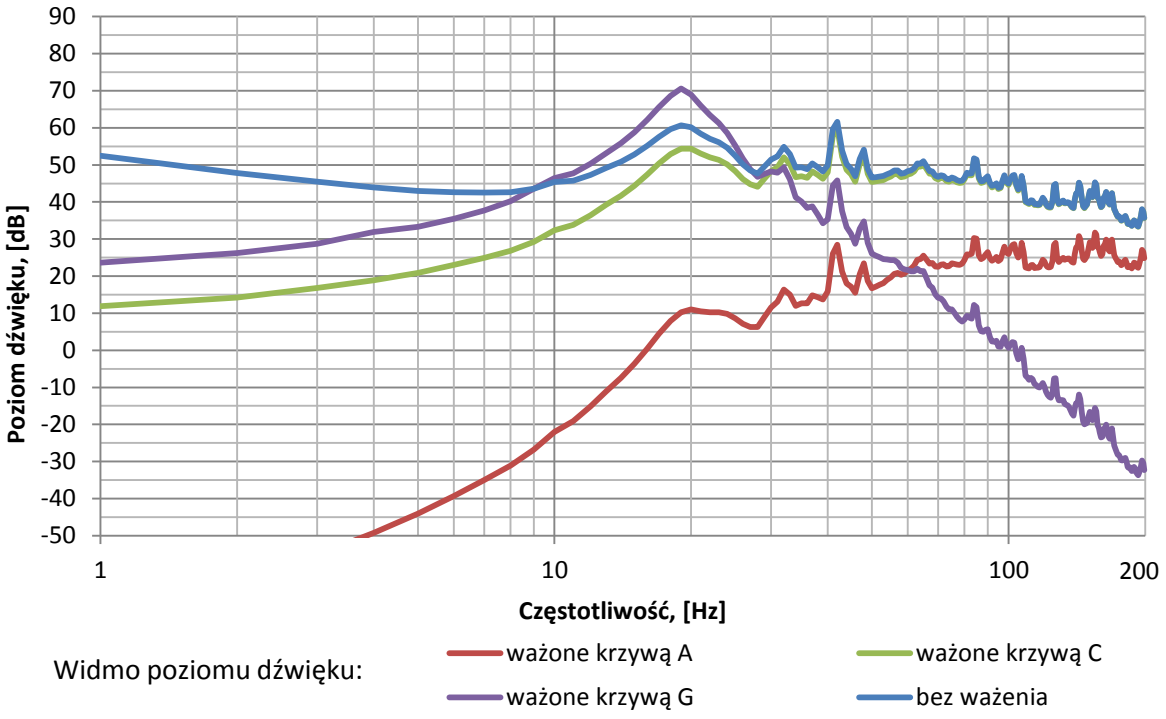
- poziom dźwięku bez ważenia (FFT) – 82,9 dB,

- poziom dźwięku ważony krzywą A – 41,7 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą C – 64,3 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą G – 71,1 dB .

W przypadku badanej turbiny wiatrowej kluczowym czynnikiem, wpływającym na wynik oceny jej uciążliwości akustycznej przy zastosowaniu krzywej ważenia G, jest stabilizacja poziomu hałasu powyżej 10 Hz wraz z pasmowym podbiciem w zakresie od 20 do 30 Hz.

6.2.2.3 Lokalizacja 3 – Paczków

Wyniki ważenie krzywymi A, C i G oraz przebieg widma wejściowego bez ważenia, otrzymane podczas pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na Rys. 6.16.



Rys. 6.16 Przebiegi widm hałasu turbiny T3 po zastosowaniu różnych krzywych ważenia.

Równoważny poziom hałasu, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

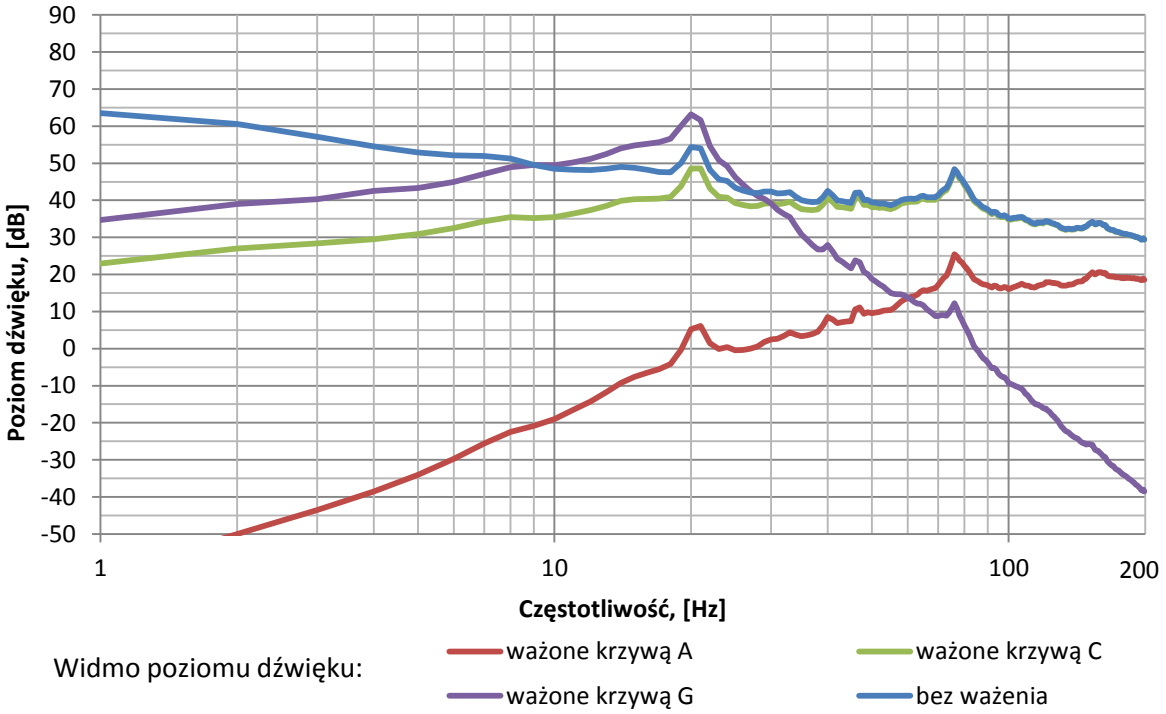
- poziom dźwięku bez ważenia (FFT) – 72,3 dB,

- poziom dźwięku ważony krzywą A – 47,5 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą C – 69,3 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą G – 76,3 dB.

W przypadku badanej instalacji wiatrowej wyraźnie widać wpływy innych niż turbina źródeł hałasu. Poziom hałasu po zastosowaniu krzywej ważenia A, inaczej niż dla wcześniej analizowanych generatorów , nie ulega szybkiemu zmniejszaniu wartości wraz ze spadkiem częstotliwości. Również wartość poziomu dźwięku ważonego krzywą ważenia C determinowana jest składowymi powyżej 30 Hz. Wszystkie te czynniki sprawiają, że pomimo bardzo małego udziału w mierzonych poziomach hałasu pochodzącego od badanej turbiny wiatrowej, równoważne poziomy hałasu ważone różnymi krzywymi utrzymują się na stosunkowo dużych poziomach.

6.2.2.4 Lokalizacja 4 – Taczalin

Wyniki ważenie krzywymi A, C i G oraz przebieg widma wejściowego bez ważenia, otrzymane podczas pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na Rys. 6.17.



Rys. 6.17 Przebiegi widm hałasu turbiny T4 po zastosowaniu różnych krzywych ważenia.

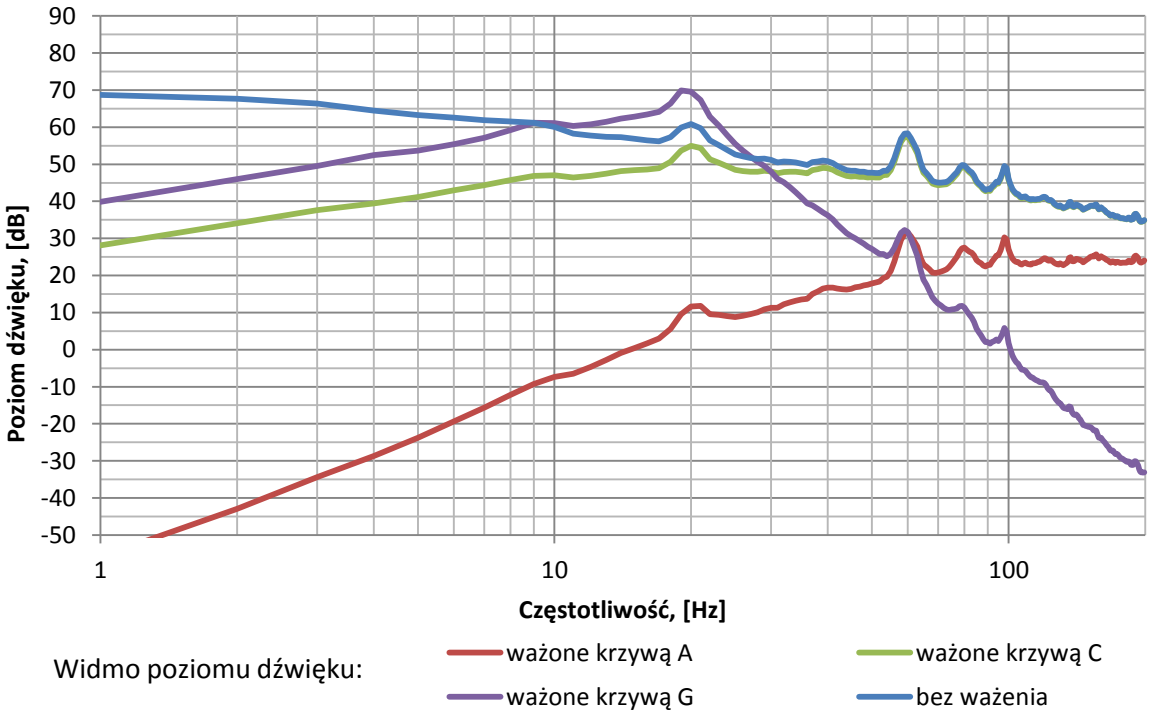
Równoważny poziom hałasu, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

- poziom dźwięku bez ważenia (FFT) – 70,0 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą A – 40,4 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą C – 61,2 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą G – 68,9 dB .

W przypadku badanej turbiny wiatrowej kluczowym czynnikiem, wpływającym na wynik oceny uciążliwości akustycznej przy zastosowaniu krzywej ważenia G, jest tonalne podbicie w okolicy 20 Hz.

6.2.2.5 Lokalizacja 5 – Pągów

Wyniki ważenie krzywymi A, C i G oraz przebieg widma wejściowego bez ważenia, otrzymane podczas pomiarów zmian poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na Rys. 6.18.



Rys. 6.18 Przebiegi widm hałasu turbiny T5 po zastosowaniu różnych krzywych ważenia.

Równoważny poziom hałasu, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

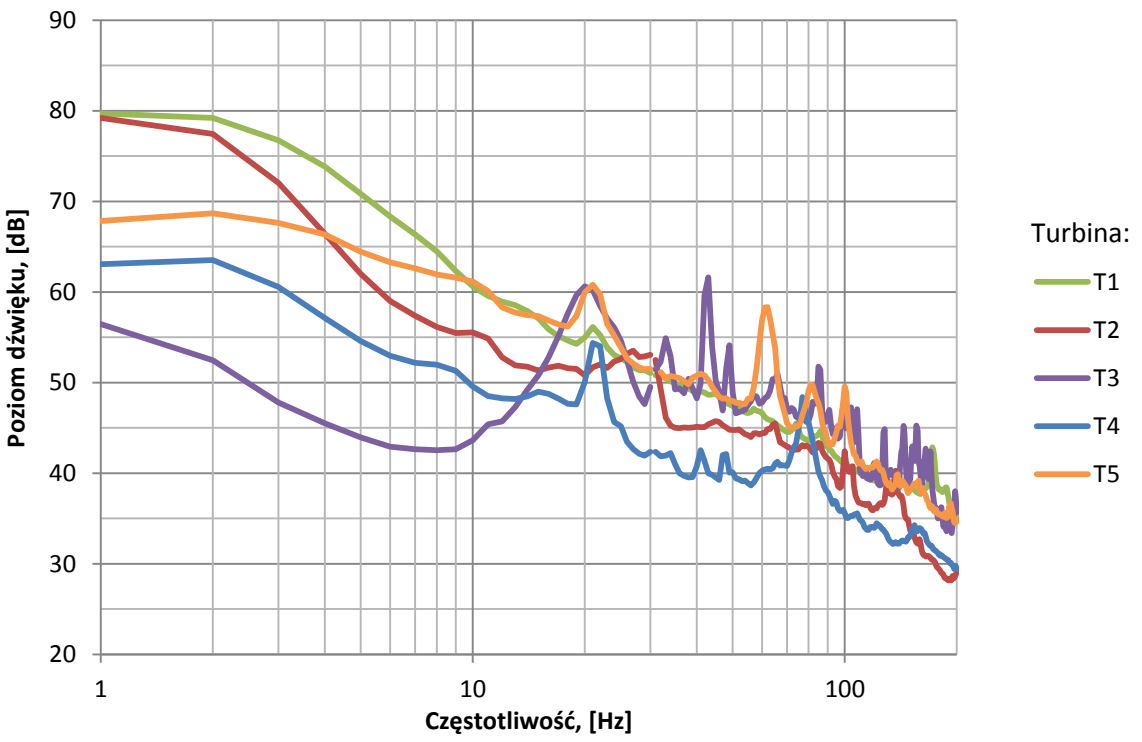
- poziom dźwięku bez ważenia (FFT) – 77,4 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą A – 46,6 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą C – 69,4 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą G – 77,0 dB .

W przypadku badanej turbiny wiatrowej kluczowym czynnikiem, wpływającym na wynik oceny uciążliwości akustycznej przy zastosowaniu krzywej ważenia G, jest tonalne podbicie w okolicy 20 Hz.

6.2.3 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. 6.19) oraz po ważeniu kolejno krzywymi: A (Rys. 6.20), C (Rys. 6.21) i G (Rys. 6.22). Numeracja prezentowanych w zestawieniu turbin wiatrowych jest zgodna z numeracją lokalizacji, dla której wykonywano pomiary.

Zestawienie porównawcze przebiegów widm badanych turbin wiatrowych, które obliczono w wyniku przekształcenia FFT bez ważenia krzywymi, reprezentujących zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, przedstawiono na Rys.6.17.



Rys. 6.19 Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5.

Przedstawione na Rys. 6.19 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.

W przedstawionych widmach wyróżnić można dwa charakterystyczne przedziały dominujących częstotliwości.

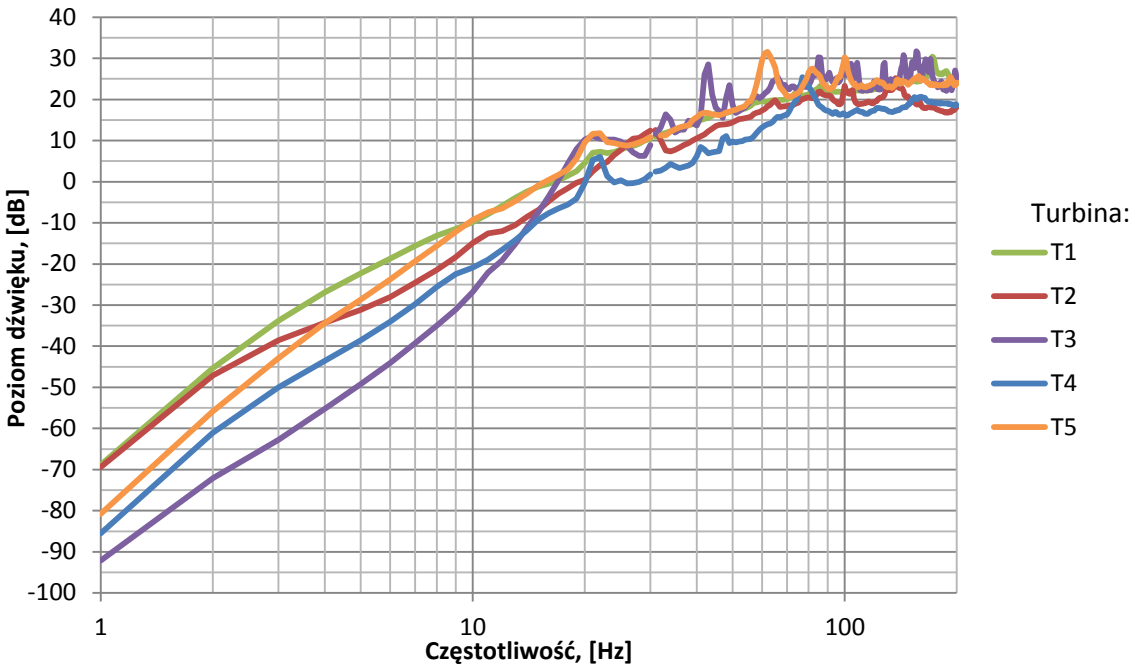
W pierwszym zakresie (1 – 15) Hz, najgłośniejsza jest turbina T1, a następnie T2 i T4. Turbina T5 natomiast do częstotliwości 4 Hz jest cichsza od T1 i T2, od 4 do 10 Hz jest cichsza jedynie od turbiny T1, a powyżej 10 Hz jej poziom hałasu zrównuje się z T1. Rejestrowane w tym zakresie poziomy hałasu turbiny T3 są najniższe, co spowodowane jest brakiem pracy turbiny wiatrowej. Dla pracujących turbin charakterystyczne jest zwiększanie się poziomu hałasu wraz ze zmniejszaniem się częstotliwości.

W drugim przedziale, znajdującym się powyżej częstotliwości ok. 15 Hz, najwyższe poziomy hałasu uzyskano dla widma turbiny T3 i T5. W przypadku turbiny T3 dominującą rolę miały przejazdy samochodów oraz prace sprzętu rolniczego na polach. Natomiast w przypadku turbiny T5 charakterystyczny jest wzrost poziomu hałasu przy częstotliwościach rezonansowych. Porównując poziomy dźwięku turbin T1, T2 i T4, zauważyć można, że najwyższe poziomy emituje turbina T1. Ponadto dla częstotliwości tonalnych turbin T2 i T4, ich poziom dźwięku zbliżają się, a niekiedy nawet przekraczają wartości poziomów zmierzonych dla turbiny T1.

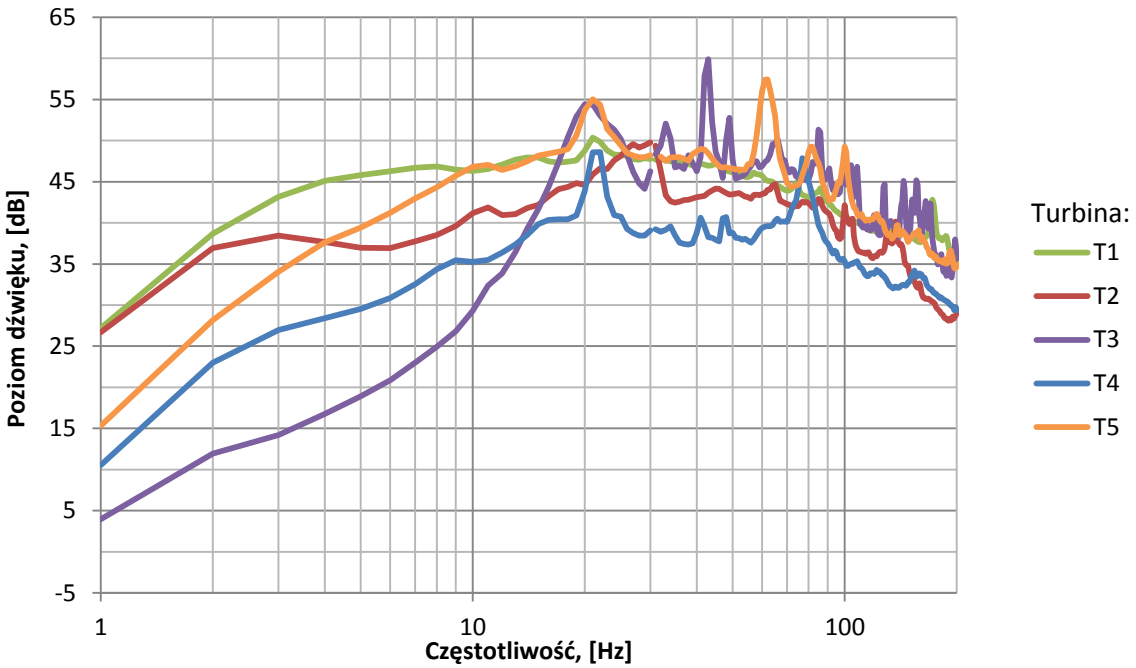
Równoważny poziom hałasu badanych turbin wiatrowych, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

- Poziom dźwięku bez ważenia (FFT):
    - T1 – 85,4 dB,
    - T2 – 82,9 dB,
    - T3 – 72,3 dB,
    - T4 – 70,0 dB,
    - T5 – 77,4 dB.

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. 6.20 i 6.21.



Rys. 6.20 Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego ważonego krzywą korekcyjną A zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5.



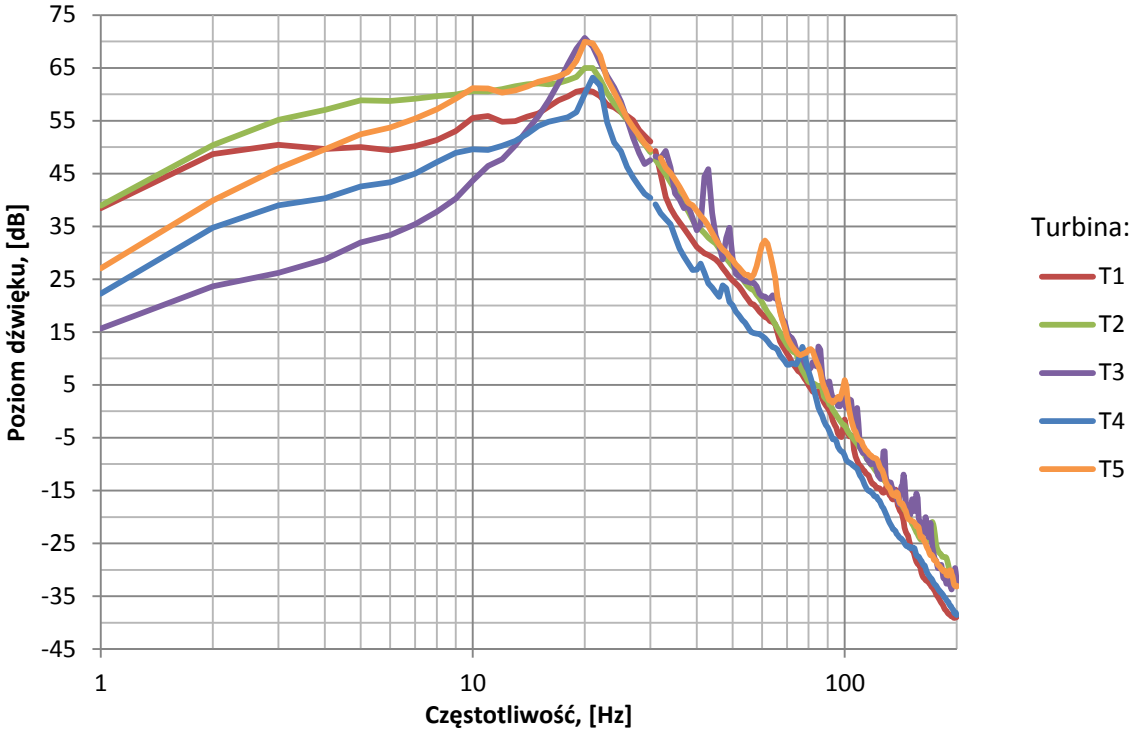
Rys. 6.21 Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego ważonego krzywą korekcyjną C zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5.

Zastosowanie krzywych ważenia nie wpływa na zmianę przebiegów analizowanych widm. W badanym zakresie częstotliwości obie krzywe ważenie tłumią sygnał. Jedyną różnicą między krzywymi ważenia jest szybkość tego tłumienia. Wszystkie zależności między widmami opisane w rozdziale wcześniejszym są analogiczne .

Równoważny poziom hałasu poszczególnych turbin wiatrowych, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

- Poziom dźwięku ważony krzywą A:
  - T1 – 45,9 dB,
  - T2 – 41,7 dB,
  - T3 – 47,5 dB,
  - T4 – 40,4 dB,
  - T5 – 46,6 dB.
- Poziom dźwięku ważony krzywą C:
  - T1 – 66,7dB,
  - T2 – 64,3 dB,
  - T3 – 69,3 dB,
  - T4 – 61,2 dB,
  - T5 – 69,4 dB.

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. 6.22.



Rys. 6.22 Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego ważonego krzywą korekcyjną G zmierzonego przy turbinach wiatrowych T1, T2 , T3 i T4.

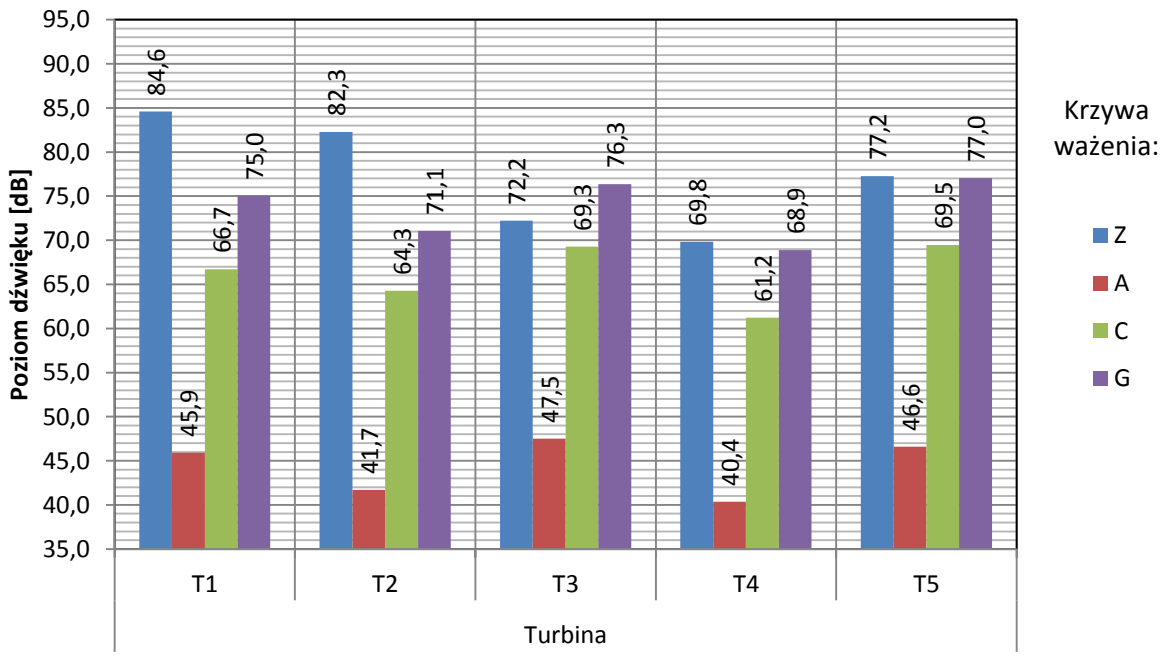
Równoważny poziom hałasu badanych turbin wiatrowych, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

- Poziom dźwięku ważony krzywą G:
  - T1 – 75,0 dB,
  - T2 – 71,1 dB,
  - T3 – 76,3 dB,
  - T4 – 68,9 dB,
  - T5 – 77,0 dB.

Zastosowanie krzywej ważenia G również nie zmienia natury (kształtu) 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 opisano 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 oraz po ich zastosowaniu. Obliczone wartości równoważnego poziomu dźwięku, które wyznaczono oddzielnie dla analizowanych turbin wiatrowych przedstawiono na Rys. 6.23.



Rys. 6.23 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 zmniejszenie oddziaływania. Zmiana krzywej ważenia na krzywą C, nie obcina zakresu niskich częstotliwości, za to eliminuje składowe infradźwiękowe. Do ceny oddziaływania na człowieka składowych infradźwiękowych wykorzystuje się krzywą ważenia G.

6.2.4 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. Analizie poddano sześć funkcji aproksymujących. Dla każdej z badanych turbin wiatrowych określono parametry modelu testowanej funkcji aproksymującej. Wyniki przeprowadzonych analiz w postaci równań opisujących funkcje aproksymujące oraz odpowiadające im wartości współczynnika determinacji R^2 przedstawiono w tabeli 6.12. Na rys. od 6.24 do 6.30 przedstawiono kolejno widmo amplitudowe wejściowe, otrzymane na podstawie przeprowadzonych pomiarów, oraz widma otrzymane dla poszczególnych modeli.

Tabela 6.12 Krzywe modelowe użyte do aproksymacji wyznaczonych widm amplitudowych i odpowiadające im wartości współczynnika determinacji R^2.

Model:	**Wykładniczy, równanie opasujące:**		$f(x)=a\cdot\exp(b\cdot x)+c\cdot\exp(d\cdot x)$		
Parametr	**Turbina T1**	**Turbina T2**	**Turbina T3**	**Turbina T4**	**Turbina T5**
a	31,86	36,24	-585100,00	18,80	14,19
b	-0,08	-0,27	0,00	-0,12	-0,11
c	50,21	54,17	585100,00	46,45	56,95
d	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
R^2	0,97	0,97	0,71	0,90	0,93

Model:	**Fouriera, równanie opasujące:**		$f(x)=a_0+\sum_{i=1}^{7}[a_i\cdot\cos(i\cdot x\cdot w)+b_i\cdot\sin(i\cdot x\cdot w)]$		
Parametr	**Turbina T1**	**Turbina T2**	**Turbina T3**	**Turbina T4**	**Turbina T5**
a0	-88300,00	102,10	25680,00	218,90	47,43
a1	39600,00	108,30	2802,00	197,20	10,48
b1	154900,00	-69,16	-46610,00	-278,60	5,63

a2	103500,00	29,55	-34860,00	-103,40	6,84
b2	-56590,00	-115,30	-4255,00	-261,10	-1,19
a3	-47670,00	-50,39	-3991,00	-197,60	5,06
b3	-51160,00	-85,38	21150,00	-42,30	-3,01
a4	-17460,00	-70,31	10110,00	-87,57	2,04
b4	27220,00	-15,48	2658,00	89,28	-2,83
a5	10510,00	-34,91	1259,00	13,22	0,33
b5	3453,00	26,83	-3617,00	64,01	-1,70
a6	149,30	-1,58	-870,00	23,65	-1,13
b6	-2515,00	19,96	-390,40	9,41	-1,43
a7	-283,30	4,45	-62,13	5,43	-0,86
b7	60,48	4,44	106,20	-4,70	-1,25
w	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
R^2	0,99	0,99	0,88	0,97	0,96

Model:	**Gaussa, równanie opasujące:**		$f(x)=\sum_{i=1}^{7}\left[a_i\cdot\exp\left(-\left(\frac{x-b_i}{c_i}\right)^2\right)\right]$		
Parametr	**Turbina T1**	**Turbina T2**	**Turbina T3**	**Turbina T4**	**Turbina T5**
a1	34,98	124800000000000,00	121700000000000,00	122200000000000,00	42,25
b1	-1,81	-428,90	-406,10	-989,20	-30,50
c1	8,34	80,14	75,66	184,10	31,62
a2	29,26	8,48	16,16	9,76	6,67
b2	4,85	24,91	19,22	21,44	21,24
c2	21,14	9,29	6,37	2,32	2,35
a3	45,51	1,22	34,88	27,29	11,66

b3	39,71	45,57	34,25	22,12	60,89
c3	43,41	3,88	35,24	71,49	3,91
a4	22,11	37,86	12,30	8,02	4,79
b4	90,33	35,80	82,92	78,19	81,06
c4	28,94	137,40	22,68	5,91	3,91
a5	39,67	61,95	40,83	32,08	1,66
b5	174,20	611,20	146,20	164,40	40,38
c5	66,63	378,20	114,30	106,90	2,35
a6	9,16	-2,18	4,86	7,21	-1,52
b6	120,30	121,30	104,00	75,82	112,50
c6	19,94	18,79	5,69	41,15	5,57
a7	3,97	4,87	6,60	1,00	156,80
b7	139,40	136,10	127,50	123,00	-1063,00
c7	12,91	11,56	0,84	4,95	1024,00
R^2	0,99	0,99	0,90	0,99	0,99

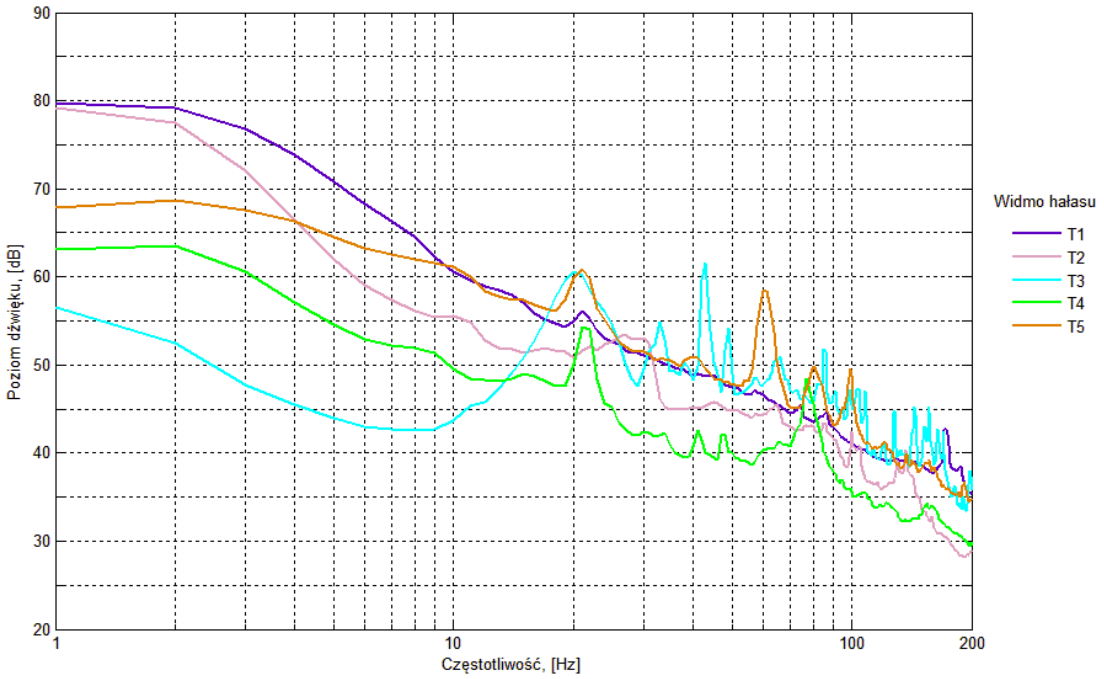
Model:	**Wielomianowy, równanie opasujące:**		$f(x) = p_1 \cdot x^7 + p_2 \cdot x^6 + p_3 \cdot x^5 + + p_4 \cdot x^4 + p_5 \cdot x^3 + p_6 \cdot x^2 + p_7 \cdot x + p_8$		
Parametr	**Turbina T1**	**Turbina T2**	**Turbina T3**	**Turbina T4**	**Turbina T5**
p1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
p2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
p3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
p4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
p5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
p6	0,10	0,10	-0,06	-0,02	0,01
p7	-2,73	-2,70	1,22	-0,68	-0,92

p8	82,18	76,20	42,85	60,36	69,32
R^2 2	0,99	0,96	0,78	0,93	0,94

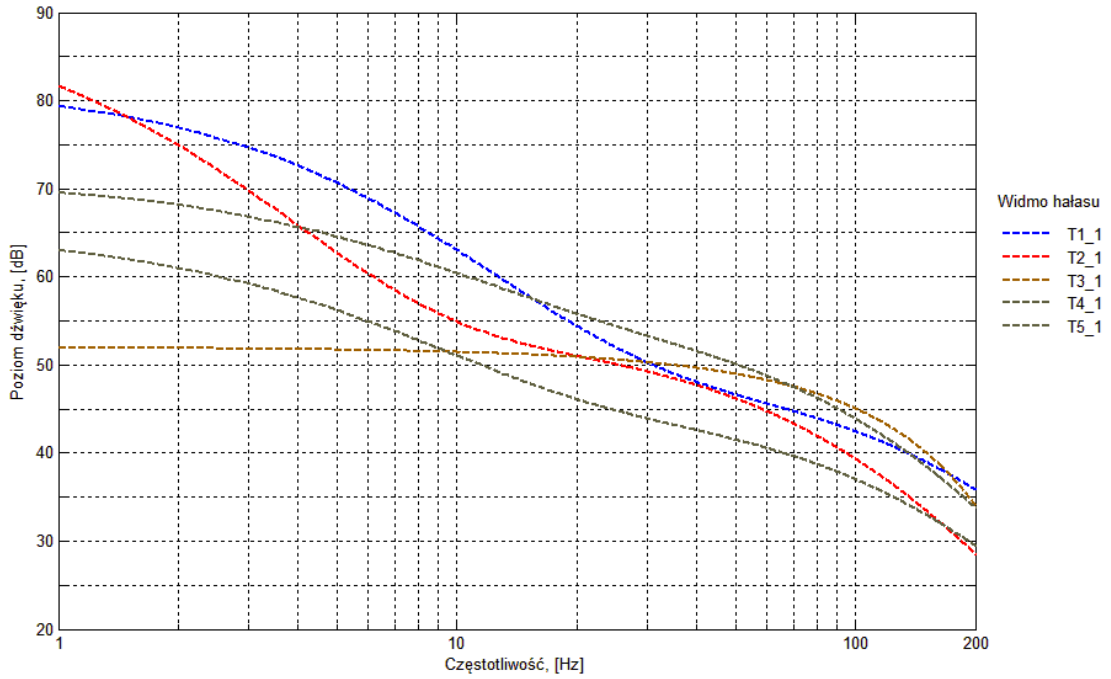
Model:	**Power, równanie opasujące:**		$f(x) = a \cdot x^b + c$		
Parametr	**Turbina T1**	**Turbina T2**	**Turbina T3**	**Turbina T4**	**Turbina T5**
a	129,50	-24,61	-0,01	-26,19	-5,62
b	-0,09	0,19	1,44	0,15	0,37
c	-44,12	96,56	51,47	88,44	73,67
R^2	0,98	0,94	0,72	0,89	0,93

Model:	**Suma Sinusów, równanie opasujące:**		$f(x) = \sum_{i=1}^{8} [a_i \cdot \sin(b_i \cdot x + c_i)]$		
Parametr	**Turbina T1**	**Turbina T2**	**Turbina T3**	**Turbina T4**	**Turbina T5**
a1	161,20	491,60	65,05	92,48	74,57
b1	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
c1	0,87	1,94	0,43	1,20	0,53
a2	358,00	400,60	24,86	69,03	32,66
b2	0,03	0,01	0,03	0,03	0,03
c2	2,80	4,93	2,03	3,17	2,32
a3	318,10	3,31	3,17	25,84	6,91
b3	0,03	0,04	0,05	0,04	0,06
c3	5,44	4,25	3,36	5,14	2,67
a4	69,97	1,23	1,54	1,51	2,31
b4	0,04	0,09	0,12	0,10	0,08
c4	7,96	1,49	-3,98	0,43	3,03

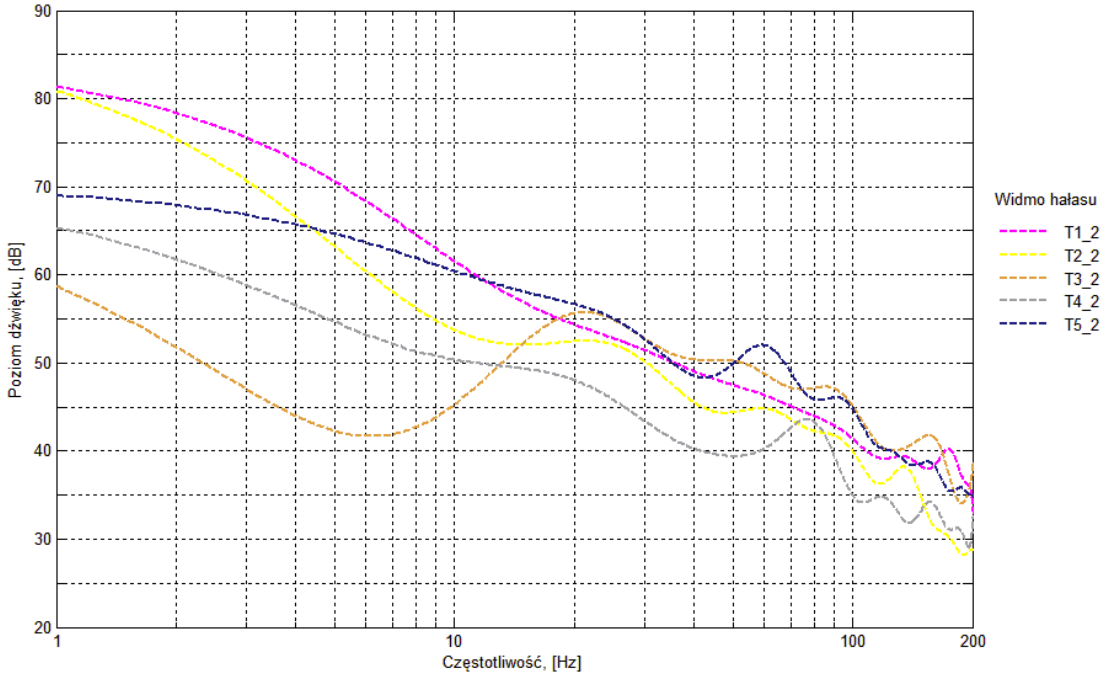
a5	0,39	0,39	14,09	1,48	1,05
b5	0,15	0,16	0,15	0,15	0,14
c5	2,34	2,49	2,64	2,36	0,01
a6	1,92	209,50	-13,20	48,06	1,75
b6	0,24	0,24	0,15	0,23	0,32
c6	3,67	3,22	15,06	4,31	1,06
a7	0,17	0,67	0,97	0,64	1,06
b7	0,32	0,32	0,30	0,31	0,19
c7	1,01	0,78	1,44	1,79	2,43
a8	1,77	209,70	-0,26	48,05	0,59
b8	0,23	0,24	0,18	0,23	0,23
c8	0,78	0,09	2,24	1,22	0,66
R^2	0,96	0,96	0,80	0,98	0,98



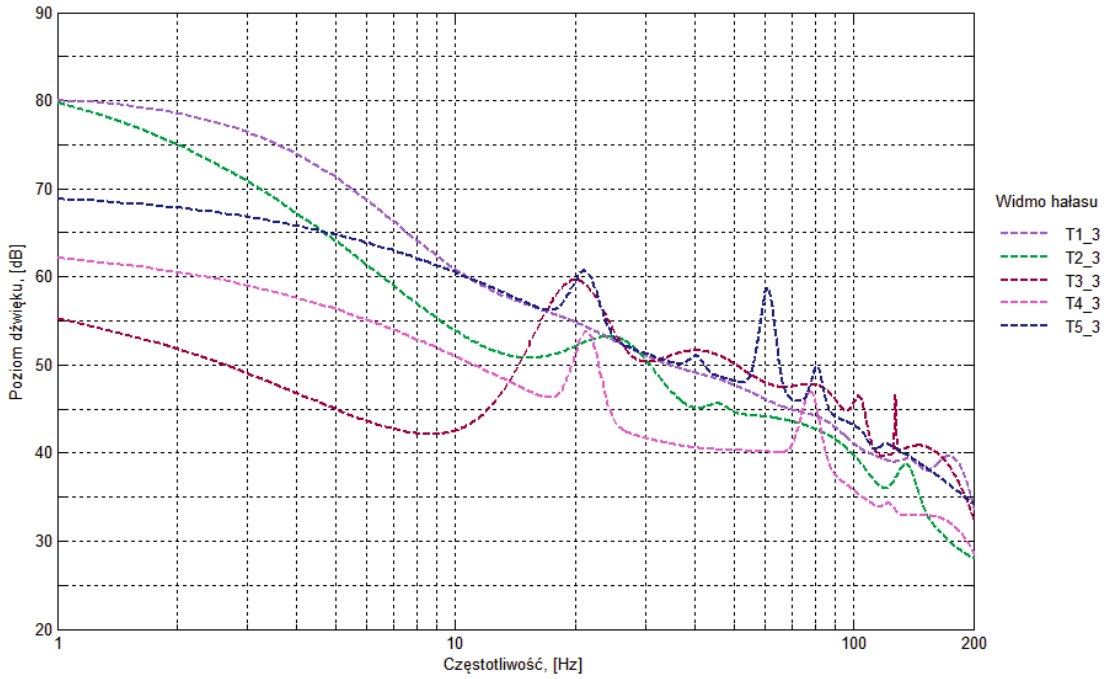
Rys. 6.24 Zestawienie porównawcze przebiegów widm hałasu infradźwiękowego wyznaczone bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Dane wejściowe do modeli.



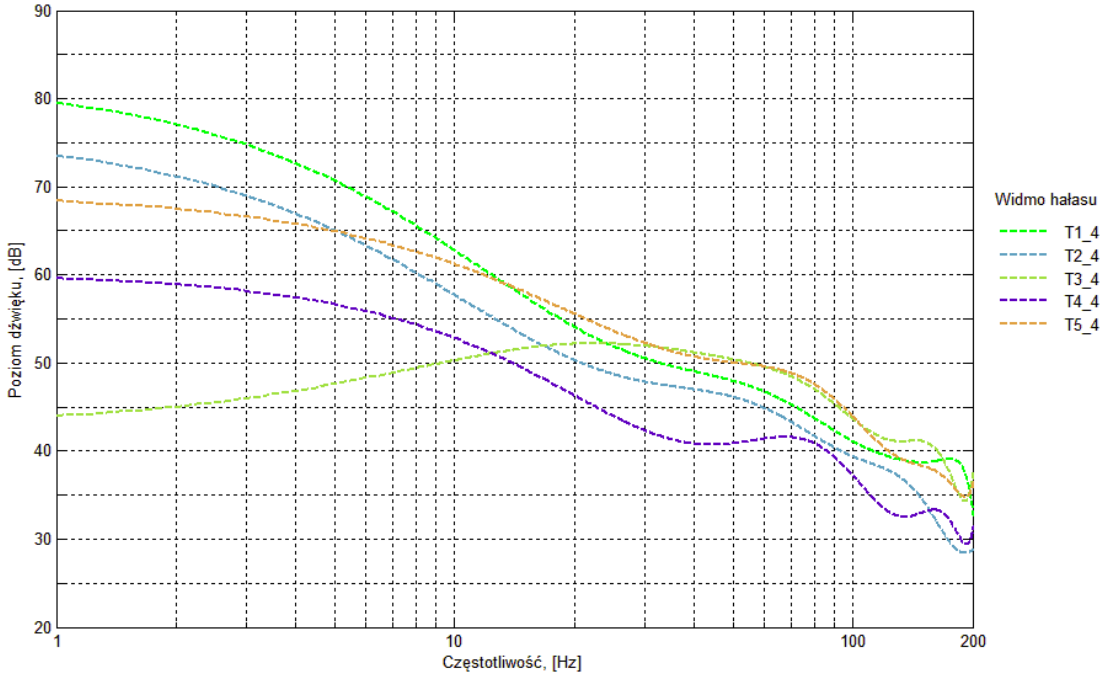
Rys 6.25 Krzywe modelowe opisujące widmo hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Model wykładniczy.



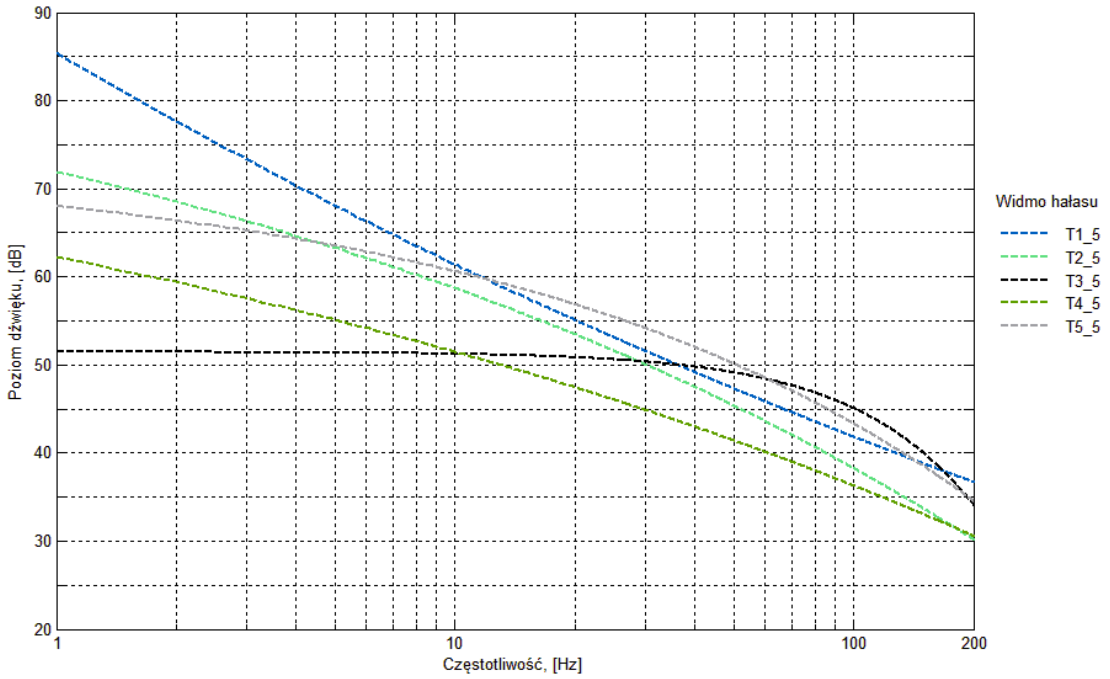
Rys. 6.26 Krzywe modelowe opisujące widmo hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Model Fourier.



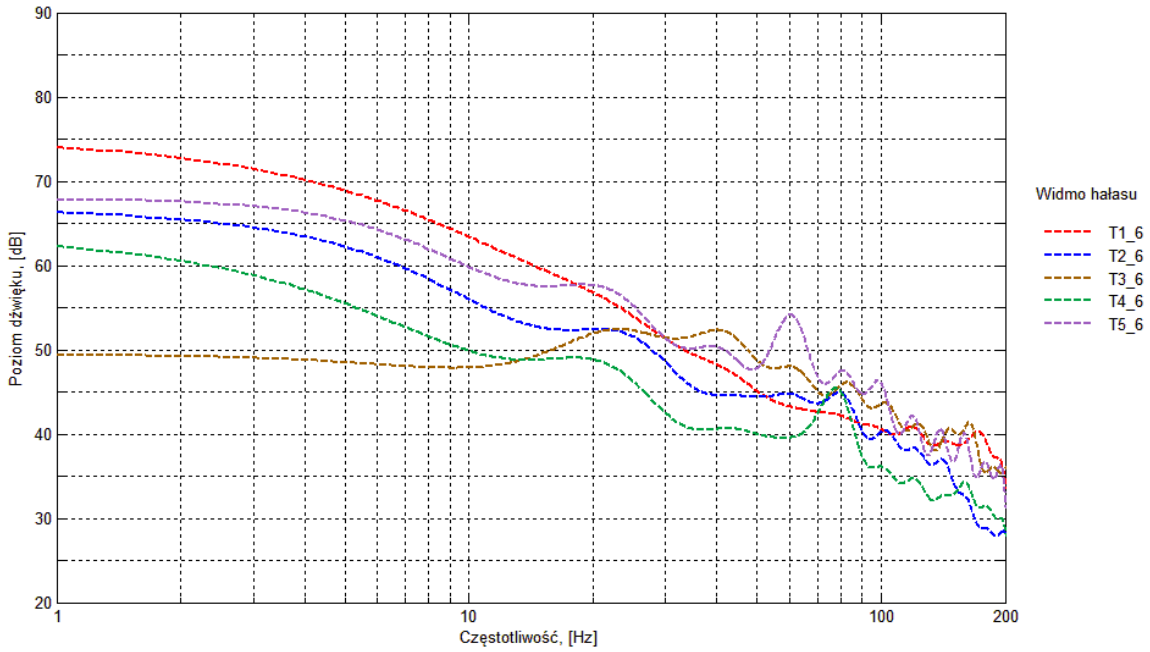
Rys. 6.27 Krzywe modelowe opisujące widmo hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Model Gaussa.



Rys. 6.28 Krzywe modelowe opisujące widmo hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Model wielomianowy.

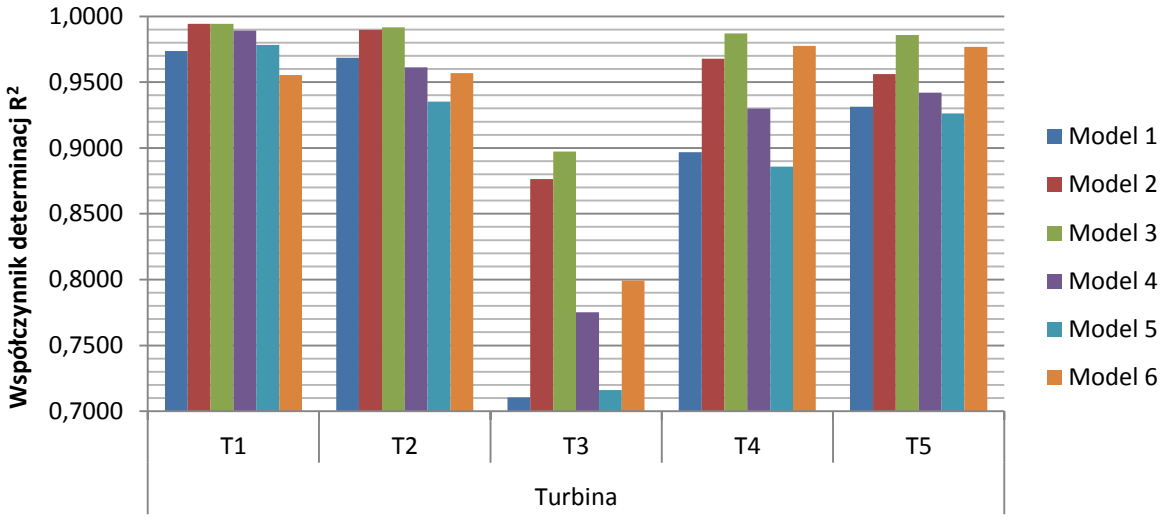


Rys. 6.29 Krzywe modelowe opisujące widmo hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Model Power.



Rys. 6.30 Krzywe modelowe opisujące widmo hałasu infradźwiękowego bez ważenia krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych T1, T2 , T3, T4 i T5 – Model suma sinusów.

Na podstawie pierwszego porównania uzyskanych zależności aproksymacyjnych odrzucono aproksymację przy zastosowaniu modelu wykładniczego wielomianowego i power. W celu porównania i wyboru najlepszego modelu aproksymującego zestawiono ze sobą wartości obliczonych współczynników determinacji dla poszczególnych krzywych modelowych, które przedstawiono na Rys. 31.



Rys. 6.31 Zestawianie porównawcze obliczonych wartości współczynników regresji R^2 dla badanych krzywych modelowych.

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że do aproksymacji zmierzonych widm sygnałów infradźwiękowych najlepiej nadaje się model Gaussa, dla którego współczynnik determinacji R^2 osiąga największe wartości, rzędu (0,89-0,99), dla każdej z badanych turbin.

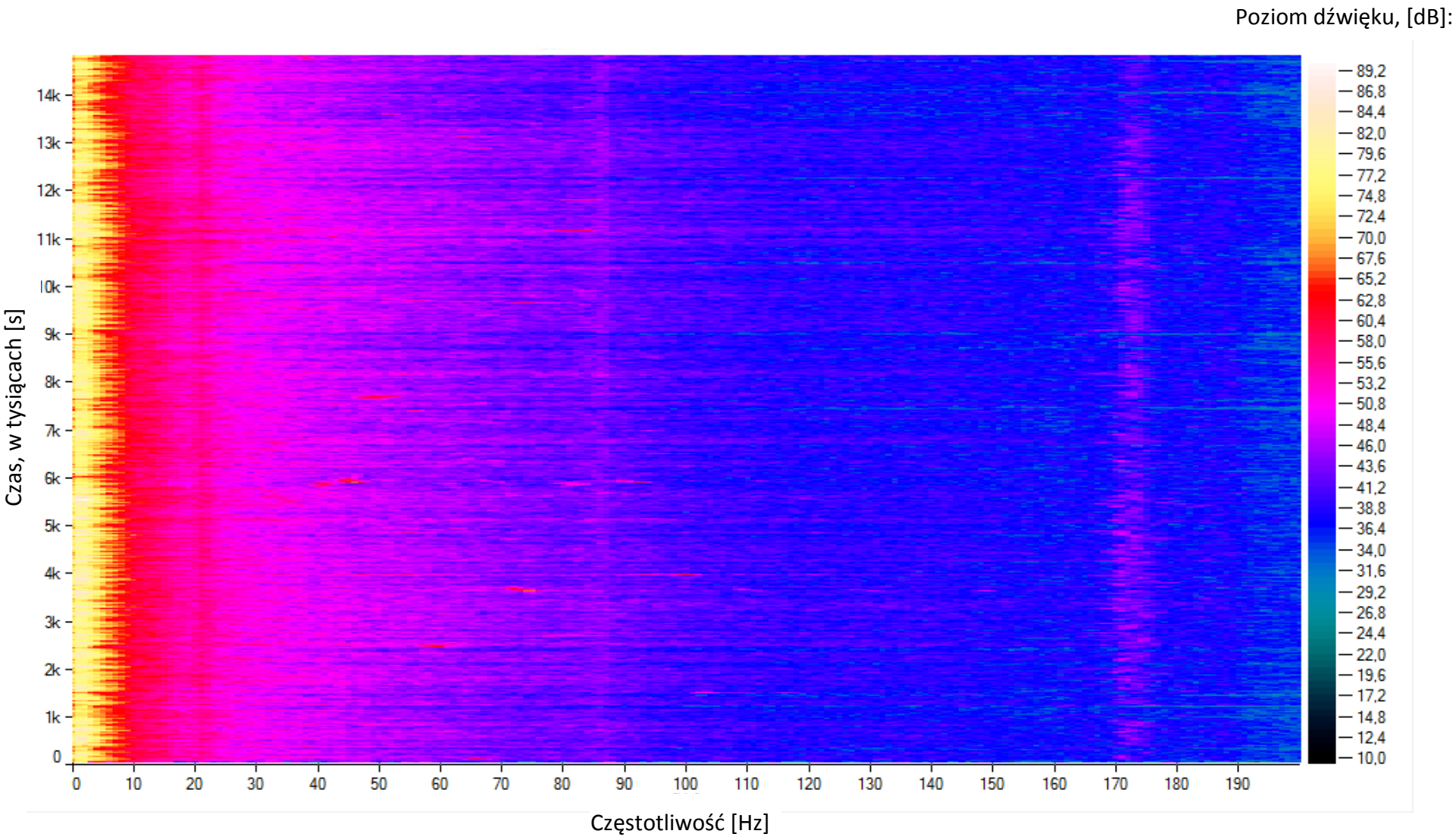
Na podstawie zależności otrzymanych na Rys. 6.27 istnieje możliwość przeprowadzenia bardziej szczegółowych analiz. Na prezentowanych charakterystykach jeszcze wyraźniej można wskazać dwa charakterystyczne zakresy częstotliwości. W pierwszym, poniżej częstotliwości 20 Hz, najgłośniejsza jest turbina T1, 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.

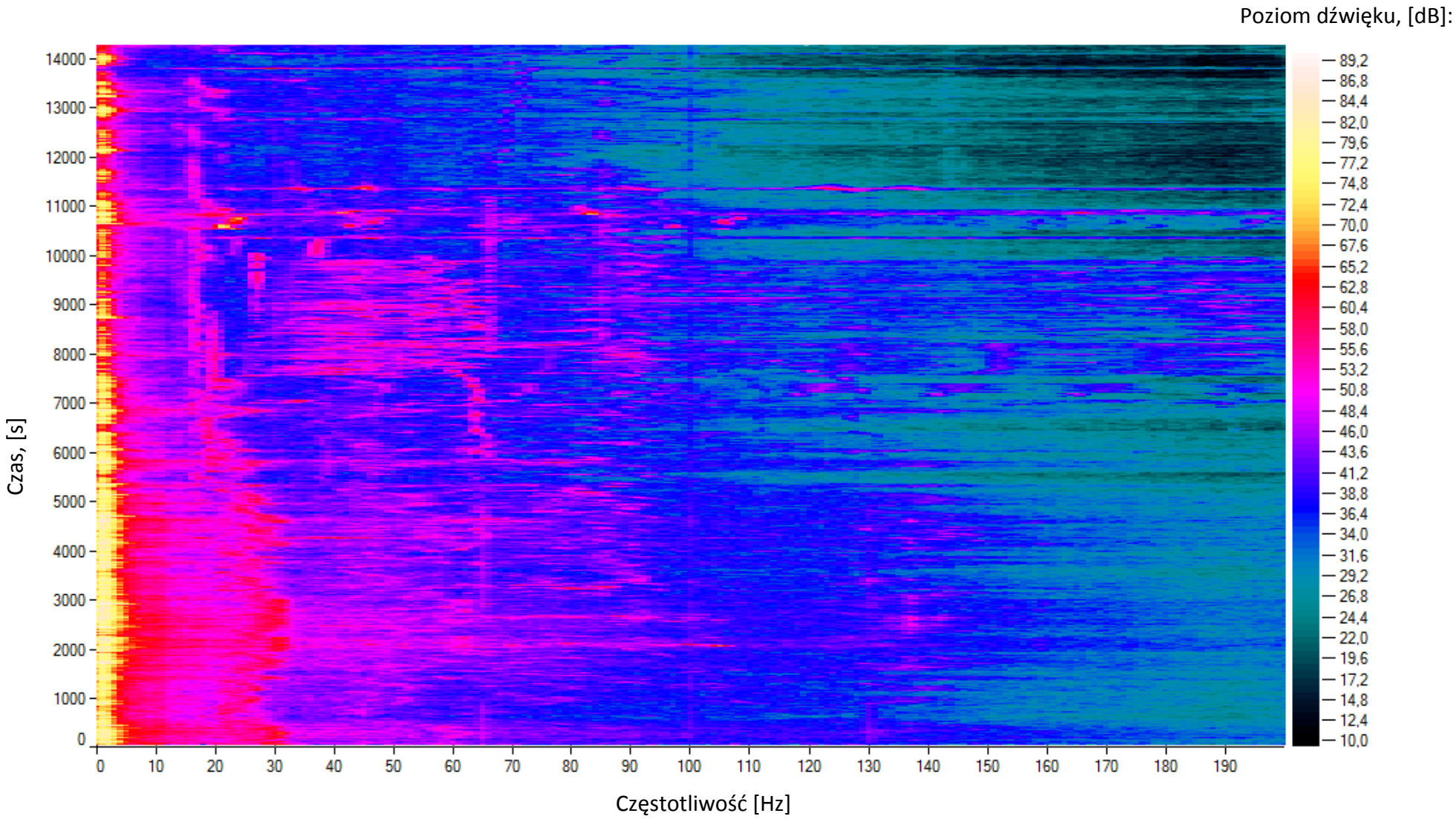
6.2.5 Rozkłady czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych.

Prezentowane we wcześniejszych rozdziałach wyniki przedstawiają poziomy dźwięku obliczone w oparciu o zarejestrowane przebiegi czasowo-częstotliwościowe i reprezentują wyniki uzyskane w czasie całego pomiaru. Bdania 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.

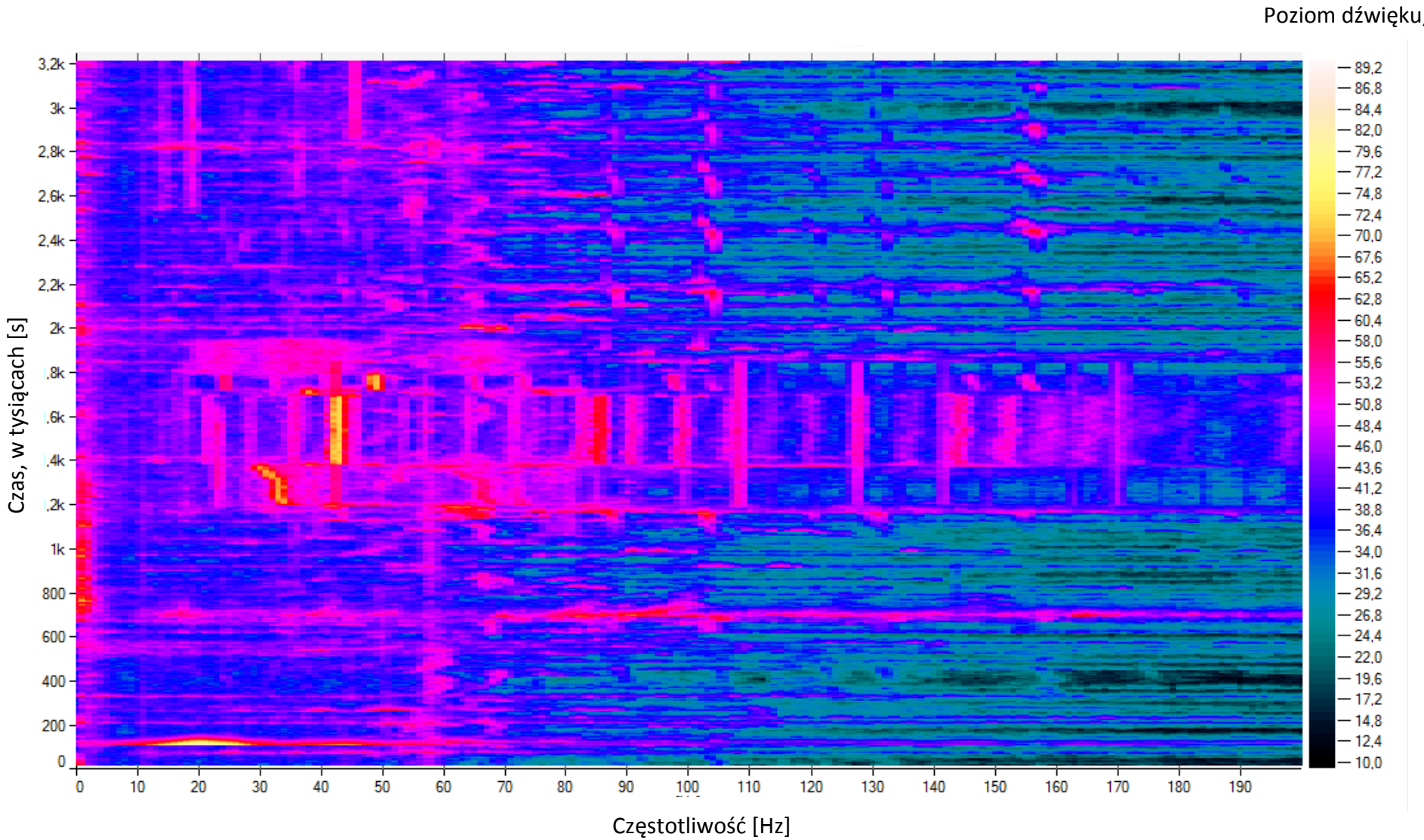
Wyniki pomiarów uzyskane dla badanych turbin przedstawiono kolejno na Rys. 6.32-6.35. Uzyskane spektrogramy przedstawiają obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych zmian poziomu ciśnienia akustycznego, łącznie ze zdarzeniami, które były źródłem zakłóceń. Na prezentowanych rozkładach można szczegółowo 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 stanowią dane wejściowe, stanowiące podstawę do dalszych analiz.



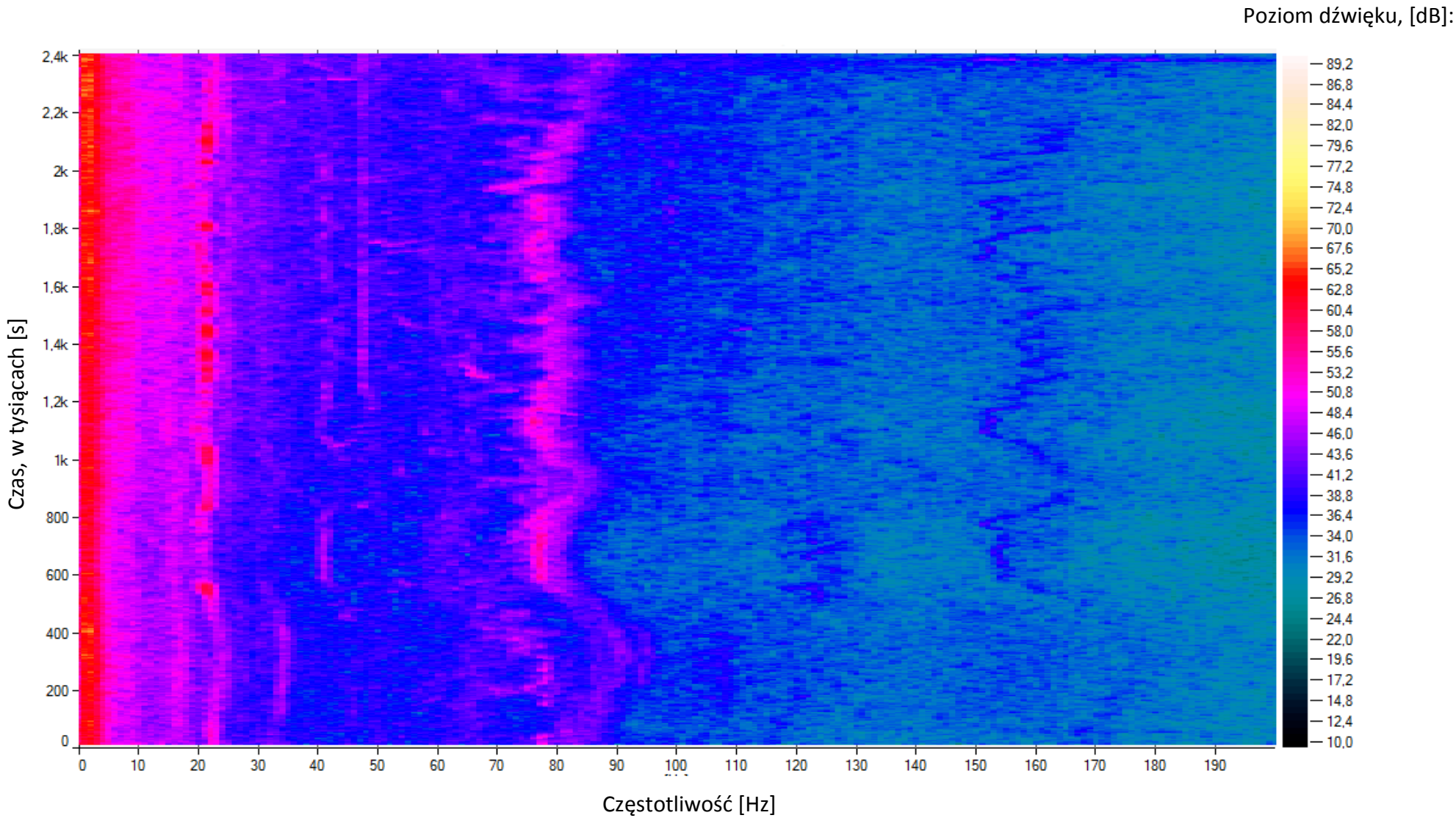
Rys. 6.32 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych turbiny T1



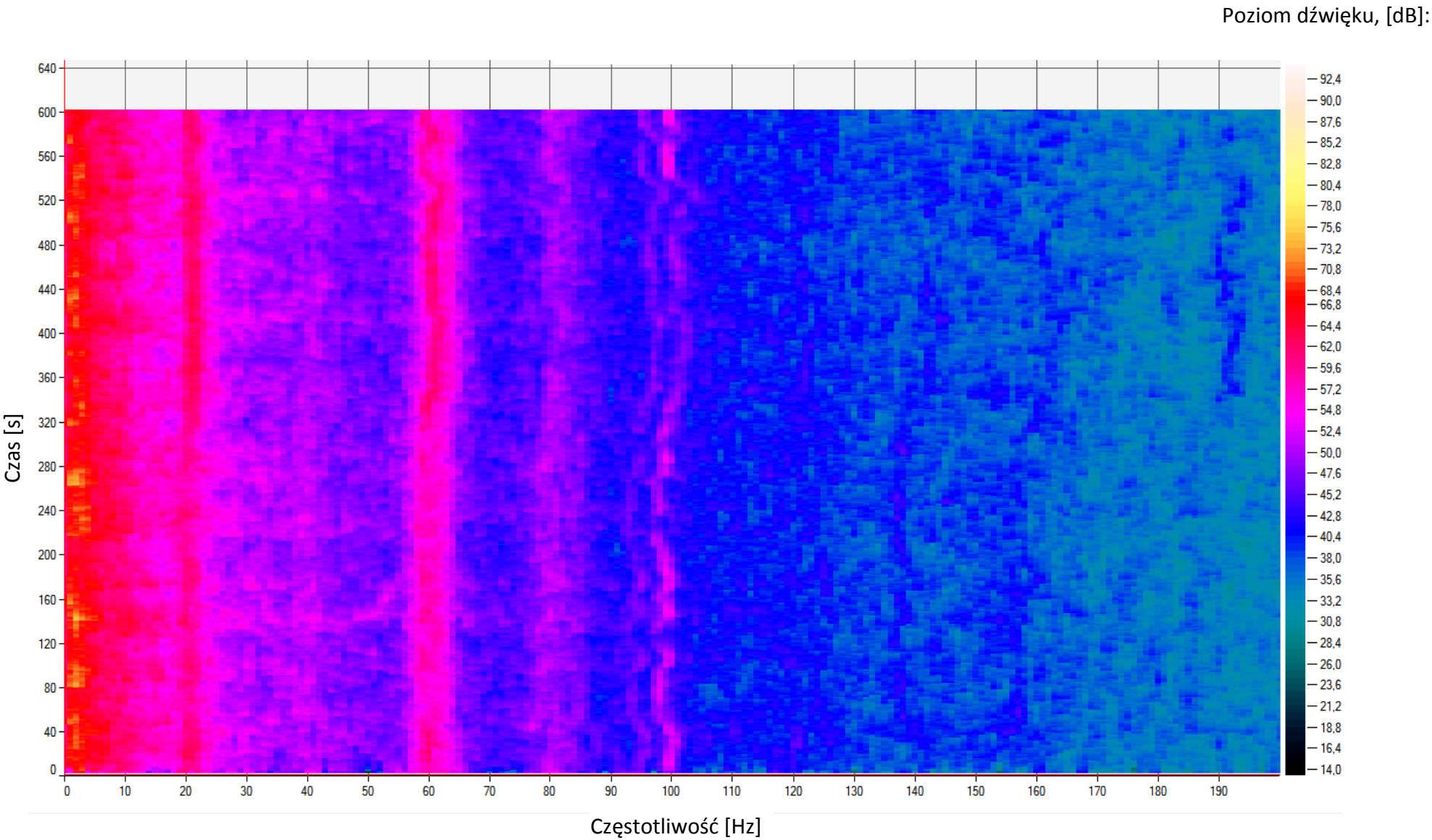
Rys. 6.33 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych turbiny T2



Rys. 6.34 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych turbiny T3



Rys. 6.35 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych turbiny T4



Rys. 6.36 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych sygnałów infradźwiękowych turbiny T5

6.3 Wyniki pomiarów tła akustycznego w zakresie niskich częstotliwości

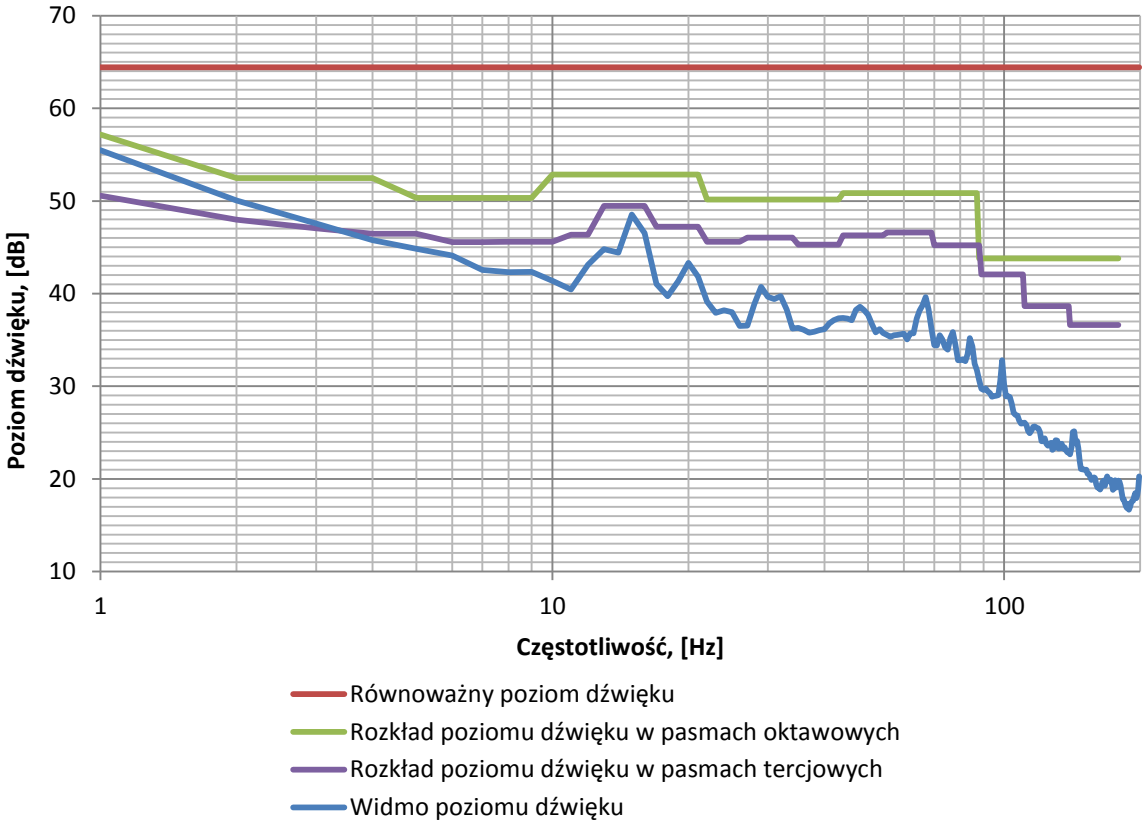
Aby w sposób właściwy zinterpretować uzyskane wartości poziomu dźwięku w zakresie niskich częstotliwości zarejestrowane przy badanych turbinach wiatrowych należało je odnieść i porównać do do zmierzonego poziomu tła akustycznego, które występuje naturalnie w środowisku. W celu określenia stanu klimatu akustycznego występującego w lokalizacjach dogodnych dla pracy turbin wiatrowych wykonano pomiary przy zatrzymanej turbinie T2, oraz w rejonie Suwałk, w miejscu planowanych nowych inwestycji farm wiatrowych.

Pierwszy pomiar, przy turbinie T2, wykony został przy prędkości wiatru poniżej 3 m/s. Reprezentuje on tło akustyczne występujące podczas słabych podmuchów wiatru. Drugi pomiar wykonano na terenach rolnych położonych na północ od Suwałk, przy prędkości wiatru powyżej 7 m/s. Reprezentuje on tło akustyczne występujące podczas wiatru typowego dla pracy turbin wiatrowych.

Uzyskane wyniki pomiarowe zostały przedstawione w sposób analogiczny jak w przypadku sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbiny wiatrowe. W ramach przeprowadzonych analiz obliczono kolejno: ogólny równoważny poziom dźwięku, poziom dźwięku w pasmach oktawowych i tercjowych oraz widmo hałasu wyznaczone przy użyciu transformaty Fouriera. Analogicznie, określono także uciążliwość akustyczną badanych sygnałów poprzez zastosowanie krzywych ważenia: A, C i G.

6.3.1.1 Pomiar tła akustycznego przy turbinie T2

Na Rys.6.37 przedstawiono wyniki zarejestrowanych poziomów ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, reprezentującym tło akustyczne w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości.

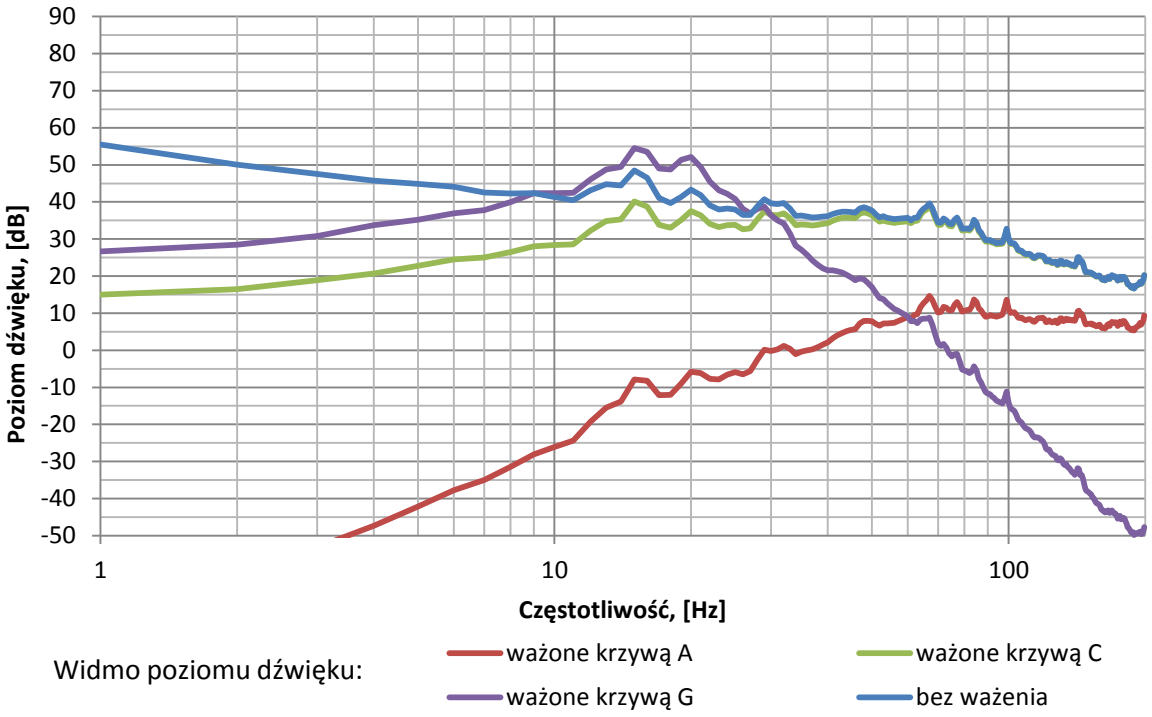


Rys. 6.37 Przebiegi widm poziomu tła akustycznego przy turbinie T2

Przedstawione na Rys. 6.37 charakterystyki opisują stan klimatu akustycznego występującego w badanym punkcie pomiarowym przy wietrze o prędkości mniejszej 3 m/s. Ogólny poziom hałasu, bez ważenia krzywą korekcyjną, w zakresie od 1 do 200 Hz wynosił w dniu pomiaru 64,4 dB. Analizując rozkład widma w badanym paśmie częstotliwości, podobnie jak podczas pracy turbiny wiatrowej, maksymalne poziomy hałasu występują w zakresie pojedynczych herców i wynoszą ok. (50-55) dB. Do częstotliwości 10 Hz mierzone poziomy zmniejszają wartości do ok. 41 dB. Następnie w paśmie od 10 do 20 Hz następuje wzrost poziomu do 48 dB. Od częstotliwości 20 Hz, aż do częstotliwości 80 Hz poziom dźwięku stabilizuje się i utrzymuje w przedziale od 37 do 40 dB. Powyżej częstotliwości 80 Hz poziom dźwięku zaczyna znacząco maleć i nie odgrywa już istotnej roli w oddziaływaniu. W wyznaczonym widmie hałasu występuje duża liczba składowych w paśmie od 10 do 80 Hz, które stanowią dominującą rolę i determinują ogólny kształt klimatu akustycznego.

W celu odniesienia zmierzonych wartości do sposobu percepcji hałasu przez człowieka, dla widma otrzymanego przy zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera,

zastosowano kolejno krzywe ważenia: A, C i G. Otrzymane w tym zakresie wyniki przedstawiono na Rys. 6.38.



Rys. 6.38 Przebiegi widm poziomu tła akustycznego przy turbinie T2 po zastosowaniu krzywych ważenia.

Zastosowanie krzywych ważenia, analogicznie jak dla sygnałów generowanych pracą turbin znacząco zmienia obraz oddziaływania akustycznego. Równoważny poziom hałasu, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

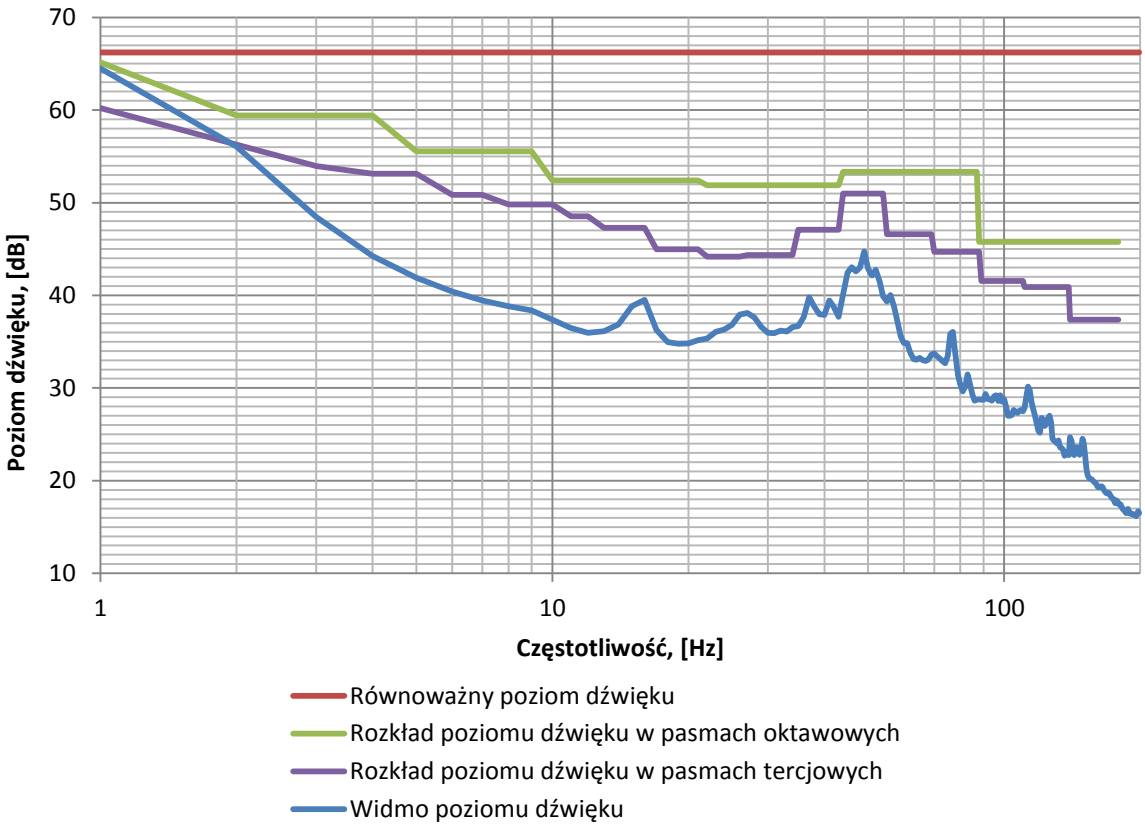
- poziom dźwięku bez ważenia (FFT) – 64,4 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą A – 31,0 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą C – 54,6 dB
- poziom dźwięku ważony krzywą G – 61,7 dB.

Duża różnica między poziomem dźwięku ważonym krzywą A i krzywą C wskazuje na występowanie w badanym widmie składowych niskoczęstotliwościowych. Natomiast mała różnica między ogólnym poziomem dźwięku, bez ważenia, a poziomem dźwięku ważonym

krzywą G wskazuje odpowiednio na występowanie w badanym sygnale dużej liczby składowych infradźwiękowych w zakresie od 10 do 20 Hz.

6.3.1.2 Pomiar tła akustycznego w rejonie Suwałk

Na Rys. 6.39 przedstawiono wyniki zarejestrowanych poziomów ciśnienia akustycznego w paśmie od 1 do 200 Hz, reprezentującym tło akustyczne w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości.

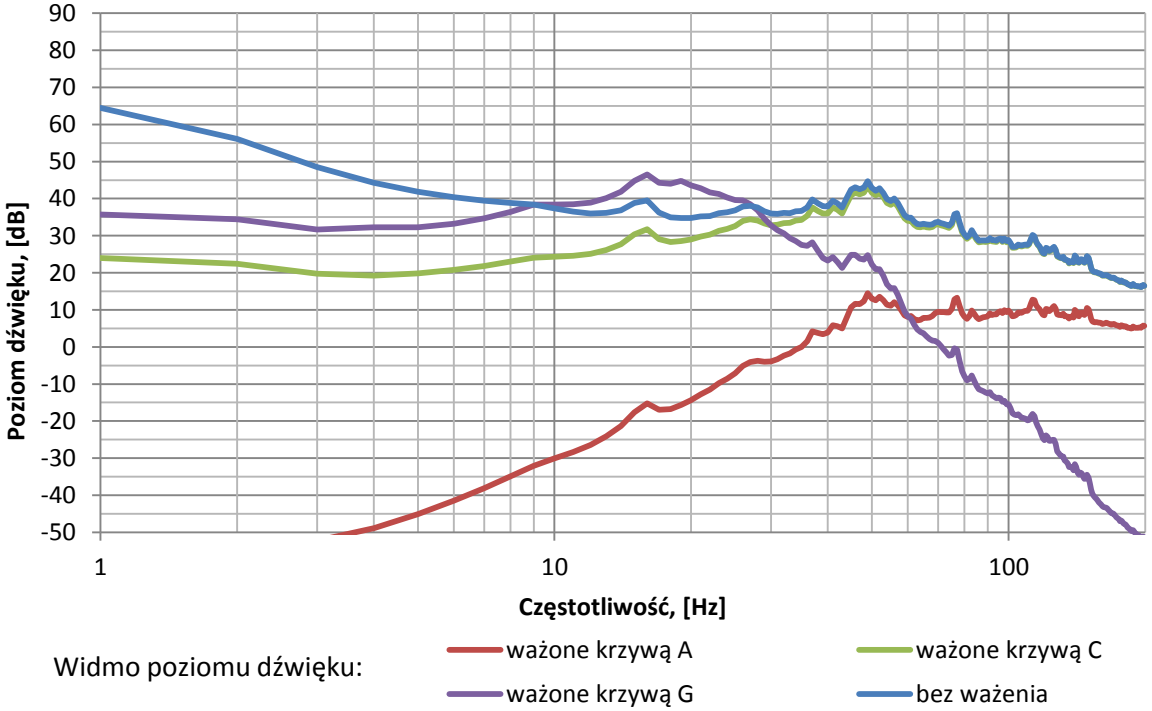


Rys 6.39 Przebiegi widma poziomu tła akustycznego w rejonie Suwałk

Przedstawione na Rys. 6.39 poziomy opisują stan klimatu akustycznego występującego przy wietrze o prędkości powyżej 7 m/s. Ogólny poziom hałasu, bez ważenia krzywą korekcyjną, w zakresie od 1 do 200 Hz, wynosił w dniu pomiaru 66,2 dB. Analizując rozkład widma w badanym paśmie częstotliwości, maksymalne poziomy hałasu również występują w zakresie pojedynczych herców i wynoszą ok. (64-68) dB. Do częstotliwości 10 Hz mierzone poziomy dźwięku stopniowo maleją osiągając przy 10 Hz wartość ok. 38 dB. W

zakresie częstotliwości od 10 Hz, aż do częstotliwości 40 Hz poziom dźwięku stabilizuje się i utrzymuje wartość w przedziale od 34 do 40 dB Następnie w paśmie od 40 do 60 Hz następuje wzrost wartości do poziomu 45 dB. Powyżej częstotliwości 60 Hz poziom dźwięku zmniejsza znacząco swoją wartość. W wyznaczonym widmie, podobnie jak w przypadku tła akustycznego przy turbinie T2, można wyróżnić wiele składowych w paśmie od 10 do 60 Hz. Składowe te obok składowych występujących dla częstotliwości poniżej 10 Hz stanowią dominującą rolę i determinują ogólny kształt klimatu akustycznego.

W celu odniesienia zmierzonych wartości do sposobu percepcji hałasu przez człowiek zastosowano następujące krzywe ważenia: A, C i G. Otrzymane wyniki przedstawiono na Rys. 6.40.



Rys. 6.40 Przebiegi widm poziomu tła akustycznego przy turbinie T2 po zastosowaniu krzywych ważenia.

Równoważny poziom hałasu, będący sumą poziomu hałasu dla poszczególnych krzywych w paśmie od 1 do 200 Hz, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych powyżej wyników, osiąga następujące wartości:

- poziom dźwięku bez ważenia (FFT) – 66,2 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą A – 31,0 dB,

- poziom dźwięku ważony krzywą C – 55,1 dB,
- poziom dźwięku ważony krzywą G – 55,5 dB.

Duża różnica pomiędzy poziomem dźwięku ważonym krzywą A i krzywą C wskazuje na występowanie w badanym widmie składowych niskoczęstotliwościowych. Natomiast znaczące różnice między ogólnym poziomem dźwięku, bez ważenia i ważonym krzywą G, wskazują na brak występowania w badanym sygnale znaczących składowych infradźwiękowych w zakresie od 10 Hz do 20 Hz.

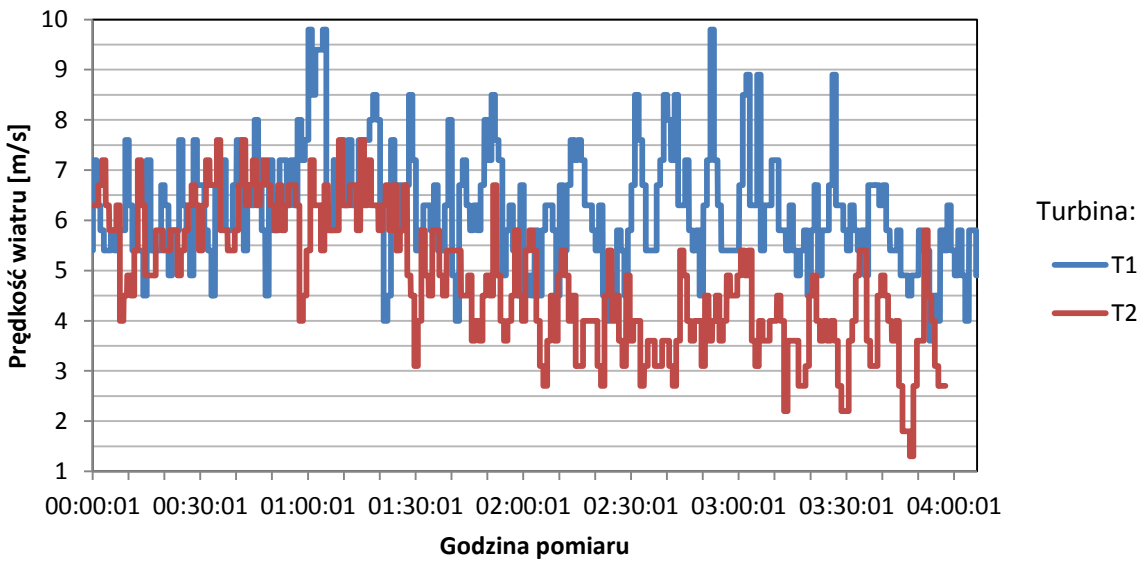
6.4 Określenie wpływu prędkości wiatru na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków

Głównym parametrem determinującym poziom mocy akustycznej turbiny wiatrowej jest prędkość wiatru wprawiającego w ruch jej rotor. Od prędkości tej zależy liczba obrotów wirnika i tym samym wielkości produkowanej przez generator energii elektrycznej. Dodatkowo w zależności od siły wiatru automatyka sterująca turbiną ustawia odpowiedni kąt natarcia łopat oraz optymalny kąt obrotu gondoli. Wszystkie te parametry pracy turbiny wiatrowej wpływają na poziom hałasu oraz jego widmo, zarówno w paśmie infradźwiękowym, jak również słyszalnym.

Największa zmienność prędkości wiatru zarejestrowano podczas pomiarów wykonywanych przy turbinie T1 w lokalizacji 1 oraz odpowiednio przy T2 w lokalizacji 2, a zakres zarejestrowanych zmian przedstawiono w tabeli 6.13 oraz na Rys. 6.41.

Tabela 6.13 Zakres zmian prędkości wiatru podczas pomiarów hałasu infradźwiękowego przy turbinie T1 i T2.

Prędkość wiatru	Turbina T1	Turbina T2
Wartość maksymalna [m/s]	9,8	7,6
Wartość minimalna [m/s]	3,6	1,3
Wartość średnia [m/s]	6,2	4,8

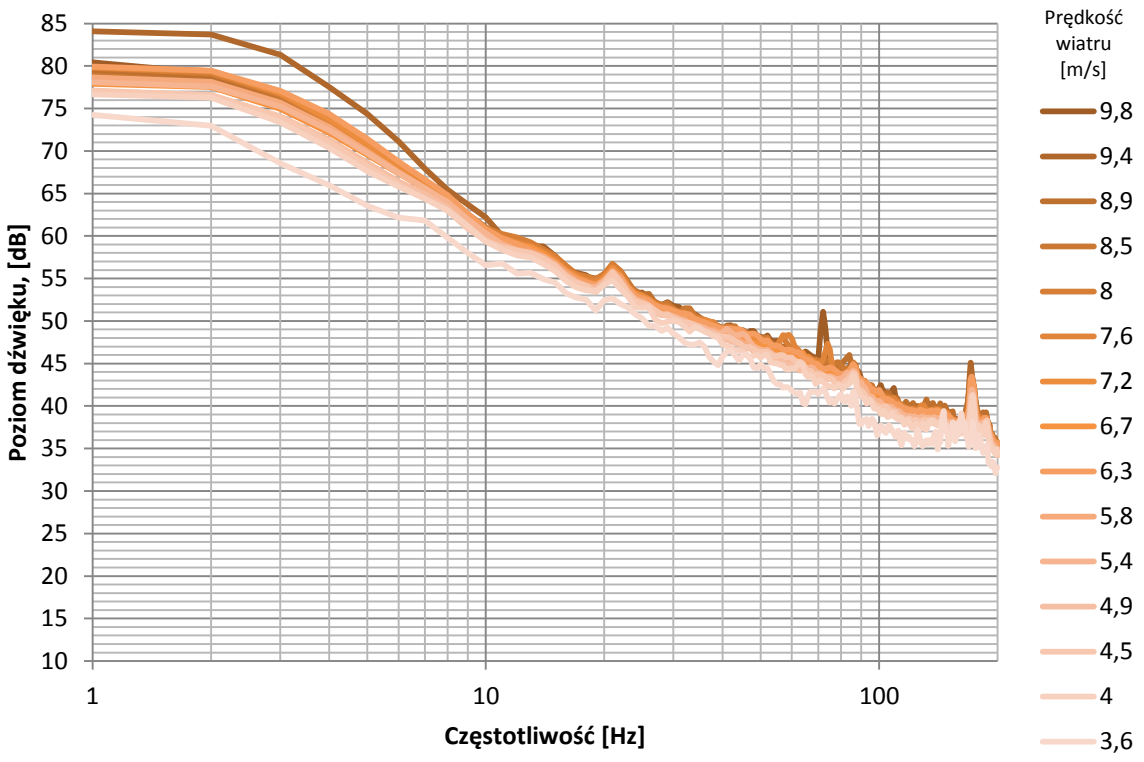


Rys. 6.41 Zmiany prędkości wiatru podczas pomiarów hałasu infradźwiękowego przy turbinie T1 i T2.

Zakres zmian prędkości wiatru podczas pomiaru umożliwił rejestrację zmian poziomu dźwięku w paśmie infradźwiękowym praktycznie w całym przedziale wydajności energetycznej. Przy prędkościach wiatru rzędu 3 m/s następuje rozruch turbin wiatrowych. Natomiast przy prędkościach wiatru na poziomie (8 – 12) m/s, w zależności od zastosowanych rozwiązań konstrukcyjnych, osiągają one 100 % wydajności, która utrzymuje się do prędkości około (23-25) m/s, przy której następuje automatyczne wyłączenie turbiny.

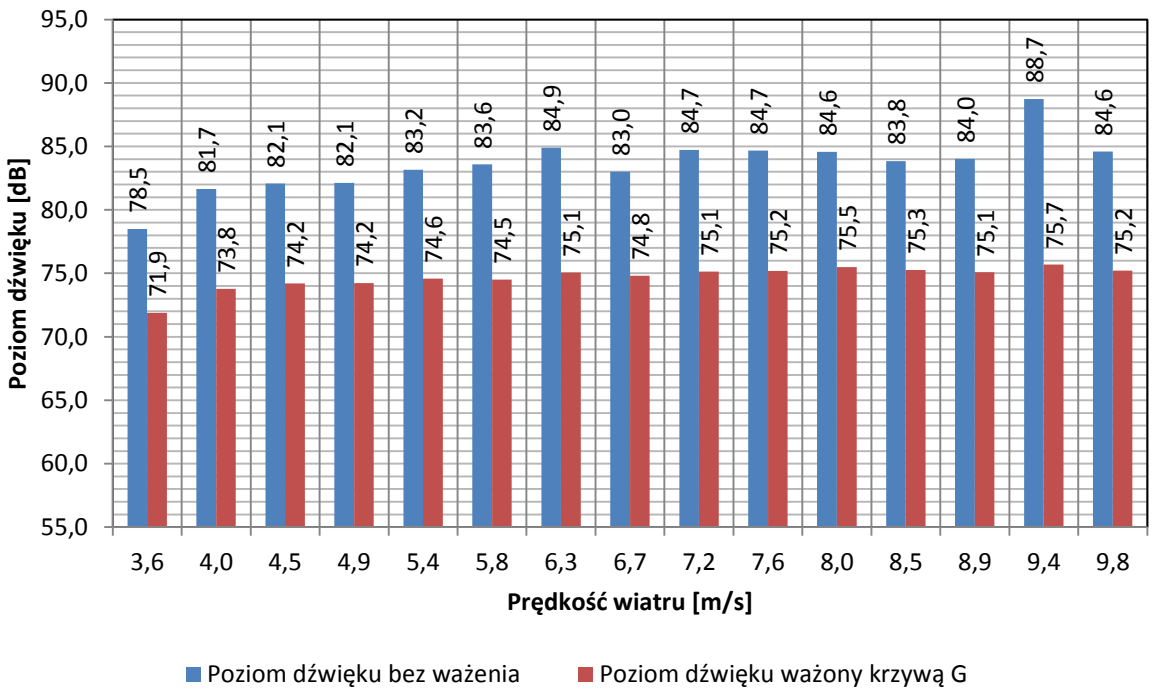
Na przykładzie turbin T1 i T2 przeanalizowano wpływ prędkości wiatru na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków. Zakres wykonanych pomiarów i analiz objął wyznaczenie przebiegów obrazujących zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości (widma amplitudowe) i w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej (spektrogramy), bez zastosowania krzywych ważenia.

Widma amplitudowe wyznaczone dla badanych turbin przedstawiono odpowiednio na Rys. 6.42 (Turbina T1) i na Rys. 6.44 (Turbina T2). Otrzymano je poprzez obliczenie średniej arytmetycznej z wszystkich wartości ciśnienia akustycznego zarejestrowanych dla danej prędkości wiatru, następnie obliczenia z nich poziomu ciśnienia akustycznego wyrażonego w decybelach (względem progu słyszenia - $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa).



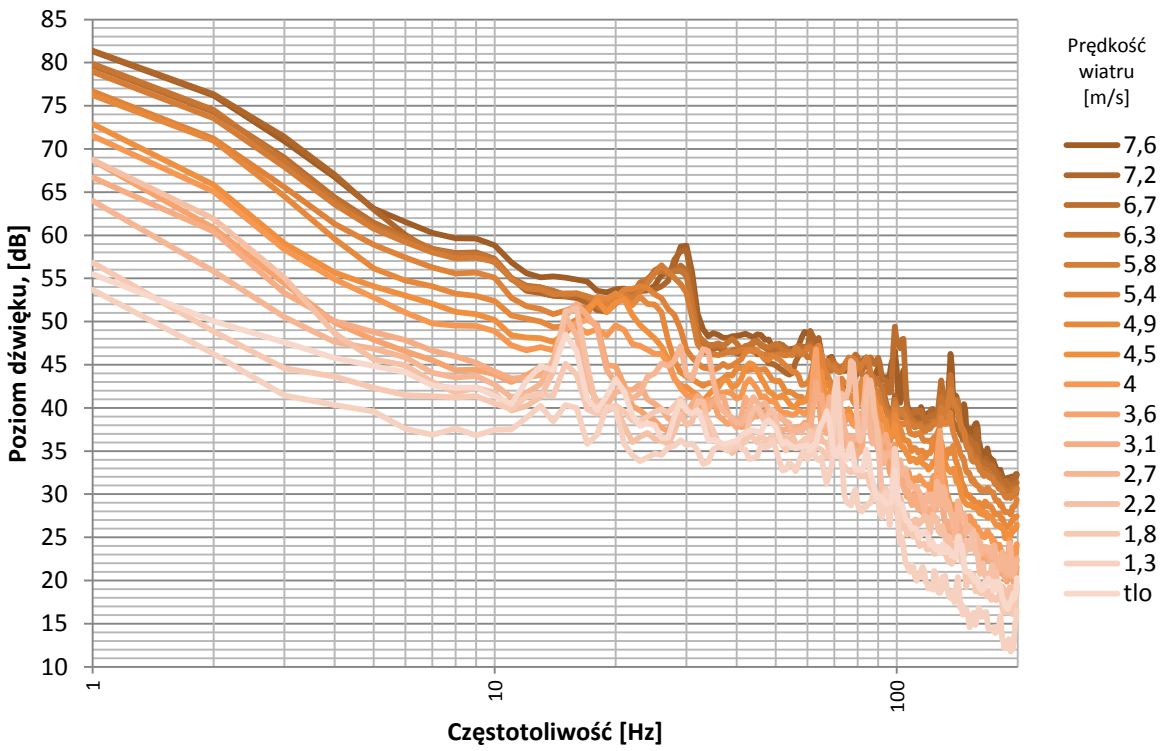
Rys. 6.42 Wykres poziomu dźwięku w funkcji częstotliwość dla różnych prędkości wiatru – Turbina T1

W przypadku turbiny T1, widmo hałasu w paśmie infradźwiękowym, nie zmienia kształtu przebiegu i praktycznie nie zależy od prędkości wiatru. Po włączeniu turbiny, przy prędkości wiatru powyżej 3 m/s, jego wartość się ustala, osiągając nieco mniejsze wartości jedynie dla najniższej zarejestrowanej prędkości wiatru. Największe wartości, rzędu 80 dB, można zaobserwować dla najniższych częstotliwości, w zakresie kilku herców. Wraz ze wzrostem częstotliwości poziom hałasu początkowo szybko maleje do wartości około 50 dB dla częstotliwości 30 Hz. Natomiast powyżej tej częstotliwości dynamika zmian znacząco maleje, a poziom hałasu dalej maleje osiągając wartość około 35 dB, odpowiednio przy częstotliwości 200 Hz. Potwierdzeniem tego jest zakres zmian równoważnego poziomu hałasu, będącego sumą poziomu hałasu dla poszczególnych widm, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych wyników, które zestawiono na wykresie zilustrowanym na Rys. 6.43.



Rys. 6.43 Zestawienie porównawcze zmian poziomu dźwięku w funkcji prędkości wiatru – turbina T1

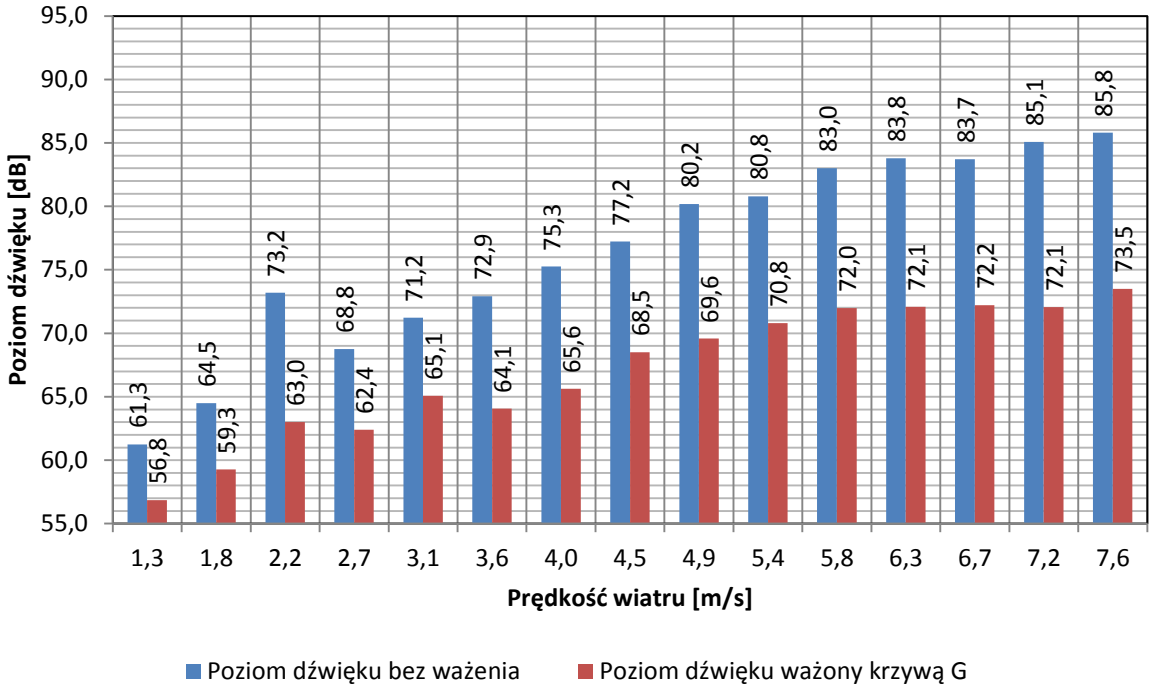
Oprócz powyższych zależności w zarejestrowanym widmach, tak samo jak przy analizie zmian ogólnego poziomu hałasu, wyróżnić można dwie częstotliwości tonalne, dla których występuje wzrost poziomu ciśnienia akustycznego [patrz rozd.: 6.2.1.1].



Rys. 6.44 Przebiegi widm amplitudowych poziomu dźwięku w funkcji częstotliwość dla różnych prędkości wiatru – turbina T2

W przypadku turbiny T2 wpływ prędkości wiatru na przebieg widma emisji hałasu w paśmie infradźwiękowym i niskoczęstotliwościowym jest znaczący, dynamika zmian dochodzi do 15 dB. Najwyższe poziomy hałasu odpowiadają największym prędkością wiatru. Wraz ze zmniejszaniem się prędkości wiatru poziom dźwięku generowanego przez badaną turbinę ulegał zmniejszeniu. Przy czym największe wartości występują w paśmie infradźwiękowym od 1 do 30 Hz. Przy małych prędkościach wiatru, rzędu (1 – 3) m/s, przy których obracająca się gondola z wirnikiem poszukuje optymalnych warunków wietrznych, widmo hałasu osiąga najniższe poziomy. Natomiast ze wzrostem wartości częstotliwości poziom hałasu zmniejsza się w sposób liniowy. W wyznaczonym widmie wyróżnić można także kilka składowych harmonicznych, które w sposób znaczący wyróżniają się na tle składowych sąsiadujących. Pierwsza z nich, której poziom był największy, znajduje się w paśmie od 10 do 30 Hz. Jej położenie skorelowane jest z prędkością wiatru. Dla małych prędkości maksimum poziomu ciśnienia akustycznego znajduje się blisko częstotliwości 10 Hz. Wraz ze wzrostem prędkości wiatru maksimum to przesuwa się w kierunku wyższych częstotliwości i największą częstotliwość (ok. 30 Hz) osiąga dla prędkości wiatru 7,6 m/s. Potwierdzeniem wpływu

prędkości wiatru na mierzony poziom hałasu jest zakres zmian równoważnego poziomu hałasu zilustrowany na Rys. 6.45

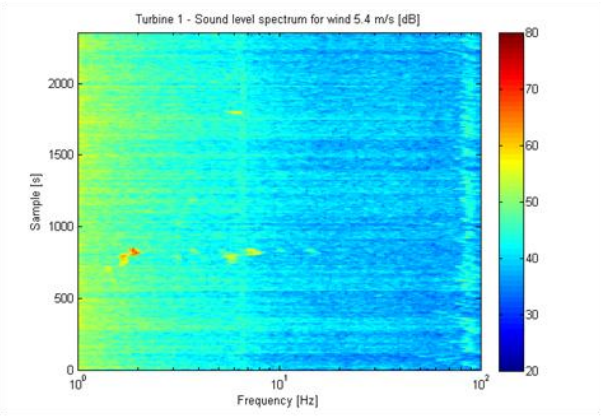


Rys. 6.45 Zestawienie porównawcze zmian poziomu dźwięku w funkcji prędkości wiatru – turbina T2

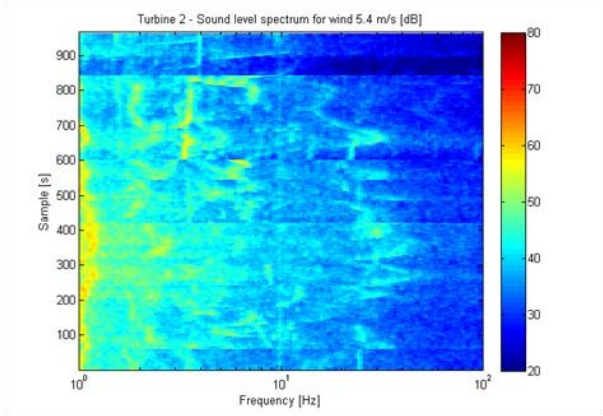
Analizując dynamikę sygnału, można zauważyć, że tak jak przy zmianach ogólnego poziomu hałasu, jego największe poziomy występują w zakresie pojedynczych herców, a wraz ze wzrostem częstotliwości poziomy te stopniowo zmniejszają swoją wartość, osiągając większe wartości jedynie w rejonie częstotliwości tonalnych [patrz rozdz.: 6.2.1.2].

W celu przeprowadzenia analizy niskoczęstotliwościowych sygnałów emitowanych do środowiska przez turbiny wiatrowe dużej mocy, dla wybranych prędkości wiatru wyznaczono, przy wykorzystaniu przekształcenia STFT, dwuwymiarowe spektrogramy reprezentujące zmiany poziomu ciśnienia akustycznego dla określonej stałej prędkości wiatru. Przedstawiają one obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanego poziomu ciśnienia akustycznego, przy zastosowanym czasie próbkowania równym 1 sekunda, gdzie kolejne próbki odpowiadają jednosekundowym przedziałom czasu podczas, których prędkość wiatru była stała. Ponieważ w czasie rejestracji prędkość wiatru ulegała zmianom, czas przedstawiony na spektrogramach jest czasem dyskretnym i nieciągłym. Podejście takie umożliwiło prezentację pseudociągłego zakresu zmian poziomu dźwięku dla zadanej

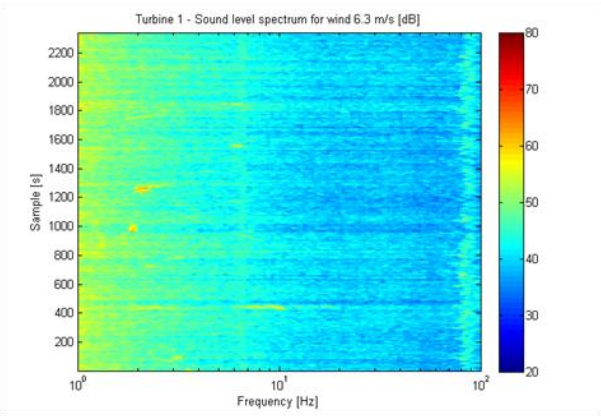
prędkości wiatru. Wyniki wybranych analiz przedstawiono na Rys. 6.46-6.51. Na wyznaczonych spektrogramach można zaobserwować jeszcze dokładniej zakresy zmian poziomów generowanych przez turbinę składowych infradźwiękowych w badanym zakresie częstotliwości i powiązać je z określonymi chwilami czasowymi



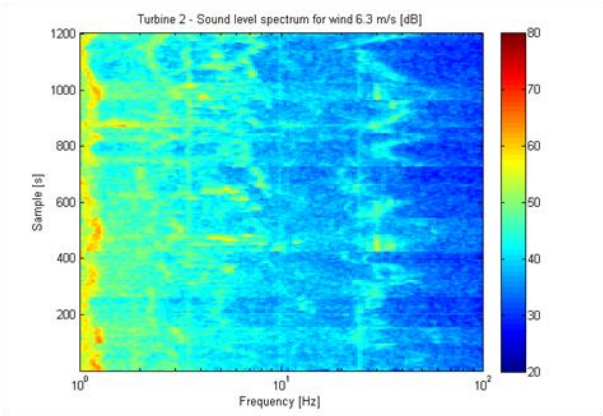
Rys. 6.46 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy prędkości wiatru równej 5,4 m/s - Turbina 1



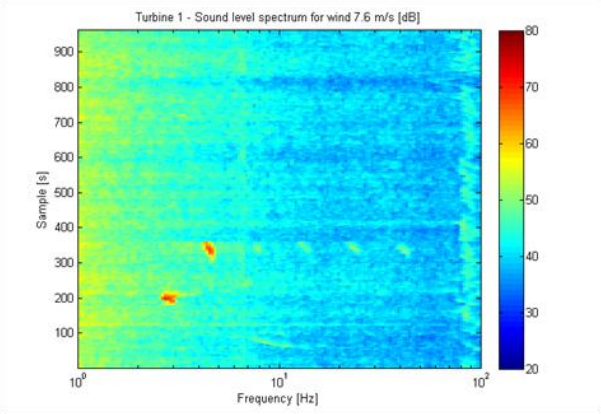
Rys. 6.47 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy prędkości wiatru równej 5,4 m/s - Turbina 2



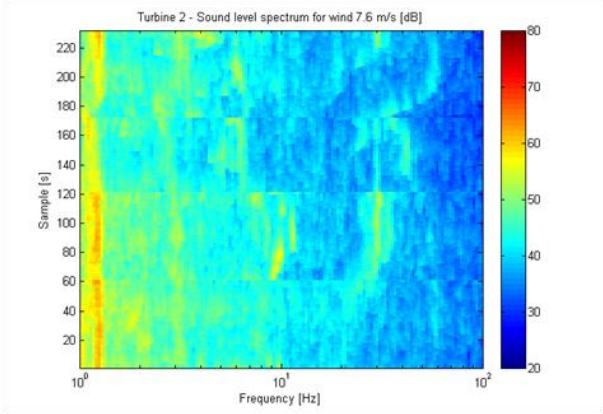
Rys. 6.48 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy prędkości wiatru równej 6,3 m/s - Turbina 1



Rys. 6.49 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy prędkości wiatru równej 6,3 m/s - Turbina 2



Rys. 6.50 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy prędkości wiatru równej - 7,6 m/s - Turbina 1



Rys. 6.51 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy prędkości wiatru równej - 7,6 m/s - Turbina 2

Analizując wyznaczone spektrogramy dla prędkości wiatru 5,4 m/s (Rys. 6.46 i 6.47), można stwierdzić, że w przypadku turbiny 2, charakterystyczne są prążki przedstawiające podwyższone poziomy ciśnienia akustycznego dla pasma częstotliwości infradźwiękowych (do ok. 10 Hz). W przypadku turbiny 1, nie jest możliwe wyróżnienie tak wyraźnych i znaczących prążków o podwyższonych wartościach ciśnienia akustycznego. Natomiast obserwowane zmiany zachodzą w sposób liniowy, począwszy od największych wartości przy niskich częstotliwościach do na najmniejszych wartości przy częstotliwościach największych.

Spektrogramy ciśnienia akustycznego rejestrowanych sygnałów akustycznych, które wyznaczono dla prędkość wiatru równej 6,3 m/s, zostały przedstawione na Rys. 6.48 i 6.49, odpowiednio dla turbiny 1 i turbiny 2. Analizując przedstawione zależności można stwierdzić, że w przypadku turbiny 2, podobnie jak dla prędkości wiatru 5,4 m/s, charakterystyczne są prążki przedstawiające podwyższone poziomy ciśnienia akustycznego dla częstotliwości infradźwiękowych (do 10 Hz), przy czym uzyskane poziomy są większe. W przypadku turbiny 1, analogicznie jak dla mniejszych prędkości wiatru, nie jest możliwe wskazanie tak wyraźnych prążków z podwyższonymi wartościami ciśnienia akustycznego, a obserwowane zmiany zachodzą liniowo, począwszy od największych wartości przy niskich częstotliwościach do najmniejszych przy częstotliwościach największych.

Poddając analizie spektrogramy poziomu ciśnienia akustycznego wyznaczone dla prędkości wiatru równej 7,6 m/s, które przedstawiono na Rys. 6.50 (turbina 1) i na Rys. 6.51

(turbina 2), można stwierdzić, że w przypadku turbiny 2, jeszcze wyraźniej, można zaobserwować charakterystyczne prążki przedstawiające podwyższone poziomy ciśnienia akustycznego dla częstotliwościach infradźwiękowych (do 10 Hz). Natomiast w przypadku turbiny 1 dalej nie jest możliwe wyróżnienie tak wyraźnych prążków o podwyższonych wartościach ciśnienia akustycznego, a obserwowane zmiany poziomu ciśnienia akustycznego zmieniają się liniowo.

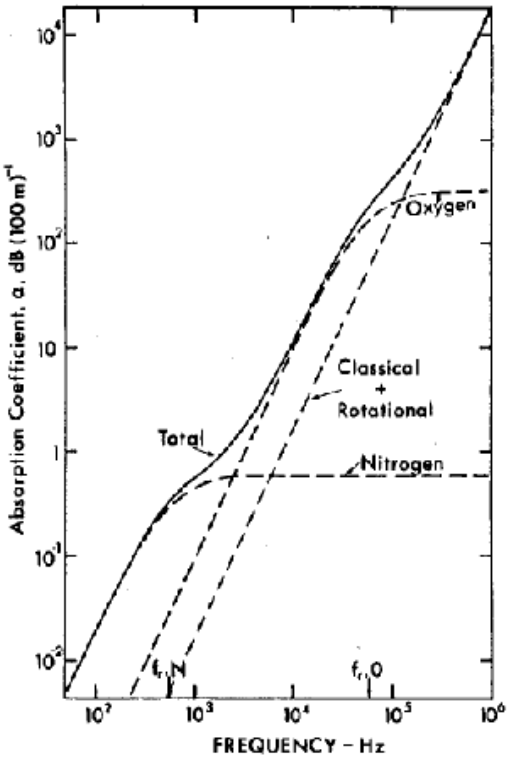
6.5 Określenie wpływu parametrów meteorologicznych na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków

Do parametrów meteorologicznych, innych niż prędkość wiatru, które mają wpływ na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków można zaliczyć: temperaturę, wilgotność oraz ciśnienie atmosferyczne. Zmiany tych parametrów wpływają na tłumienie dźwięku w powietrzu, które jest pochodną impedancji akustycznej ośrodka, jakim jest powietrze. Mechanizm tego tłumienia opiera się głównie na dwóch zjawiskach:

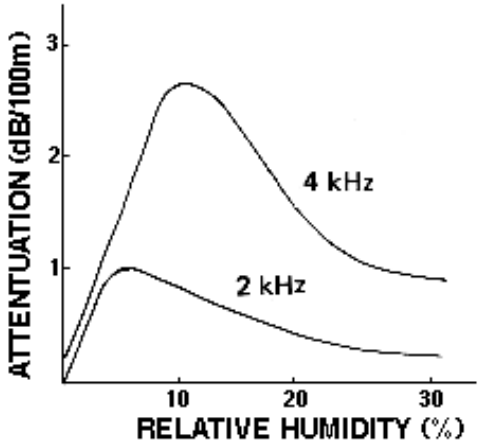
- strat lepkości spowodowanych tarciem między cząsteczkami powietrza w wyniku czego energia jest tracona poprzez generację ciepła,
- procesów relaksacji energii, które pochłaniają energię dźwięku poprzez wprowadzanie cząsteczek w drgania i rotacje. Cząsteczki, takie mogą odpromieniować dźwięk interferując z dźwiękiem przychodzącym [133].

Dominującą rolę w tłumieniu dźwięku odgrywają procesy relaksacji. Należy przy tym nadmienić, że relaksacja energii ruchu drgającego cząsteczek tlenu i azotu różni się od siebie. Cząsteczki te posiadają inne częstotliwości rezonansowe drgań własnych, które zależą od masy molowej. Masa molowa cząsteczek zależy z kolei od wartości temperatury i wilgotności.

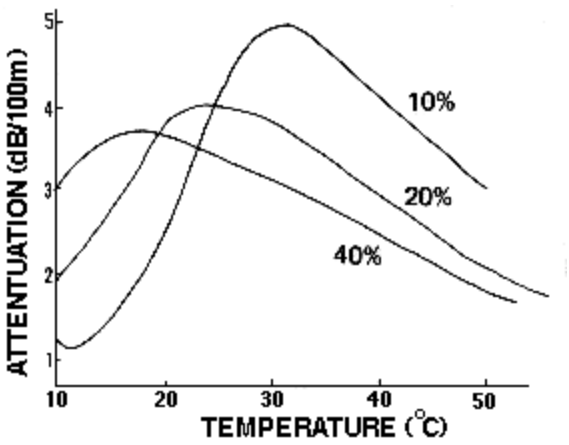
Wartość współczynnika pochłania α [dB/100m] zależy od częstotliwości f [Hz] (Rys. 6.52), temperatury T [^{0}C] i wilgotności h [%] (Rys. 6.53).



Rys. 6.52 Współczynnik tłumienia α dla ciśnienia 1024 hPa, temperatury 200 ^{0}C i wilgotności 70 % [133]

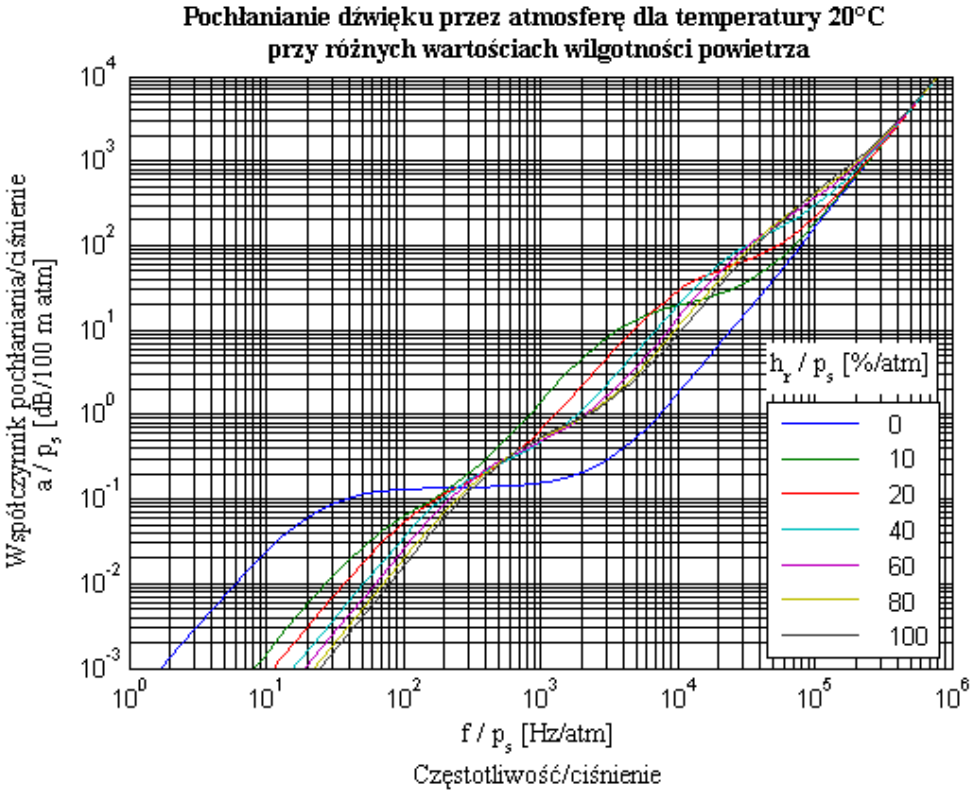


Rys. 6.53 Współczynnik tłumienia α w funkcji wilgotności h [%] dla różnych częstotliwości f [134]

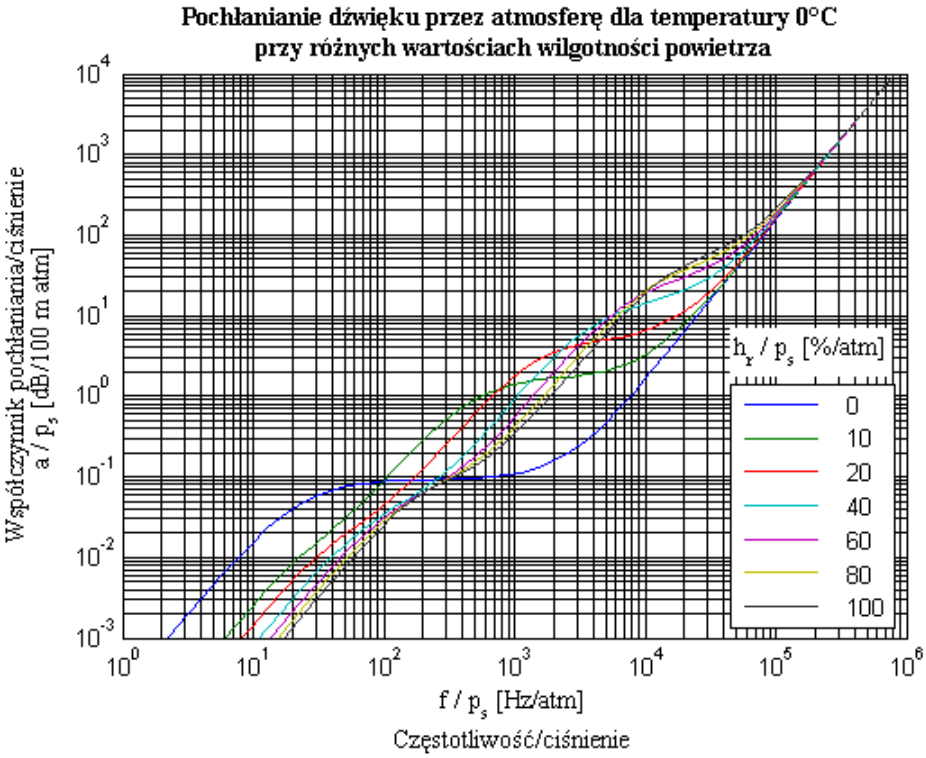


Rys. 6.54 Współczynnik tłumienia α w funkcji temperatury T [^{0}C] dla różnych wilgotności h [134]

Absorpcja dźwięku w powietrzu zaczyna odgrywać rolę dla odległości większych niż 30 metrów. W szczególności dotyczy to wyższych częstotliwości (począwszy od 5kHz), co związane jest głównie z długością fali akustycznej. Wartość absorpcji zmniejsza się wraz ze wzrostem zachmurzenia (wzrost wilgotności). Wyjątkiem jest sytuacja całkowicie suchego powietrza, gdzie tłumienie jest najmniejsze. Wraz ze spadkiem temperatury maksimum pochłaniania przesuwa się w kierunku wyższych wilgotności [134]. Na Rys. 6.55 przedstawiono wpływ wilgotności na wielkość tłumienia dźwięku w powietrzu.



Rys. 6.55 Współczynnik absorpcji dźwięku w powietrzu w funkcji częstotliwości dla różnych wilgotności przy temperaturze 20^0C [135]



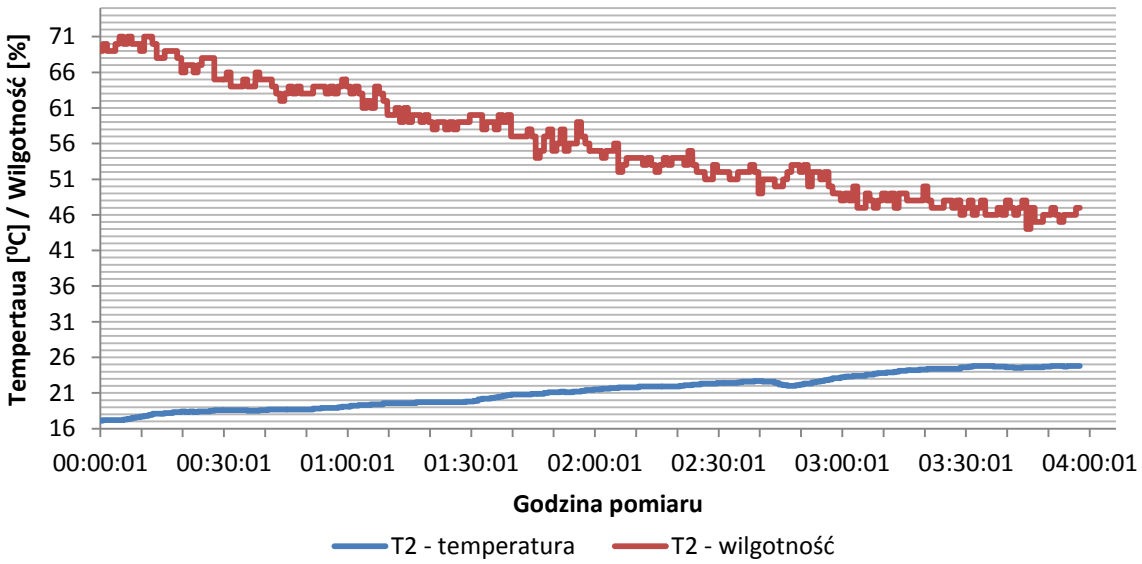
Rys. 6.56 Współczynnik absorpcji dźwięku w powietrzu w funkcji częstotliwości dla różnych wilgotności przy temperaturze 0^0C [135]

Reasumując, w zakresie niskich i infradźwiękowych częstotliwości wpływ parametrów metrologicznych na tłumienie dźwięku jest bardzo mały, a w praktyce pomijalny. Dla fali infradźwiękowej atmosfera jest bardzo dobrym ośrodkiem przewodzenia charakteryzującym się małą wartością impedancji akustycznej.

Największa zmienność temperatury i wilgotności zarejestrowano podczas pomiarów wykonanych przy T2 dla lokalizacji 2, a zakres zarejestrowanych zmian przedstawiono w odpowiednio tabeli 6.14 i na Rys. 6.57.

Tabela 6.14 Zakres zmian prędkości wiatru podczas pomiarów hałasu infradźwiękowego przy turbinie T2.

Prędkość wiatru	Temperatura [^{0}C]	Wilgotność [%]
Wartość maksymalna	24,8	71
Wartość minimalna	17,1	44
Wartość średnia	21,2	56,5

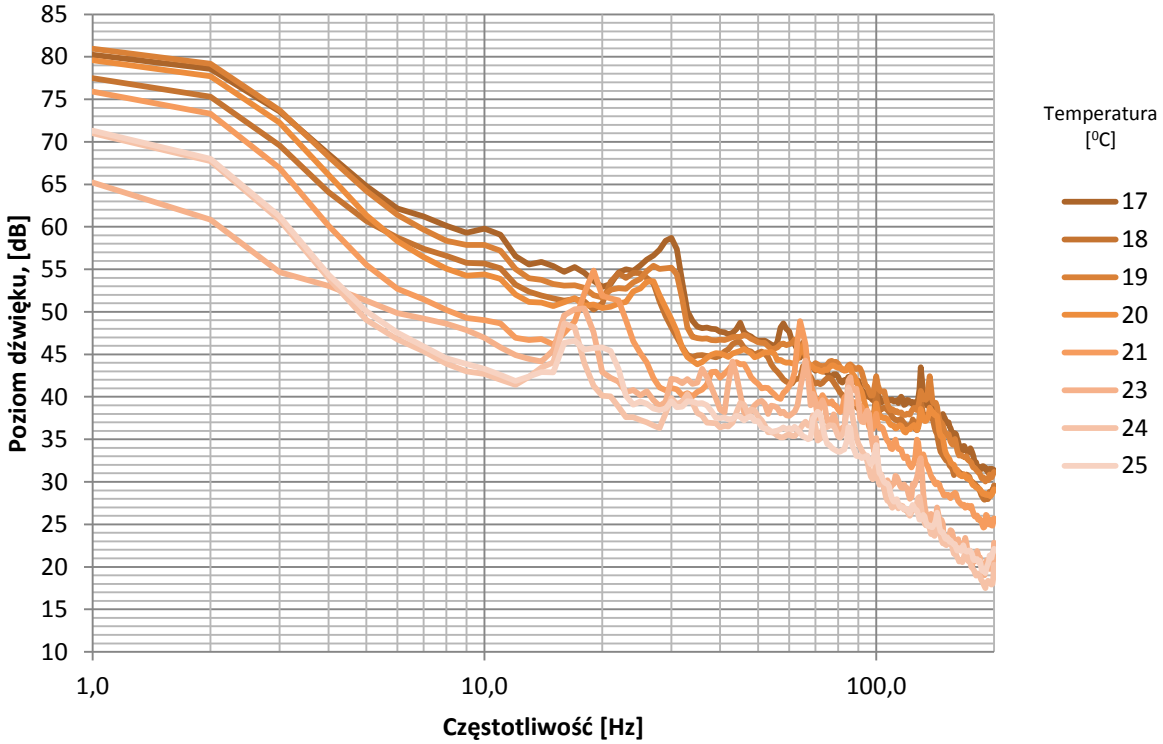


Rys. 6.57 Zmiany wartości temperatury i wilgotności powietrza podczas pomiarów hałasu infradźwiękowego przy turbinie T2.

W trakcie obserwowanych zmian temperatury i wilgotności zmianom ulegała także prędkość wiatru, dlatego określenie wpływu analizowanych parametrów meteorologicznych na zmiany poziomu dźwięku w zakresie infradźwiękowym obarczone są silną zależnością od panujących w danej chwili warunków wietrznych. Zakres wykonanych analiz objął wyznaczenie przebiegów obrazujących zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości (widma amplitudowe) i zmian równoważnego poziomu hałasu, będącego sumą poziomu hałasu dla poszczególnych widm, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych wyników.

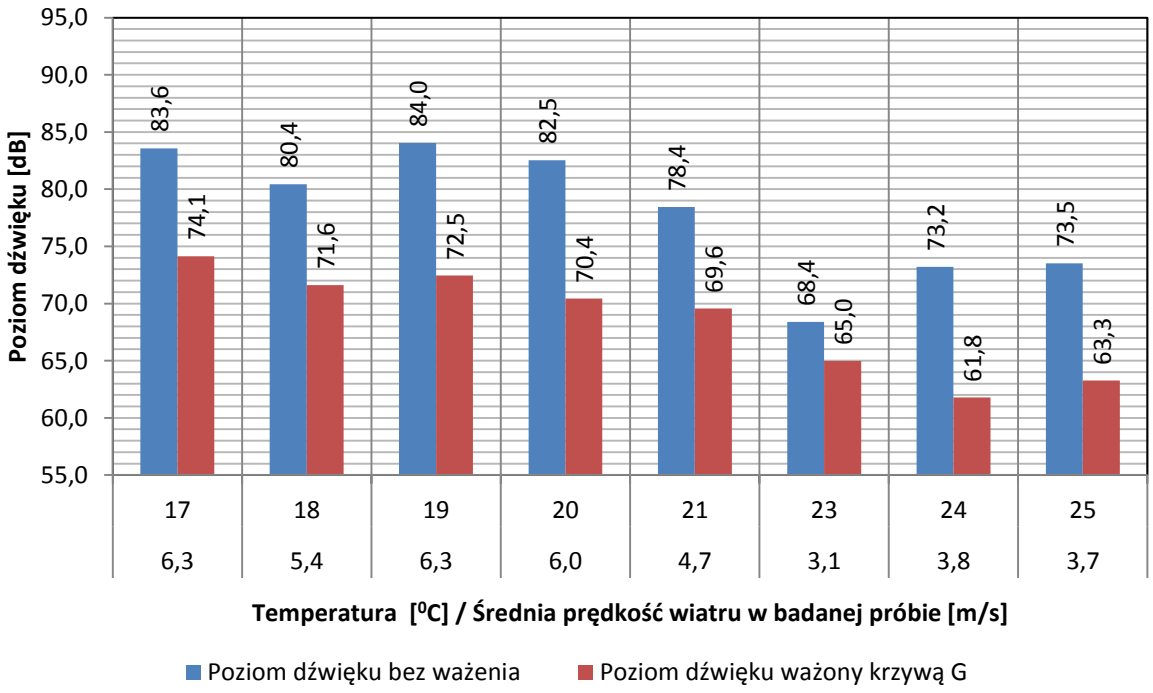
Widma amplitudowe wyznaczone dla badanych turbin przedstawiono odpowiednio na Rys. 6.58 (wpływ temperatury) i na Rys. 6.60 (wpływ wilgotności), przy czym obliczono je w sposób analogiczny jak poprzednio.

Zmiany równoważnego poziomu dźwięku zachodzące przy uśrednionej wartości prędkości wiatru przedstawiono na Rys. 6.59 (wpływ temperatury) i Rys. 6.61 (wpływ wilgotności).



Rys. 6.58 Przebiegi widm amplitudowych poziomu dźwięku w funkcji częstotliwości dla różnych wartości temperatury – turbina T2

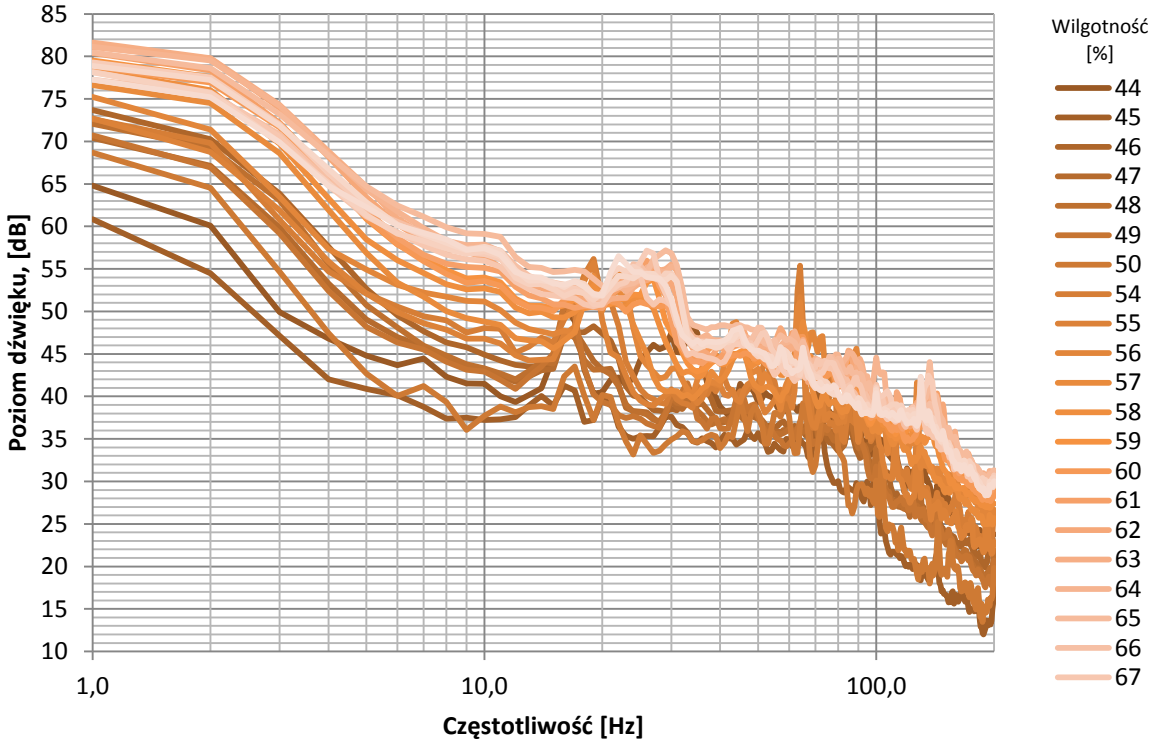
Zakres zmian w widmie hałasu przy różnych wartościach temperaturach jest analogiczny do tego, jaki był obserwowany przy zmianie prędkości wiatru (patrz: Rys. 6-41) i wynika głównie z wartości średniej prędkości wiatru występującej w badanej próbie. Największe wartości poziomu dźwięku występują w zakresie najniższych częstotliwości i niższych temperatur. Wraz ze wzrostem częstotliwości i temperatury poziom hałasu zmniejsza swoją wartość. Charakterystyczne jest też występowanie podbić w widmie, w paśmie od 10 do 30 Hz, które wraz ze wzrostem temperatury przesuwają się w kierunku niższych częstotliwości. Wpływ temperatury na emisję akustyczną można szczegółowo zaobserwować na wykresach słupkowych zilustrowanych na Rys. 6.59.



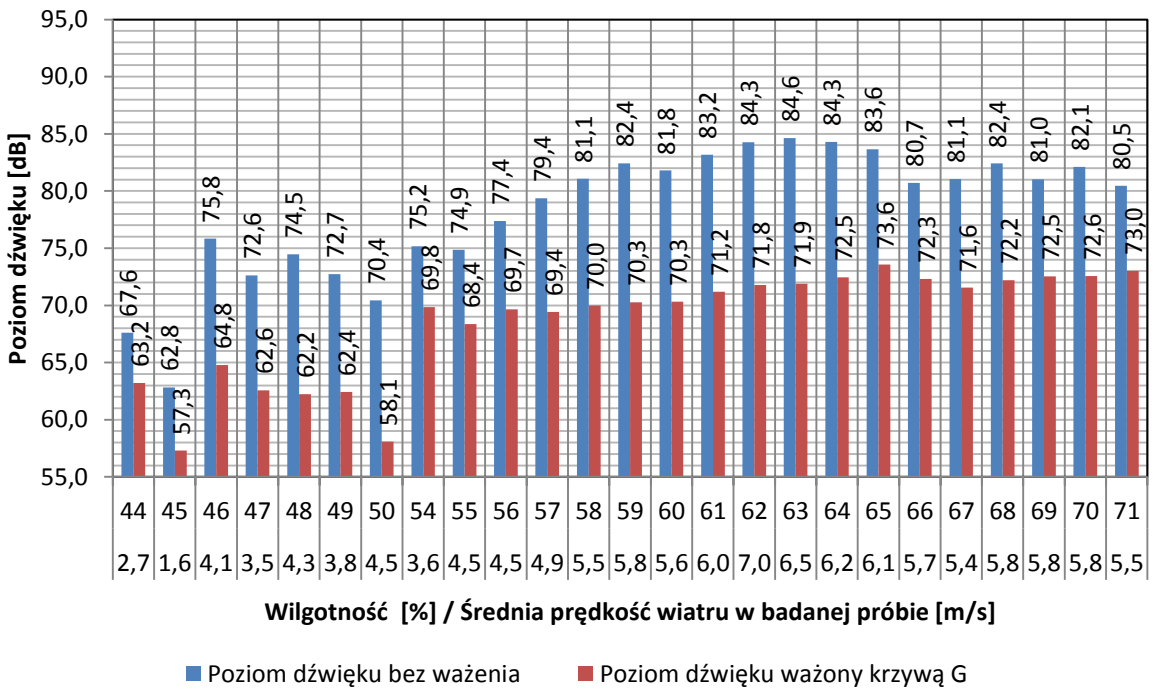
Rys. 6.59 Zmiany poziomu dźwięku w funkcji temperatury – turbina T2

W dniu pomiaru, wraz ze wzrostem temperatury malała średnia prędkość wiatru, co bezpośrednio miało wpływ na uzyskiwane wyniki. Jedynie przy temperaturach: 17^{0}C, 19^{0}C i 20^{0}C prędkość wiatru była zbliżona do siebie i można było analizować wpływ zmian temperatury na poziom hałasu. Dla danych temperatur wzrost ich wartości prowadzi do zmniejszenia poziomu hałasu w zakresie infradźwiękowym.

Analogiczna sytuacja miała miejsce przy zmianach wilgotności powietrza. Wraz ze wzrostem nasłonecznienia zmniejszała się wilgotność powietrza, wzrastała wartość temperatury i malała prędkość wiatru. Wszystkie te czynniki sprawiały, że wraz z zmniejszaniem się wilgotności zmniejszała się wartość poziomu dźwięku. Przy stosunkowo stałych prędkościach wiatru, które utrzymywały się w zakresie wilgotności od 57 do 71 %, można zauważyć że początkowo wraz ze wzrostem wilgotności poziom dźwięku zmniejsza się, by powyżej wilgotności 65 % ustabilizować się na stosunkowo stałym poziomie.



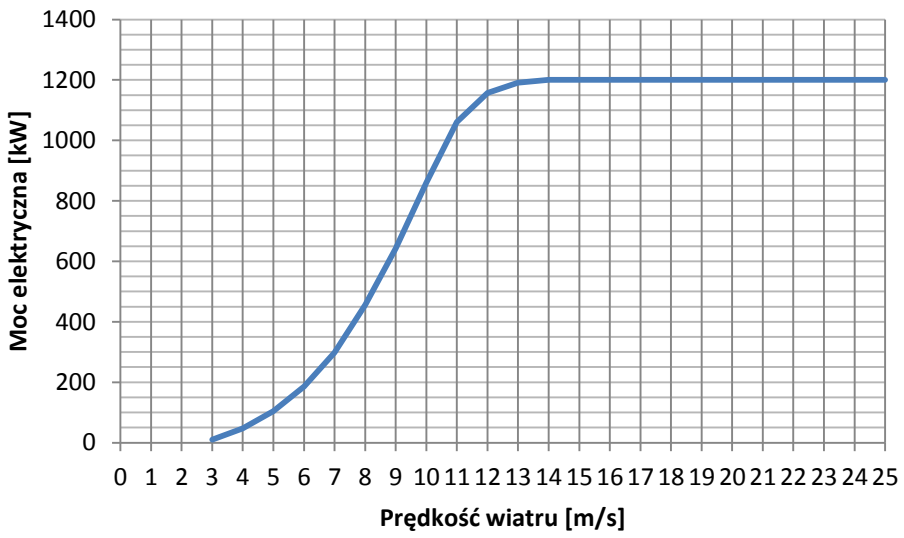
Rys. 6.60 Przebiegi widm amplitudowych poziomu dźwięku w funkcji częstotliwości dla różnych wilgotności powietrza – turbina T2



Rys. 6.61 Zmiany poziomu dźwięku w funkcji wilgotności powietrza – turbina T2

6.6 Ocena wpływu wielkości mocy elektrycznej oddawanej przez turbiny wiatrowe do systemu elektroenergetycznego na poziom ciśnienia akustycznego generowanych infradźwięków

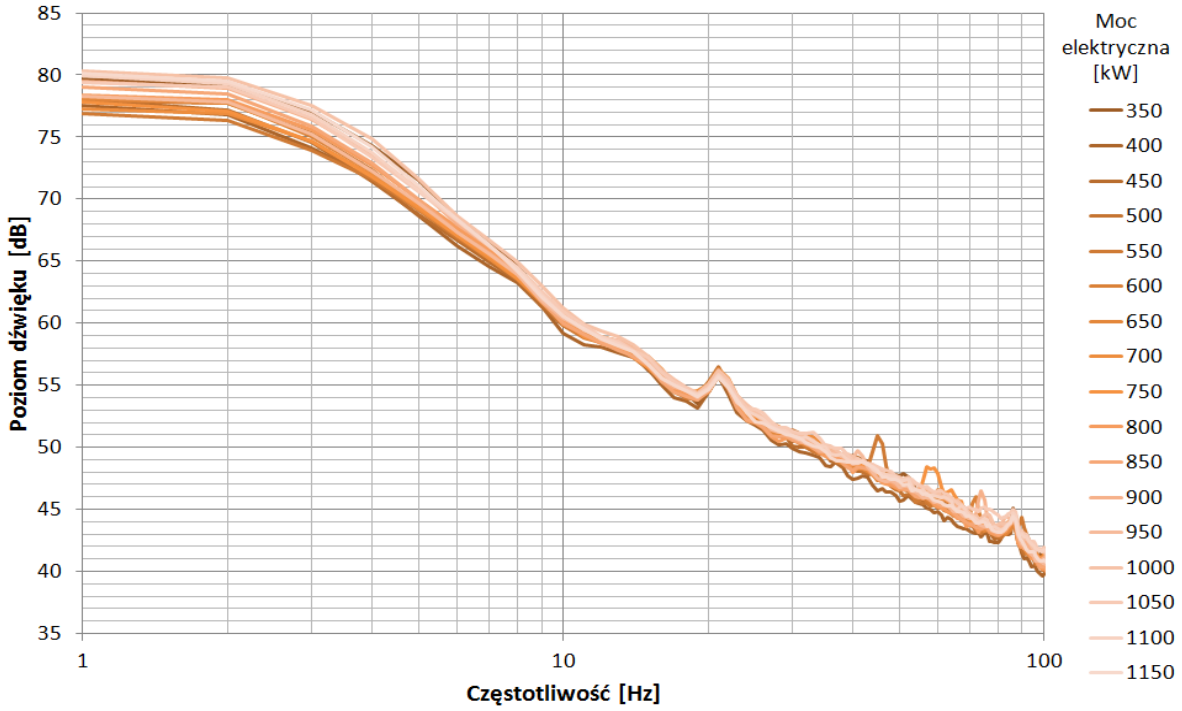
W celu określenia zależności zmian wielkości oddawanej mocy elektrycznej do systemu elektroenergetycznego na poziom ciśnienia akustycznego generowanego przez turbinę wiatrową w zakresie infradźwiękowym obliczono uśrednione przebiegi widm amplitudowych dla wytwarzanych przez turbinę wartości energii elektrycznej. Należy zaznaczyć przy tym, że wielkość mocy elektrycznej jest ściśle powiązana z prędkością wiatru. Zależność ta jest podawana przez producentów w postaci krzywej mocy. Spośród badanych turbin dostęp do informacji o ilości oddawanej mocy elektrycznej w trakcie wykonywanych pomiarów posiadano tylko dla turbiny T1. Deklarowany przez producenta, przebieg krzywej mocy elektrycznej dla badanej turbiny przedstawiono na Rys 6.62.



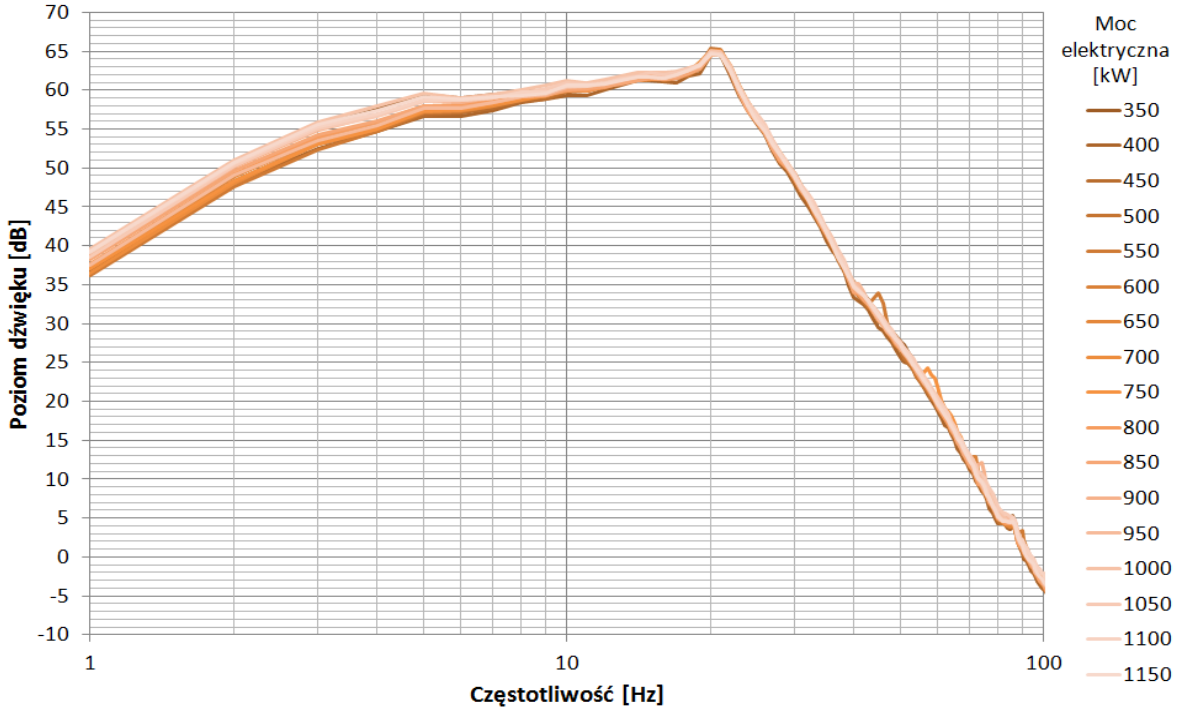
Rys. 6.62 Przebieg krzywej mocy dla turbiny T1 – dane producenta[136]

Podczas pomiarów prędkość wiatru ulegała dużym wahaniom wartości w przedziale od3,6 m/s do 9,8 m/s, co przekładało się na zmianę w ilości oddawanej mocy elektrycznej w zakresie od 350 kW do 1150 kW. Zarejestrowany zakres zmian prędkości wiatru, pozwolił na przeprowadzenie analizy infradźwięków generowanych przez badaną turbinę w szerokim spektrum warunków pracy. Pozostałe parametry meteorologiczne i warunki pracy utrzymywały się na stałym poziomie i nie ulegały znaczącym zmianom podczas przeprowadzonych pomiarów.

W celu dokonania dokładniejszej oceny wpływu zmierzonych zmian poziomu ciśnienia akustycznego, wyniki obliczeń przedstawione zostały na dwóch wykresach, bez i z wykorzystaniem krzywej ważenie G (Rys. 6.63 i 60.64).



Rys. 6.63 Widma amplitudowe sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badaną turbinę wiatrową wyznaczone dla różnych wielkości oddawanej mocy elektrycznej, bez zastosowania krzywej ważenia G.

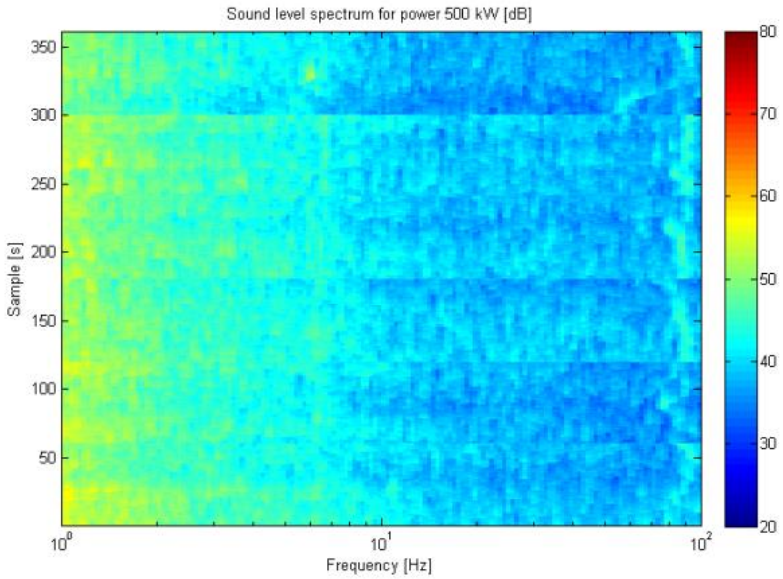


Rys. 6.64 Widma amplitudowe sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badaną turbinę wiatrową wyznaczone dla różnych wielkości oddawanej mocy elektrycznej, z zastosowaniem krzywej ważenia G.

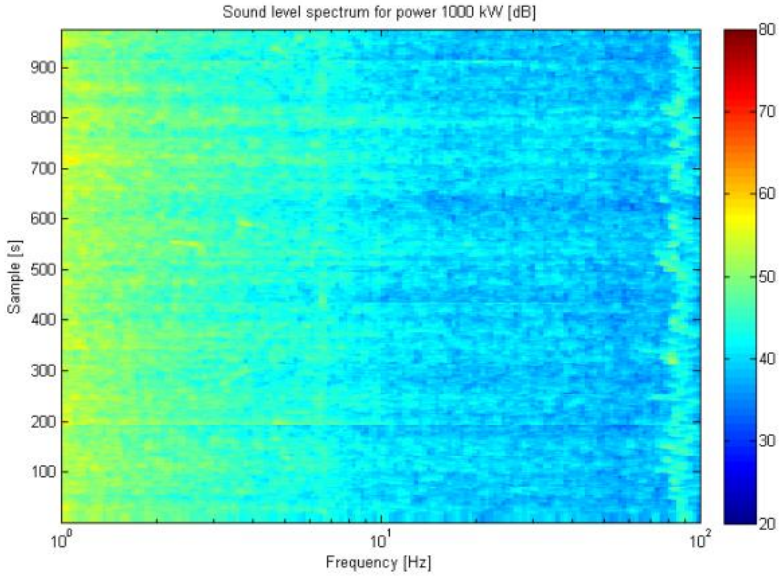
Szeroki zakres zmian prędkości wiatru pozwolił na wykonanie pomiarów poziomu ciśnienia akustycznego dla stosunkowo dużej liczby poziomów wielkości energii oddawanej mocy elektrycznej przez analizowaną turbinę. Na obu charakterystykach (Rys. 6.63 i 6.64) prezentowane są te same zależności różniące się jedynie zastosowaną krzywą ważenia. Wielkość zmian poziomu ciśnienia akustycznego największa jest w zakresie najniższych częstotliwości, od 1 Hz do 10 Hz. W paśmie tym wraz ze wzrostem oddawanej do systemu elektroenergetycznego mocy elektrycznej następuje stopniowy wzrost poziomu dźwięku, a maksymalne różnice dochodzą do 10 dB. Powyżej częstotliwości 10 Hz wpływ ilości oddawanej mocy elektrycznej na poziom dźwięku zaciera się i maksymalne różnice w mierzonych poziomach dochodzą do (3-4) dB. Dla wszystkich wyznaczonych widm poziom dźwięku maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Na otrzymanych przebiegach wyróżnić można także jedną częstotliwość rezonansową wynoszącą 21 Hz, wspólną dla każdej wielkości oddawanej mocy elektrycznej. Dla częstotliwości tej otrzymano także największy poziom hałasu ważony krzywą ważenia G, który wynosił 65,3 dBG.

Dodatkowo, w celu przeprowadzenia szczegółowej analizy niskoczęstotliwościowego widma hałasu emitowanego do środowiska przez badaną turbinę, dla poszczególnych wielkości oddawanej mocy elektrycznej wykonano dwuwymiarowe spektrogramy, które wyznaczono przy wykorzystaniu przekształcenia STFT. Przedstawiają one obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanego poziomu ciśnienia akustycznego, przy zastosowanym czasie próbkowania równym 1 sekunda, gdzie kolejne próbki odpowiadają jednosekundowym przedziałom czasu podczas, których wielkość oddawanej mocy nie zmieniała się . Zilustrowane zależności zostały wyznaczone przy zastosowaniu płaskiej krzywej ważenia (bez krzywej ważenia G). Na spektrogramach można zaobserwować w sposób bardziej dokładny zakres i poziomy generowanych przez turbinę składowych infradźwiękowych w emitowanym widmie hałasu. Do prezentacji w pracy wybrano przykładowe poziomy mocy elektrycznej równe odpowiednio: 500 i 1000 kW, dla których wyznaczono spektrogramy przedstawione na Rys. 6.65 i 6.66. Analizując wyznaczone spektrogramy można stwierdzić, że nie jest możliwe wyróżnienie żadnych wyraźnych i znaczących prążków o podwyższonych wartościach ciśnienia akustycznego. Natomiast

obserwowane zmiany zachodzą w sposób liniowy, począwszy od największych wartości przy niskich częstotliwościach do na najmniejszych przy częstotliwościach największych.



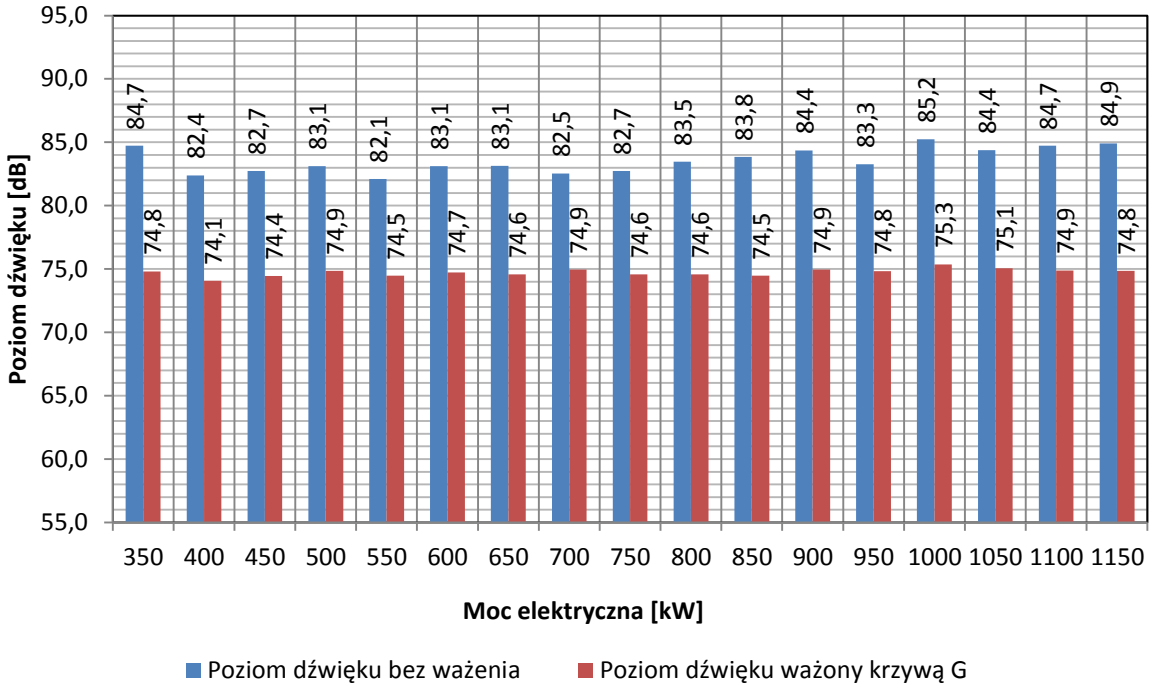
Rys. 6.65 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy wartości oddawanej mocy elektrycznej 500 kW.



Rys. 6.66 Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową, przy wartości oddawanej mocy elektrycznej 1000 kW.

Reasumując, w przypadku badanej turbiny wpływ wielkości mocy elektrycznej oddawanej do systemu elektroenergetycznego przez badaną turbinę wiatrową nie wpływała znacząco na poziom emitowanego hałasu. Potwierdzeniem tego jest zakres zmian

równoważnego poziomu hałasu, będącego sumą poziomu hałasu dla poszczególnych widm, stanowiący jednoliczbową interpretację prezentowanych wyników, które zestawiono na Rys. 6.67.

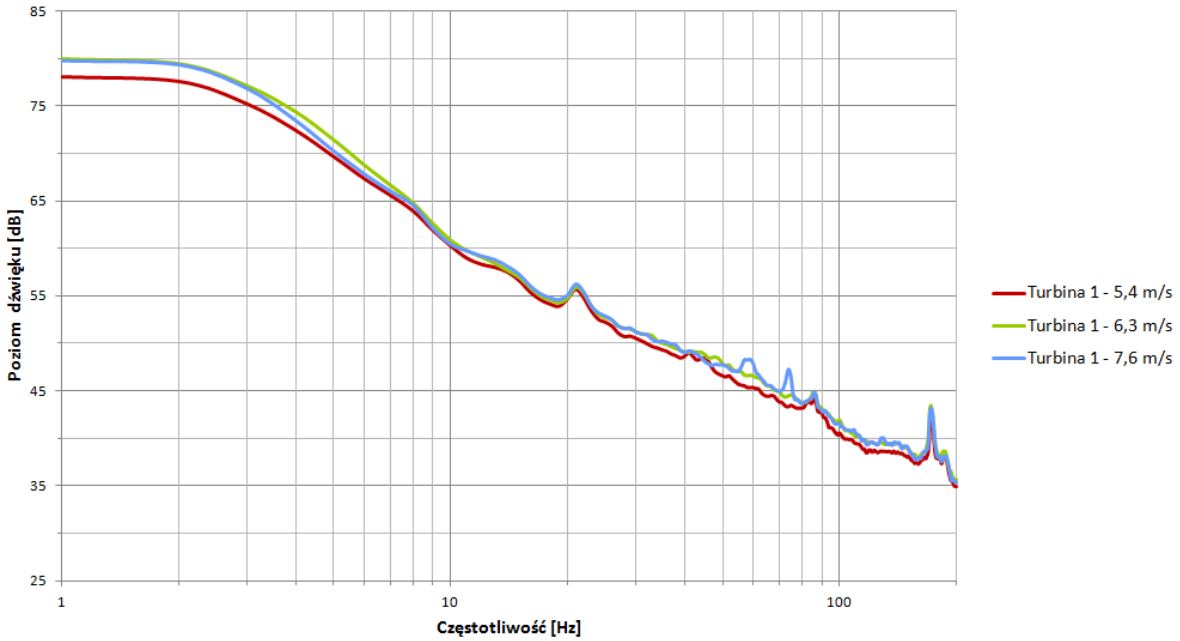


Rys. 6.67 Zmiany poziomu dźwięku w funkcji wielkości mocy elektrycznej oddawanej do systemu elektroenergetycznego przez turbinę T1.

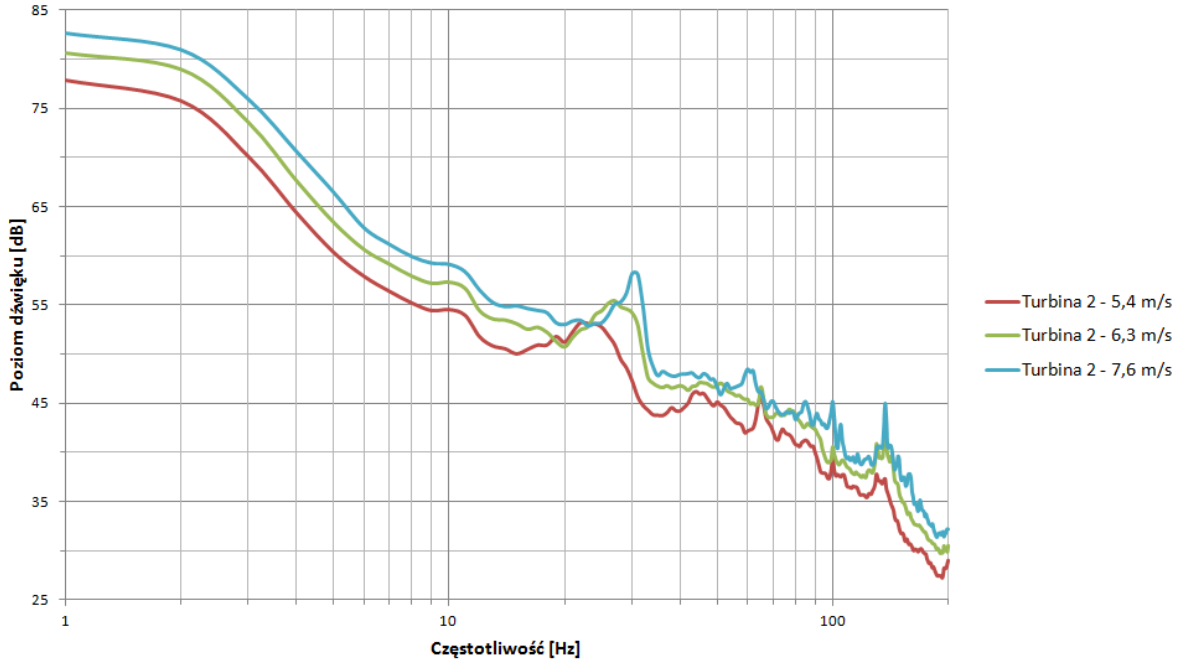
6.7 Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe różnych mocy z generatorem asynchronicznym i synchronicznym

W celu określenia, czy i w jakim zakresie typ generatora zastosowanego w turbinie wiatrowej do przetwarzania siły wiatru w energię elektryczna wpływa na poziom hałasu infradźwiękowego, przeprowadzono analizę porównawczą wyników uzyskanych dla turbin T1 i T2. Turbina T1 wyposażona była w generator synchroniczny o znamionowej mocy elektrycznej 1,2 MW, natomiast turbina T2 w asynchroniczny o mocy równej 2,0 MW. Podstawową różnicą między badanymi generatorami jest brak przekładni w turbinie z generatorem synchronicznym, co znacząco wpływa na poziom emitowanego w gondoli hałasu.

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej poziomu hałasu infradźwiękowego generowanego przez badane turbiny dokonano wyboru trzech charakterystycznych wartości prędkości wiatru, tj.: 5,4m/s, 6,3 m/s i 7,6 m/s, które w sposób reprezentatywny obrazują zakres rejestrowanych zmian. Najmniejsza prędkość wiatru - 5,4 m/s - charakteryzuje oddziaływanie turbiny zaraz po jej rozruchu. Średnia wartość prędkości wiatru - 6,3 m/s - odpowiada za wielkość emitowanego hałasu dla pracy turbiny w jej środkowym zakresie efektywności energetycznej. Największa zmierzona prędkość wiatru -7,6 m/s - obrazuje emisję hałasu infradźwiękowego przy największej w danym dniu efektywności energetycznej badanej turbiny. Przebiegi widm częstotliwościowych wyznaczonych dla badanych turbin przedstawiono odpowiednio na Rys. 6.68 (turbina T1 - synchroniczna) i na Rys. 6.69 (turbina T2 - asynchroniczna).



Rys.6.68 Uśrednione widma amplitudowe sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową T1, wyznaczone dla różnych prędkości wiatru – generator synchroniczny.



Rys. 6.69 Uśrednione widma amplitudowe sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez turbinę wiatrową T2, wyznaczone dla różnych prędkości wiatru - generator asynchroniczny.

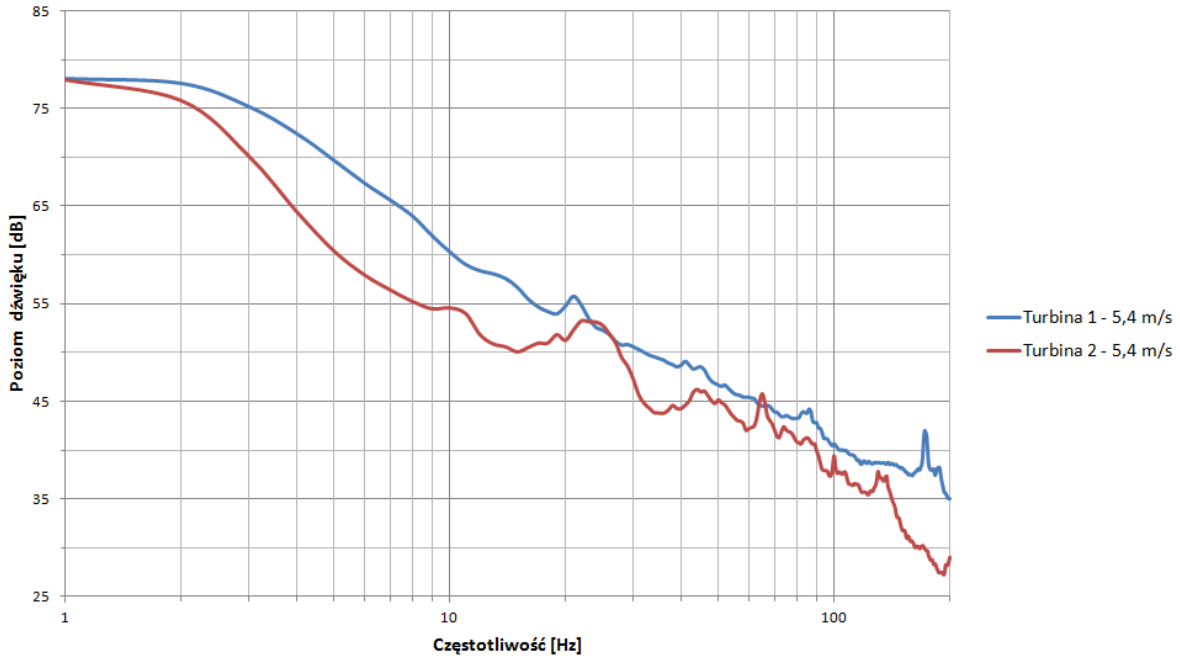
W przypadku generatora asynchronicznego zwiększenie prędkości wiatru powoduje widoczny wzrost poziomu ciśnienia akustycznego emitowanego hałasu, dotyczy to całego badanego zakresu częstotliwości. Przy czym największa wartość mierzonych sygnałów występuje w paśmie infradźwiękowym (od 1 do 20 Hz). Wraz ze wzrostem częstotliwości wartość ciśnienia akustycznego zmniejsza się w sposób zbliżony do linowego. W obliczonych widmach amplitudowych można wyróżnić kilka charakterystycznych składowych harmonicznych. Pierwsza z nich, której poziom był największy, znajduje się w paśmie od 20 do 30 Hz. Jej położenie skorelowane jest z prędkością wiatru. Dla mniejszych wartości maksimum poziomu ciśnienia akustycznego znajduje się przy częstotliwości 20 Hz. Natomiast wraz ze wzrostem prędkości wiatru maksimum to przesuwa się w kierunku wyższych częstotliwości i największą częstotliwość (ok. 30 Hz) osiąga dla prędkości wiatru równej 7,6 m/s.

W przypadku turbiny synchronicznej zauważalny jest znacznie mniejszy wpływ zmian prędkości wiatru na poziom rejestrowanego ciśnienia akustycznego generowanych sygnałów akustycznych w całym analizowanym paśmie częstotliwości. Obserwowane zmiany, dla

przyjętych prędkości wiatru, są rzędu kilku decybeli i nie są tak wyraźne jak dla turbiny asynchronicznej. Jednakże należy podkreślić, że niezależnie od wartości prędkości wiatru, największy poziom rejestrowanego ciśnienia akustycznego występuje w paśmie infradźwiękowym (od 1 do 20 Hz). Uzyskano także podobny kształt przebiegu rejestrowanego poziomu hałasu w funkcji częstotliwości. W wyznaczonym widmie wyróżnić można także kilka składowych harmonicznych, których wartości są mniejsze niż w przypadku turbiny asynchronicznej.

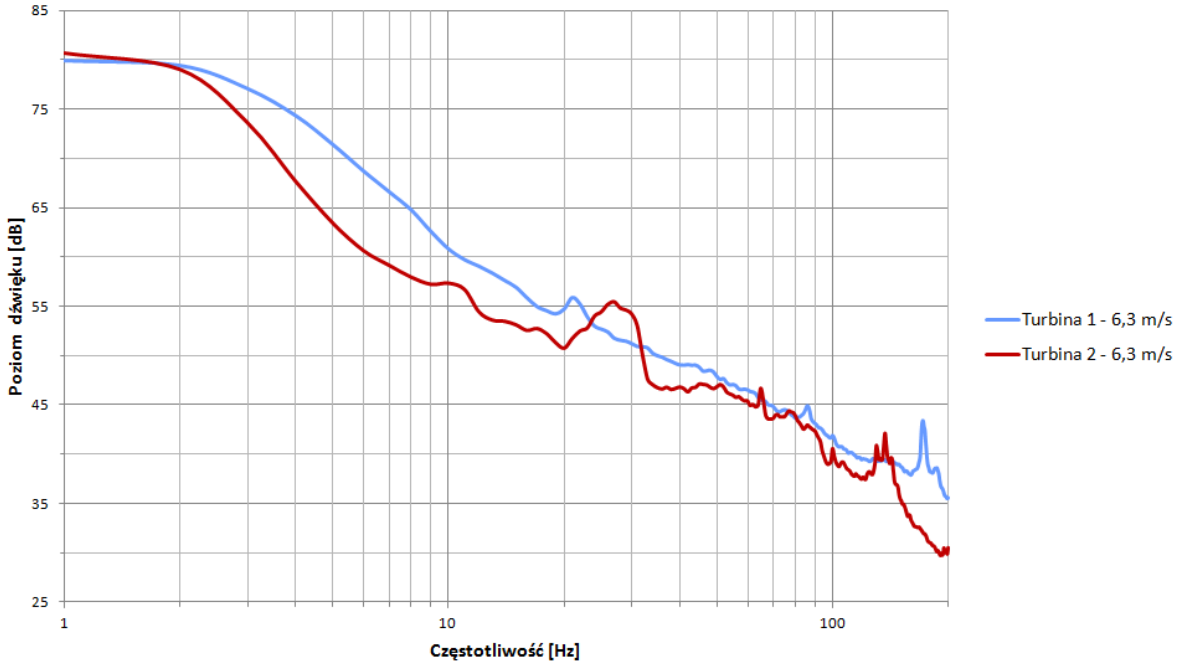
Ponadto w celach porównawczych zestawiono na pojedynczych charakterystykach dwa uśrednione przebiegi widm częstotliwościowych dla badanych turbin, oddzielnie dla trzech wybranych prędkości wiatru (Rys. 6.70, 6.71, 6.72). Uśrednianie polegało na obliczeniu średniej wartości poziomu ciśnienia kaustycznego dla każdej częstotliwości, przy stałej prędkości wiatru. Każdorazowo dla wyznaczonych par widm obliczono wartość współczynnika korelacji Pearsona, który umożliwił ocenę jakościową stopnia zbieżności zarejestrowanych przebiegów. Dla obliczonych współczynników korelacji przeprowadzono ocenę ich istotności poprzez testowanie hipotezy H_0 zakładającej brak korelacji badanych zmiennych, wobec hipotezy alternatywnej H_1 zakładającej ich korelację [137]. Wyniki przeprowadzonych ocen istotności dla wszystkich obliczanych współczynników korelacji Pearsona pozwoliły odrzucić hipotezę o wzajemnej korelacji, znacząco przekraczając wartość krytyczną obliczoną dla poziomu istotności równym 0,1.

Porównanie uśrednionych widm amplitudowych obu typów turbiny, przy prędkości wiatru 5,4 m/s (Rys. 6.70), wskazuje na większe oddziaływanie akustyczne turbiny z generatorem synchronicznym, których wartości w całym analizowanym paśmie częstotliwości są większe od poziomów emitowanych przez turbinę wyposażoną w generator asynchroniczny. Wyjątek stanowią częstotliwości harmoniczne dla turbiny asynchronicznej, dla której mierzone poziomy ciśnienia akustycznego mają zbliżone wartości. Korelacja wzajemna obu sygnałów jest silna i wynosi 0,94



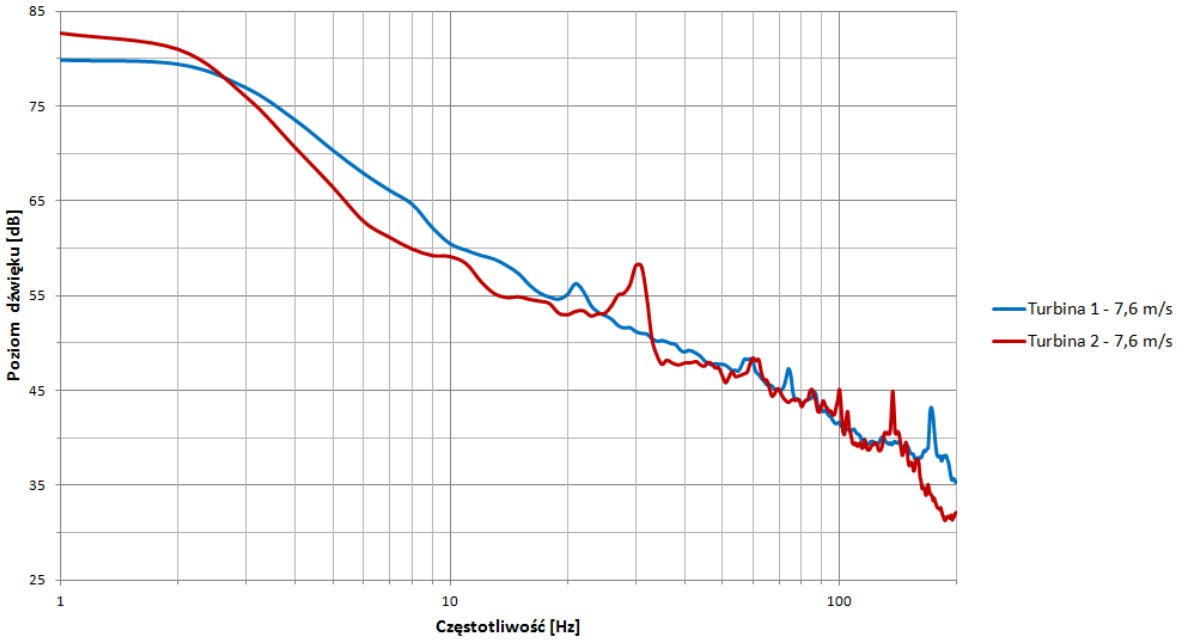
Rys. 6.70 Porównanie uśrednionych widm amplitudowych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badane turbiny, przy prędkości wiatru równej 5,4 m/s.

Porównanie uśrednionych widm amplitudowych obu turbiny przy prędkości wiatru 6,3 m/s (Rys. 6.71), wskazuje na zmniejszenie się różnic pomiędzy otrzymanymi przebiegami dla obu turbin, a dla częstotliwości harmonicznych turbiny asynchronicznej uzyskiwane wartości przewyższają wartości wyznaczone dla turbiny synchronicznej. Wzajemna korelacja obu sygnałów również jest silna i wynosi 0,94.



Rys. 6.71 Porównanie uśrednionych widm amplitudowych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badane turbiny, przy prędkości wiatru równej 6,3 m/s

Porównanie przebiegów uśrednionych widm amplitudowych wyznaczonych dla obu analizowanych turbin przy tej samej prędkości wiatru równej 7,6 m/s (Rys. 6.72), wskazuje na jeszcze większe zmniejszenie się różnic w analizowanych zależnościach , które powyżej częstotliwości harmonicznej 31 Hz praktycznie się pokrywają. Dla częstotliwości harmonicznej w widmie turbiny z generatorem asynchronicznym (31 Hz) można zauważyć charakterystyczne podbicie widma nad przebieg dla turbiny z generatorem synchronicznym. Korelacja wzajemna obu sygnałów jest jeszcze silniejsza i wynosi 0,95.



Rys. 6.72 Porównanie uśrednionych widm amplitudowych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badane turbiny, przy prędkości wiatru równej 7,6 m/s.

Drugim etapem wykonanych analiz porównawczych dla obu typów konstrukcji było określenie zakresu zmian emitowanych poziomów infradźwięków w funkcji prędkości wiatru, które wyznaczono dla częstotliwości medianowych i wybranych częstotliwości rezonansowych.

W tym celu dla każdej z turbin określono częstotliwości, przy których występowały pierwsze lokalne maksima oraz obliczono wartości częstotliwości medianowych. Dla określonych częstotliwości rezonansowych i medianowych przedstawiono zakres zmian poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji mierzonych prędkości wiatru. Dodatkowo dla otrzymanych rozkładów wyznaczono równania funkcji regresji liniowej opisującej szybkość i kierunek zmian poziomu emitowanego hałasu. Uzyskane wyniki przedstawiono na Rys. 6.73, 6.74 i 6.75.

Parametry równań funkcji regresji liniowej opisujących badane zależności wyznaczono za pomocą metody najmniejszych kwadratów. Dla każdej z funkcji określono istotność współczynnika regresji liniowej oraz zadbano autokorelację czynnika losowego, w oparciu o wzory i metody przedstawione w książce [137].

W przypadku turbiny asynchronicznej, na podstawie wyznaczonych widm amplitudowych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości, wskazać można jedną

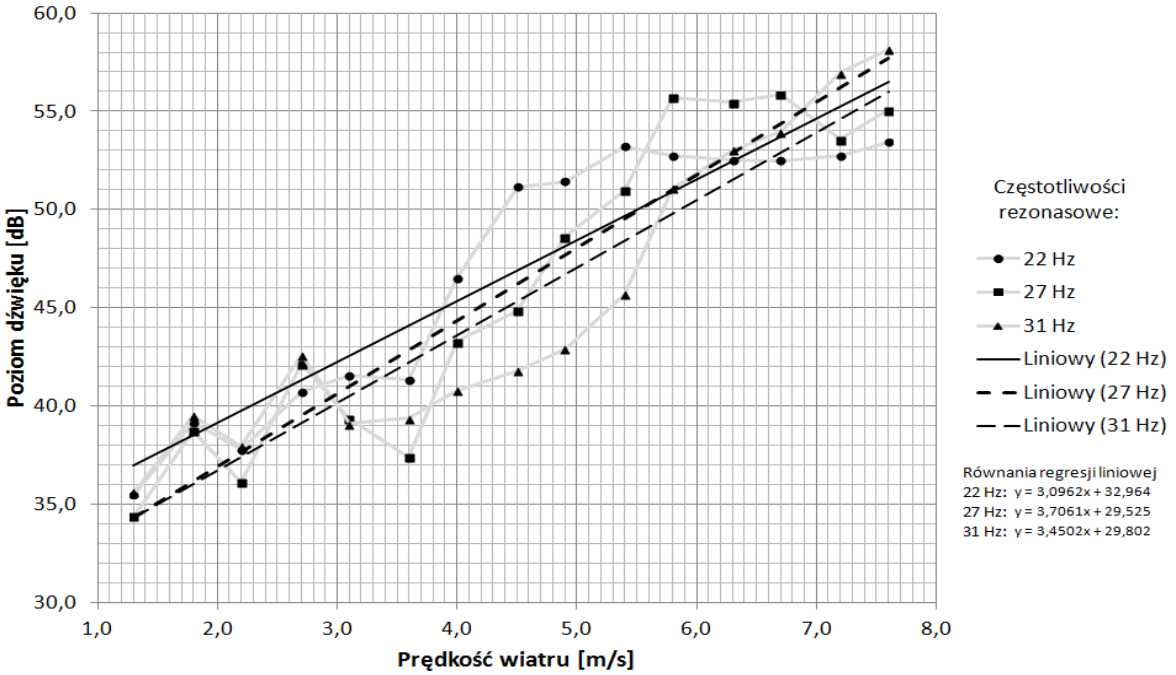
częstotliwość rezonansową o wartości wynoszącej odpowiednio dla poszczeółnych prędkości wiatru: 22 Hz dla prędkości 5,4 m/s; 27 Hz dla prędkości 6,3 m/s; 31 Hz dla prędkości 7,6 m/s oraz trzy częstotliwości medianowe równe: 130 Hz dla prędkości 5,4 m/s; 131 Hz dla prędkości 6,3 m/s oraz 105 Hz dla prędkości 7,6 m/s.

W przypadku turbiny synchronicznej pierwsza harmoniczna, podobnie jak dla turbiny asynchronicznej, występuje przy częstotliwości ok. 21 Hz, a jej położenie jest niezależne od prędkości wiatru. Dla wszystkich trzech rozpatrywanych prędkości wiatru występuje także, jedna, wspólna częstotliwość medianowa równa: 96 Hz.

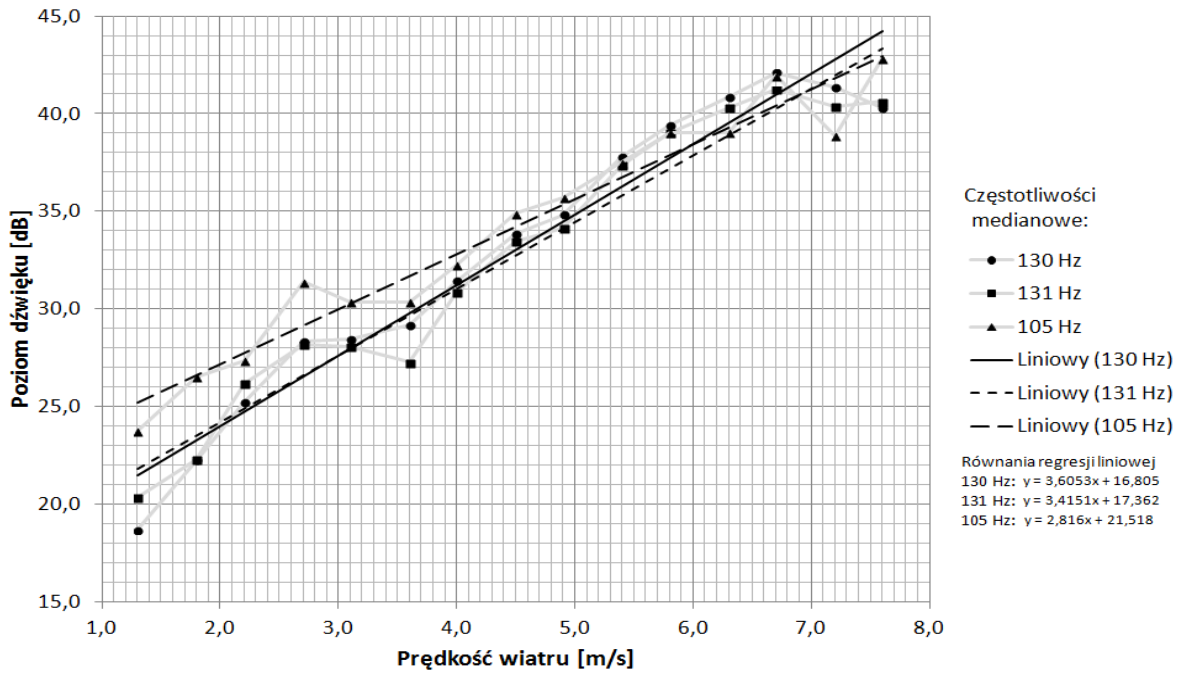
Na podstawie analizy charakterystyk wyznaczonych dla turbiny asynchronicznej (Rys. 6.73 i 6.74) można wyróżnić kilka cech charakterystycznych dla wszystkich zilustrowanych zależności . Na wyznaczonych rozkładach każdej z analizowanych częstotliwości można wyróżnić trzy charakterystyczne przedziały zmienności, tj.: do 4 m/s, między 4 a 6 m/s oraz powyżej 6 m/s. W pierwszym (do 4 m/s) i trzecim (powyżej 6 m/s) przedziale, w zakresie najmniejszych i największych prędkości wiatru, zmiany poziomu dźwięku są stosunkowo nieznaczne , rzędu kilku decybeli. W drugim przedziale (od 4 do 6 m/s), znajdującym się pośrodku zmierzonych prędkości wiatru, zmiany poziomu dźwięku zachodzą z większą dynamiką. Dodatkowo jest ona ściśle powiązana z daną częstotliwością i zwiększa się wraz ze zmniejszaniem częstotliwości, co najwyraźniej zauważalne jest na wykresie przedstawiającym rozkłady obliczone dla częstotliwości rezonansowych. Inną charakterystyczną cechą jest dużo większa szybkość narastania mierzonych wartości poziomu dźwięku dla zakresu niższych częstotliwości rezonansowych. Najwyraźniej różnicę tą widać przy porównaniu wartości współczynników kierunkowych obliczonych funkcji regresji liniowej. W zakresie częstotliwości różniących się jedynie o kilka herców, jak miało to miejsce zarówno dla częstotliwości rezonansowych jak również medianowych, tempo zmian mierzonych poziomów ciśnienia akustycznego utrzymuje się na bardzo zbliżonym poziomie. Oprócz w/w wspólnych cech charakterystycznych dla obu wykresów, wyróżnić można jeszcze kilka, które odnoszą się jedynie do jednego z nich. Na wykresie przedstawiającym rozkład zmian poziomu dźwięku częstotliwości rezonansowych istotny wydaje się fakt, że im mniejsza częstotliwość tym wcześniej (dla mniejszej prędkości wiatru) zaczyna występować dynamiczny wzrost poziomu hałasu w drugim przedziale zmienności (4-6 m/s). Natomiast na

wykresie przedstawiającym rozkład zmian poziomy dźwięku częstotliwości medianowych warte odnotowania jest prawie całkowite zrównanie się mierzonych poziomów oraz wartości współczynników funkcji regresji liniowej, co wynika z płaskiego przebiegu widma hałasu dla określonych częstotliwości.

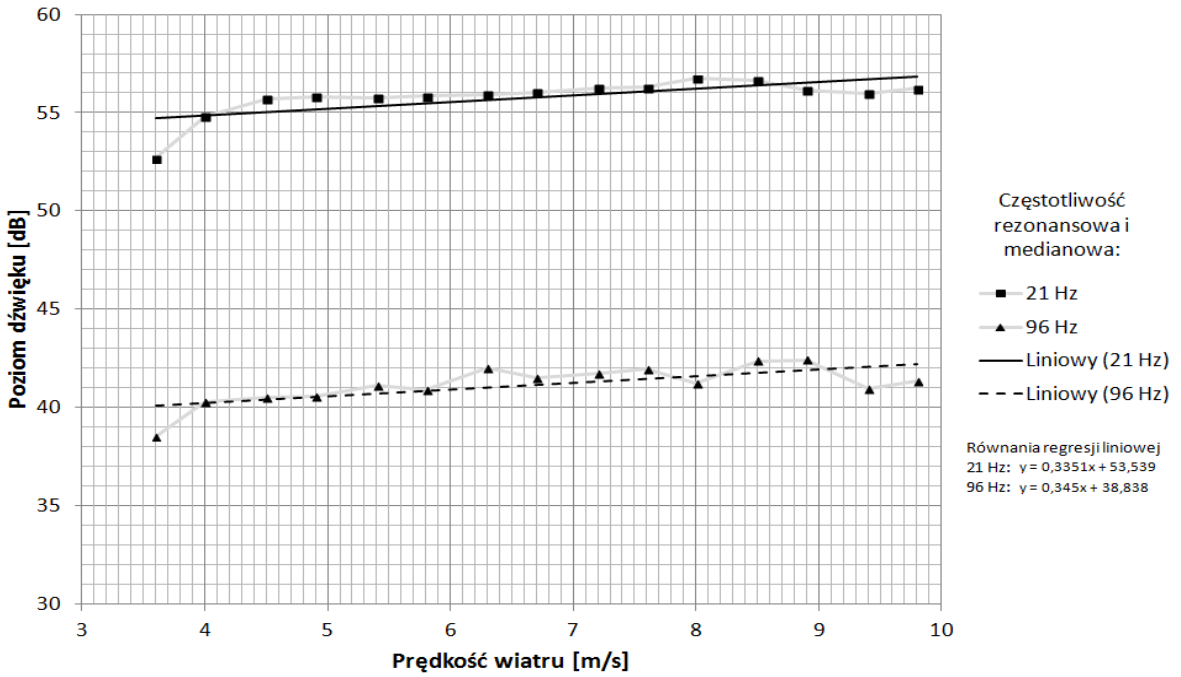
W oparciu o wyniki przeprowadzonych analiz zależności uzyskanych dla turbiny synchronicznej (Rys. 6.75) można stwierdzić, że charakter zmian poziomu dźwięku dla częstotliwości rezonansowej i medianowej jest analogiczny. W przypadku badanej turbiny jedynie przy prędkości wiatru równej 3,6 m/s stwierdzono mniejszy poziom dźwięku, który dla wyższych prędkości skokowo wzrasta i utrzymuje się już na praktycznie stałym poziomie, niezależnie od na prędkości wiatru.



Rys. 6.73 Rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji prędkości wiatru dla wybranych częstotliwości rezonansowych i odpowiadające im przebiegi funkcji regresji liniowej – Turbina T2.



Rys. 6.74 Rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji prędkości wiatru dla wybranych częstotliwości medianowych i odpowiadające im przebiegi funkcji regresji liniowej – Turbina T2.

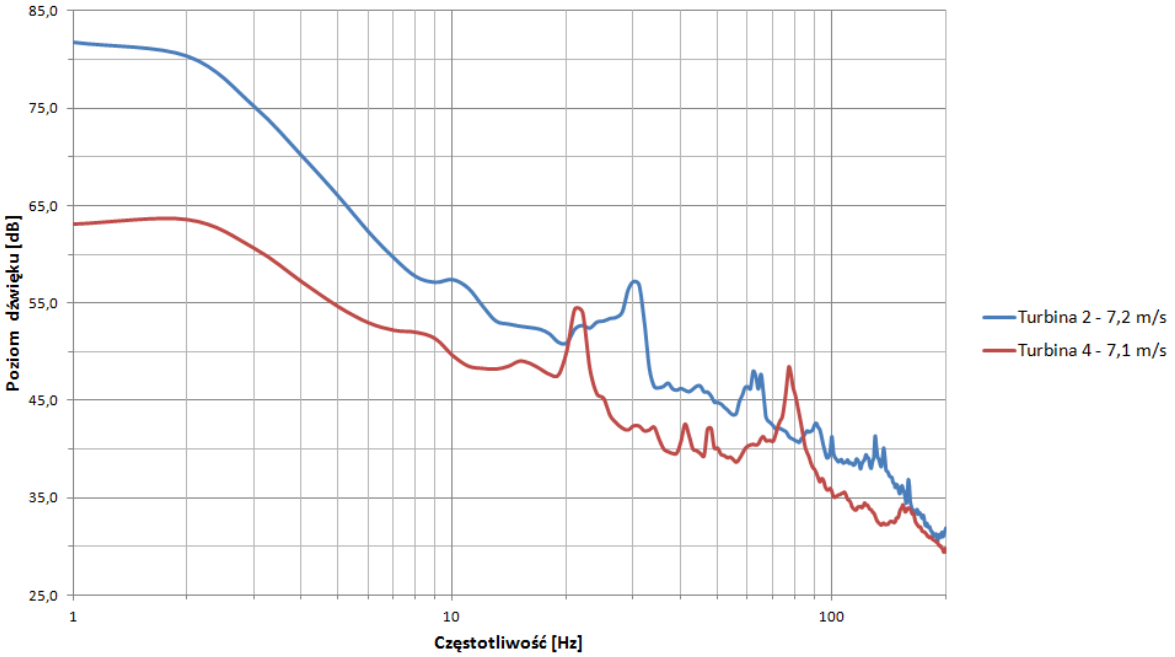


Rys. 6.75 Rozkłady poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji prędkości wiatru dla wybranych częstotliwości rezonansowych i medianowych i odpowiadające im przebiegi funkcji regresji liniowej – Turbina T1.

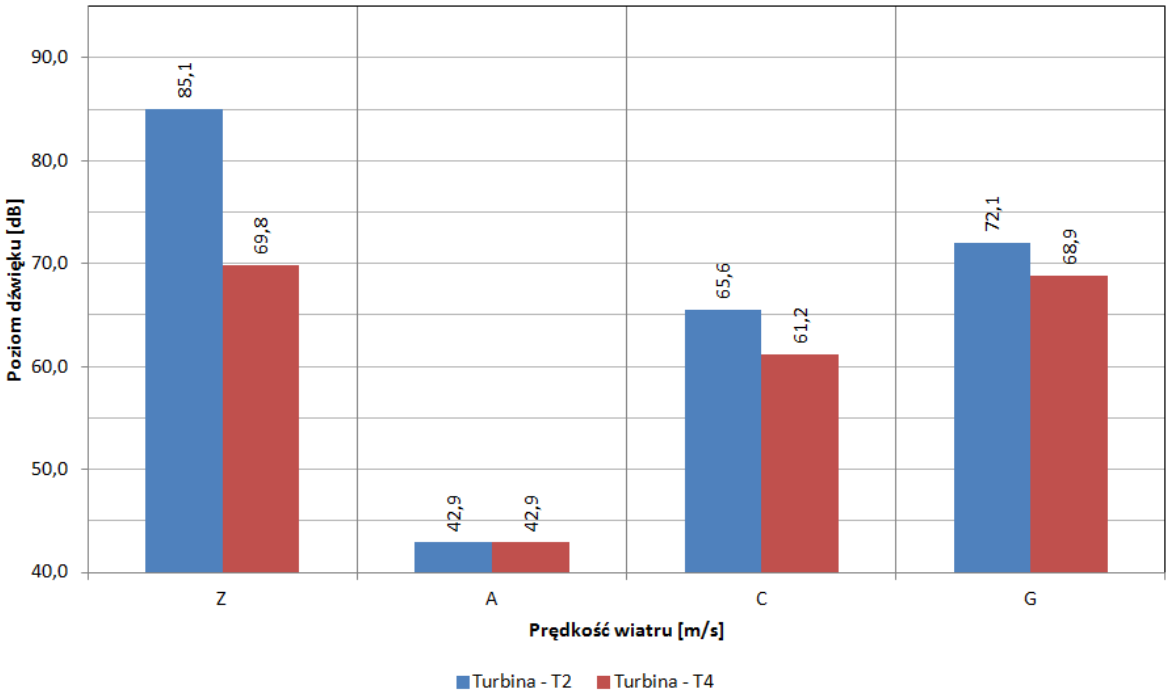
6.8 Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego turbin wiatrowych tego samego typu ale o różnych czasach eksploatacji

Analizę porównawczą poziomów emisji sygnałów infradźwiękowych emitowanych przez turbiny wiatrowe dużych mocy, różniące się czasem eksploatacji, przeprowadzono dla turbin T2 i T4. Są to turbiny o tej samej konstrukcji, które różnią się jedynie wysokością wieży. Turbina T2 umieszczona była na wieży o 20 m niższej, co przy założeniu, że turbinę wiatrową można zastąpić punktowym źródłem hałasu, może przekładać się na 26 dB różnicy w uzyskanych wartościach, ze względu na rozpatrywane odległości. W rzeczywistości wartość ta jest mniejsza i wynika z całej geometrii układu pomiarowego (odległość mikrofonu od wieży, gondoli i rotora). Czas użytkowania turbiny T2 wynosił ponad rok (rozruch: lipiec 2011, pomiar: sierpień 2012), natomiast turbina 4 wchodziła w skład nowo oddanej do eksploatacji farmy wiatrowej działającej niespełna 4 miesiące (rozruch: lipiec 2013, pomiar: listopad 2013).

W celu porównania uzyskanych wyników wyznaczono przebiegi widm amplitudowych dla najbardziej zbliżonych prędkości wiatru oraz zestawiono równoważne poziomy hałasu, będące sumą poziomu hałasu dla poszczególnych częstotliwości i stanowiących jednoliczbową interpretację prezentowanych widm. Na Rys. 6.76 przedstawiono porównanie obliczonych widm , natomiast na Rys. 6.77 zilustrowano zestawienie poziomów równoważnych.



Rys. 6.76 Przebiegi widm amplitudowych poziomu dźwięku w funkcji częstotliwość dla turbin wiatrowych o różnym czasie eksploatacji (T2 –turbina o długim czasie eksploatacji; T4 – turbina fabrycznie nowa)



Rys. 6.77 Zestawienie porównawcze równoważnych poziom hałasu ważonych różnymi krzywymi korekcyjnymi dla turbin wiatrowych o różnym czasie eksploatacji (T2 –turbina o długim czasie eksploatacji; T4 – turbina fabrycznie nowa)

Widmo amplitudowe turbiny T4 praktycznie w całym analizowanym zakresie ma znacząco mniejsze wartości niż widmo turbiny T2. Jedynie dla częstotliwości rezonansowych: 22 i 77 Hz występują większe wartości poziomu dźwięku w porównaniu do widma dla turbiny T2. Wartości częstotliwości rezonansowych wyznaczonych dla obu analizowanych turbin są zbliżone do siebie, przy czym ich kolejność występowania jest różna. W przypadku pierwszej częstotliwości rezonansowej występuje ona najpierw pracy dla turbiny T4, a następnie dla T2. Natomiast w przypadku drugiej częstotliwości rezonansowej, najpierw występuje ona dla turbiny T2, a następnie dla turbiny T4. Przyczyną takiego stanu rzeczy może być różnica w wysokości wież turbin wiatrowych.

Porównanie poziomów równoważnych bez ważenie wyraźnie wskazuje, że większe poziomy infradźwięków występują dla turbiny T2. Po zastosowaniu krzywych ważenia, reprezentujących percepcję hałasu przez człowieka, wyraźnie widać że zmierzone poziomy mają zbliżone wartości. Szczególnie istotne jest zbliżenie się do siebie równoważnych poziomów dźwięku ważonych krzywą G, które reprezentują oddziaływania obu turbin w zakresie częstotliwości infradźwiękowych. Różnica między mierzonymi poziomami wynosi jedynie 3,2 dB, a jej wielkość wynika głównie z częstotliwości rezonansowej turbiny T4, która występuje przy wartości ok. 20 Hz, gdzie ma miejsce maksimum dla krzywej ważenia G.

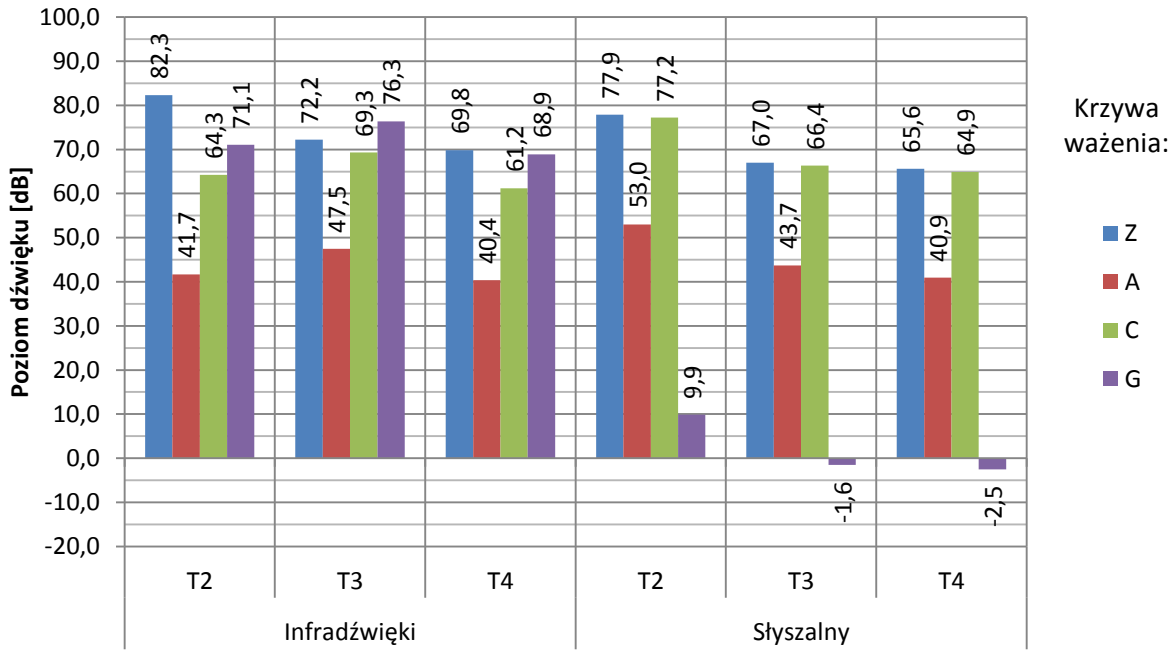
Podsumowując, nowo włączona do użytkowania turbina wiatrowa cechuje się mniejszym poziomem hałasu w zakresie infradźwiękowym, jednak występujące różnice między długo eksploatowaną a fabrycznie nową turbiną nie są na tyle istotne, żeby mówić o jakimś znaczącym pogorszeniu w poziomie emisji dłużej użytkowanych konstrukcji, w szczególności po zastosowaniu krzywej ważenia G, która stanowi odniesienie do oceny uciążliwości infradźwięków dla ludzi. Należy przy tym zauważyć, że okres użytkowania turbiny T2 nie był znacząco długi i w ramach kolejnych badań należałoby przeanalizować porównawczo wyniki uzyskane dla dłuższego czasu pracy.

6.9 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.

Rozkłady czasowo-częstotliwościowe dla pasma infradźwiękowego przedstawione zostały w rozdz. 6.2.5 na Rys. od 6.32 do 6.36. Dla pasma słyszalnego obliczono analogiczne rozkłady, przy użyciu takiej samej metody (przekształcenie STFT). Jedyna wprowadzona zmiana dotyczyła zastosowanej rozdzielczości częstotliwościowej podczas analizy z wykorzystaniem FFT dla pasma słyszalnego wynosiła 200 Hz. Otrzymane wynik przedstawiono odpowiednio na Rys. 6.81, 6.82 i 6.83. Zestawienie jednoliczbowych wartości poziomu dźwięku wyznaczonych dla różnych krzywych ważenia oraz bez ważenia dla pasma infra i słyszalnego przedstawiono na Rys. 6.78.

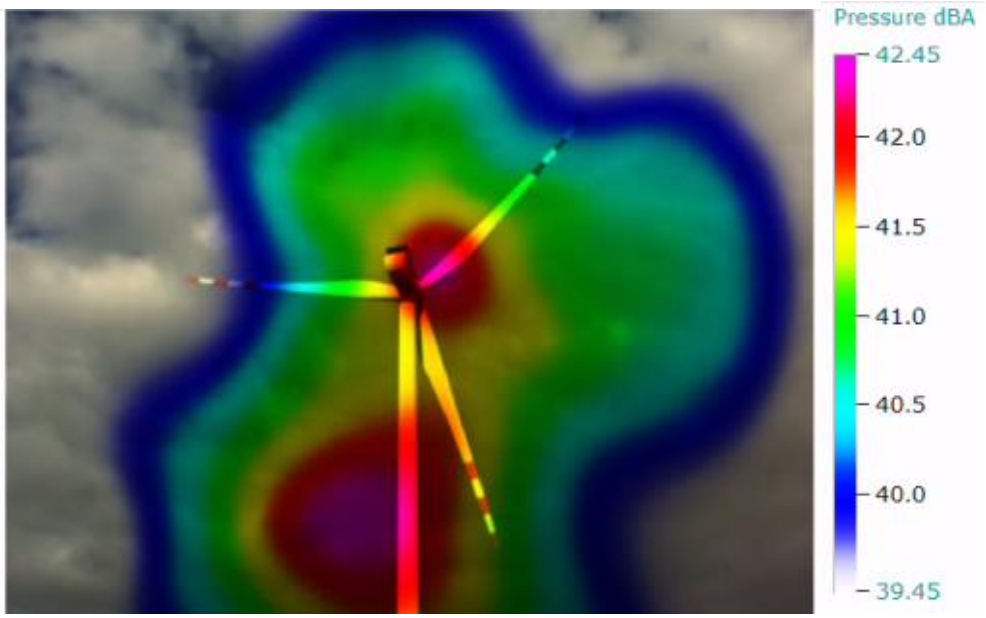
Na przedstawionym wykresie (Rys. 6.78) można zauważyć, że poziom dźwięku bez ważenia, dla wszystkich trzech turbin, osiąga większe wartości w paśmie niskich i infradźwiękowych częstotliwości. Świadczy to o występowaniu w tych zakresach największej energii sygnału, co wynika ze stosunkowo słabego tłumienia tych składowych przez środowisko propagacji. Różnice między wynikami ważonymi krzywymi A i C wynikają jedynie z występowania w paśmie słyszalnym istotnych składowych tła oraz pracy samej turbiny. Ważenie wyniku pomiaru krzywą G wyraźnie filtruje wyższe składowe widma i pozwala zawęzić pasmo analizy jedynie do składowych infradźwiękowych, co ułatwia późniejszą interpretację wyników. Do oceny hałasu w zakresie niskich częstotliwości od 20 do 200 Hz można wykorzystać różnicę przebiegów krzywych ważenia A i C w tym zakresie. Im mniejsza jest różnica pomiędzy poziomami ważonymi krzywą A i C, tym mniej składowych niskoczęstotliwościowych występuje w badanym sygnale. W rozpatrywanych widmach różnica ta jest znacząca, dlatego jednoznacznie można stwierdzić występowanie składowych niskoczęstotliwościowych w badanych sygnałach.



Rys. 6.78 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 przyjścia fali akustycznej do punktu pomiarowego w postaci mapy akustycznej nałożonej na zdjęcie fotograficzne badanego obiektu.

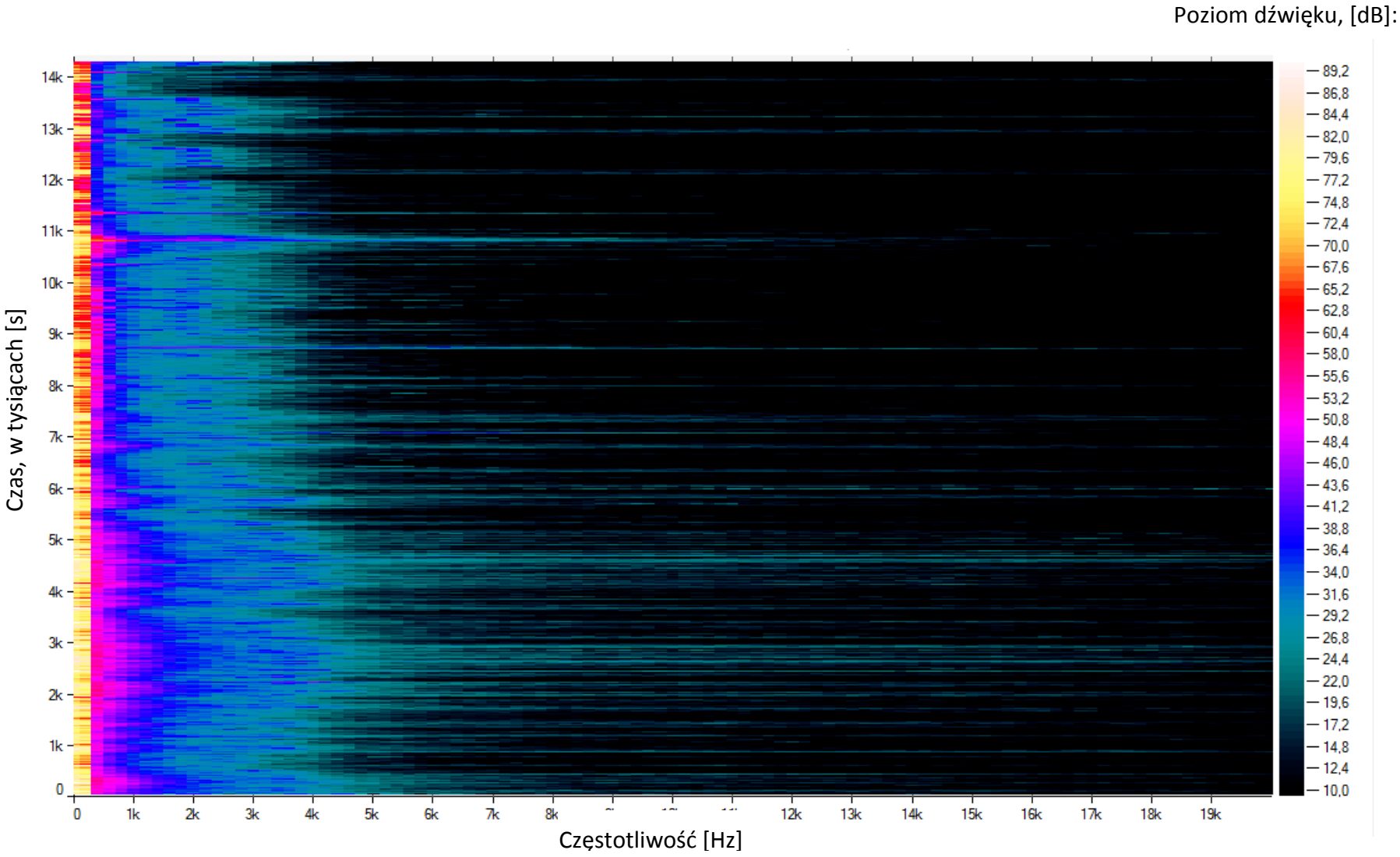
Do pomiarów użyto kamery akustycznej firmy GFAI z matrycą mikrofonową złożoną z 48 mikrofonu rozłożonych na powierzchni o średnicy 3,4 m. Zakres dymniki mierzonych przez kamerę sygnałów wynosił od 35 do 130 dB, a zakres częstotliwościowy od 100 Hz do 13 kHz. Do badań hałasu emitowanego z turbinę wiatrową wykorzystano matrycę gwiaździstą, 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. 6.79. Na rys. 6.80 przedstawiono widok kamery akustycznej przeprowadzającej badanie hałasu turbiny wiatrowej



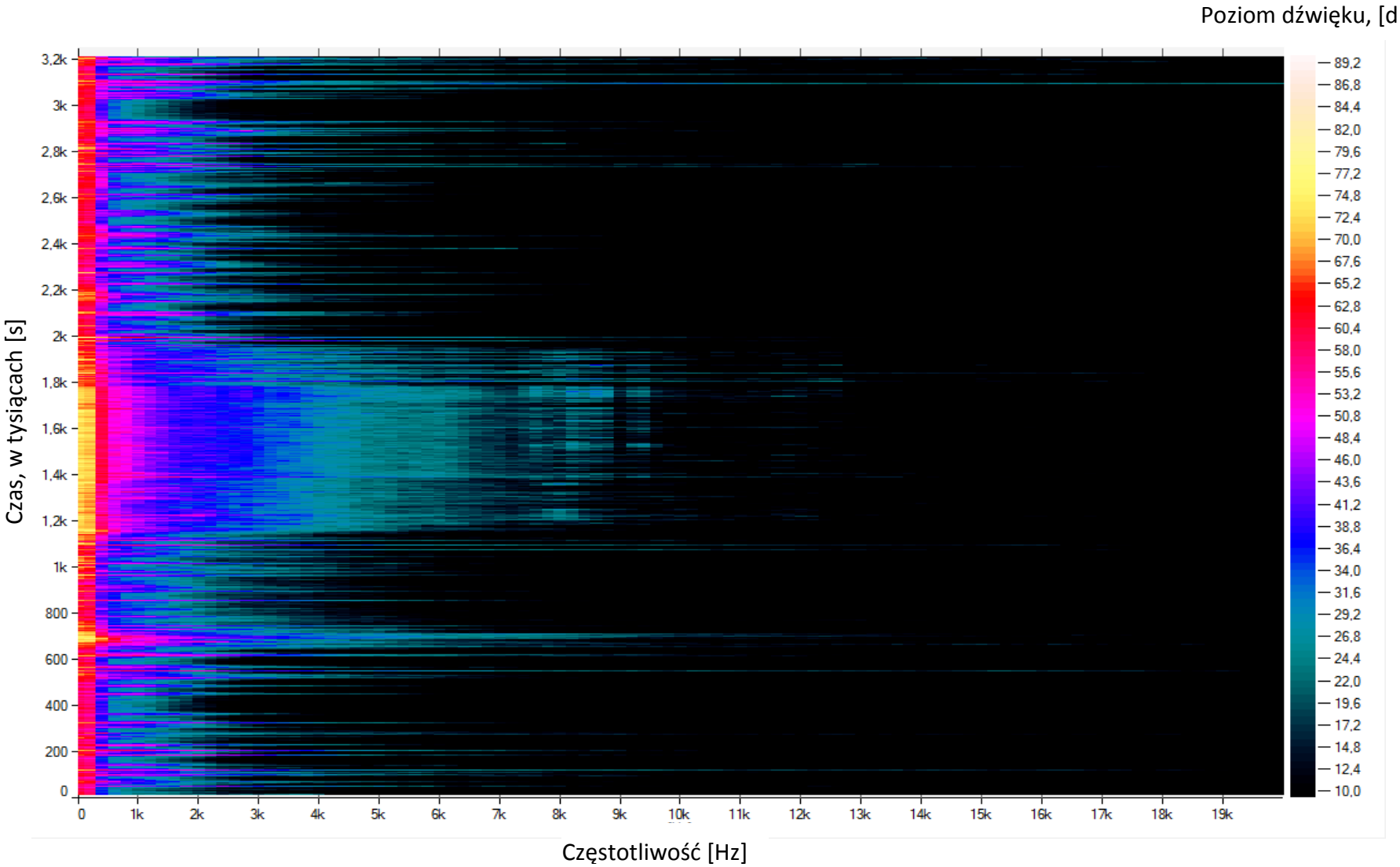
Rys. 6.79 Zdjęcie akustyczne obrazujące miejsce powstawania fali akustycznej podczas pracy turbiny wiatrowej

Rys. 6.80 Zdjęcie przedstawiające kamerę akustyczną podczas pomiarów

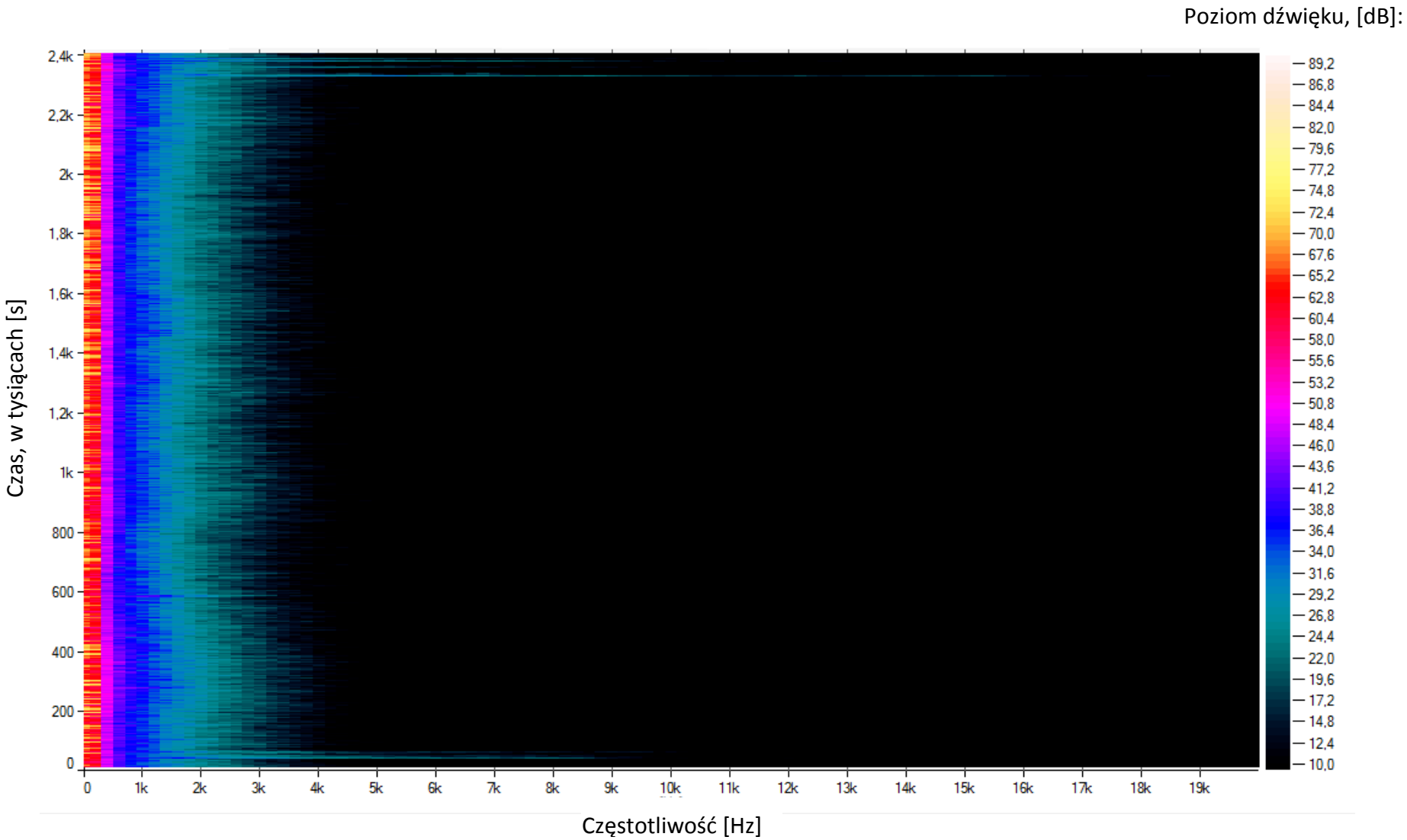
Na przedstawionym zdjęciu akustycznym wyraźnie można wskazać dwa miejsca emisji fali dźwiękowej. Pierwszym jest gondola turbiny wiatrowej, w której pracują urządzenia mechaniczne odpowiedzialne za produkcję przetwarzanie energii kinetycznej wiatru w energię elektryczną . W miejscu obserwacji poziom hałasu od tych urządzeń wynosił k. 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.



Rys. 6.81 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych w paśmie słyszalnym sygnałów generowanych przez turbinę T2



Rys. 6.82 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych w paśmie słyszalnym sygnałów generowanych przez turbinę T3



Rys. 6.83 Rozkład czasowo-częstotliwościowy zarejestrowanych w paśmie słyszalnym sygnałów generowanych przez turbinę T4

7 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 punktowego 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 [129]. 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 wynik 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.

Norma PN-ISO 9613-2 wykorzystując istniejący stan wiedzy, jako pierwsza, uporządkowała i określiła jednolite zasady prognozowania poziomu dźwięku rozchodzącego się w przestrzeni otwartej od źródła o znanym poziomie mocy akustycznej. Należy podkreślić, że metoda obliczeniowa PN-ISO 9613-2 jest metodą inżynierską. Rozpatruje ona punktowe źródło dźwięku i zbiory źródeł punktowych, dlatego źródła liniowe i powierzchniowe zamieniane są na adekwatny zbiór źródeł punktowych o znanym poziomie mocy akustycznej. Metoda ta wprowadza wskaźnik ekwiwalentnego poziomu dźwięku A dla warunków

korzystnej propagacji L_{AT}(DW). Przy czym obliczenia wykonywane są dla pasm oktawowych o częstotliwościach środkowych w zakresie od 63 Hz do 8 kHz - L_{fT}(DW). Za korzystną propagację uznaje ona propagację „z wiatrem”, przez którą rozumie się:

- kierunek wiatru zwierający się wewnątrz kąta ± 45^0 względem prostej przechodzącej przez środek dominującego źródła dźwięku i środek określonego obszaru odbioru, przy wietrze od źródła do punktu odbioru,
- prędkość, wiatru zmierzona na wysokości od 3 m do 11 m ponad gruntem, która wynosi w przybliżeniu od 1 m/s do 5 m/s,
- dopuszczalne są także warunki wyraźnie wykształconej, umiarkowanej inwersji temperatury przy gruncie, jaka zwykle wystepuje podczas bezchmurnej i bezwietrznej nocy [138].

Równoważny poziom ciśnienia w paśmie oktawowym w punkcie odbioru dla propagacji z wiatrem L_{fT}(DW) można obliczyć przy wykorzystaniu zależności (7.1).

$$L_{fT}(DW) = L_W + D_C - A, \qquad (7.1)[138]$$

gdzie:

L_w – poziom mocy akustycznej punktowego źródła dźwięku w paśmie oktawowym, [dB],

D_C – poprawka wynikająca z kierunkowości, [dB],

A – tłumienie w pasmach oktawowych, [dB], występujące podczas propagacji od punktowego źródła dźwięku do punktu odbioru.

W metodzie tej wykorzystywane są algorytmy umożliwiające obliczenie wielkości tłumienia dla następujących zjawisk:

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

Wszystkie powyższe tłumienia określone są dla korzystnych warunków propagacji, czyli zwiększonej imisji poziomu hałasu.

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 wykonami w terenie [].

Do wyznaczania rozkładów przestrzennych akustycznych sygnałów niskiej częstotliwości generowanych przez turbiny wiatrowe w chwili obecnej można wykorzystywać jest praktycznie tylko jedną metodę obliczeniową, która została opracowana w Danii oparciu normę PN-ISO 9613-2. Metodę tą wprowadziło Duńskie Ministerstwo Środowisko 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 [139].

Założeniem duńskiej metody jest wykonanie pomiarów poziomu mocy akustycznej w zakresie od 10 o 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. Poziom ciśnienia akustycznego w punkcie odbioru opisuje zależność (7.2) [139]:

$$L_{pALF} = L_{WA,ref} - 10 \cdot \log\left(l^2 + h^2\right) - 11 + \Delta L_{gLF} - \Delta L_{\sigma} - \Delta L_a , \qquad (7.2)$$

gdzie:

$L_{WA,ref}$ – poziom mocy akustycznej turbiny wiatrowej, [dB],

l – odległość punktu odbioru od miejsca posadowienia turbiny [m],

h – wysokość wieży [m],

ΔL_{gLF} – tłumienie w zakresie niskich częstotliwości przez grunt,

ΔL_σ – izolacyjność ścian w zakresie niskich częstotliwości,

ΔL_a – tłumienie w zakresie niskich częstotliwości przez powietrze.

Wielkości poszczególnych tłumień określone zostały w pasmach tercjowych i zebrane w formie tabeli 7.1.

Tabela 7.1 Współczynniki tłumienia określone w duńskiej metodyce oceny hałasu niskoczęstotliwościowego.

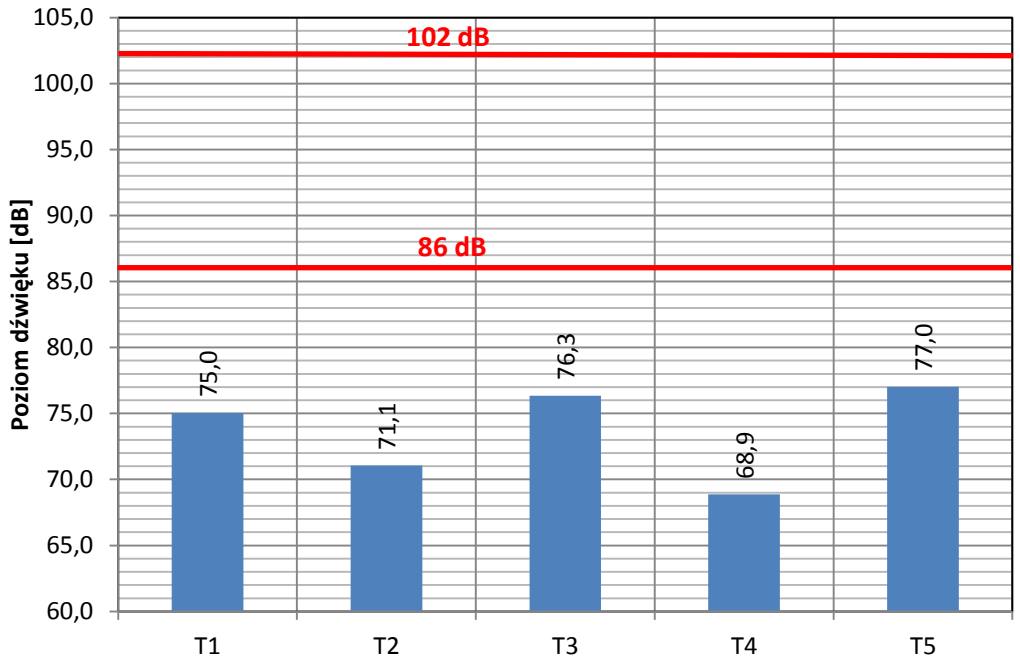
Tercje [Hz]	ΔL_{gLF} – turbiny na lądzie [dB]	ΔL_{gLF} – turbiny na morzu [dB]	ΔL_σ [dB]	ΔL_a [dB/km]
10	6,0	6,0	4,9	0,0
12,5	6,0	6,0	5,9	0,0
16	5,8	6,0	4,6	0,0
20	5,6	6,0	6,6	0,0
25	5,4	6,0	8,4	0,02
31,5	5,2	5,9	10,8	0,03
40	5,0	5,9	11,4	0,05
50	4,7	5,8	13,0	0,07
63	4,3	5,7	16,6	0,11
80	3,7	5,5	19,7	0,17
100	3,0	5,2	21,2	0,26
125	1,8	4,7	20,2	0,38
160	0,0	4,0	21,2	0,55

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.

8 Ocena uzyskanych wyników pod kątem obowiązujących prawnie wartości kryterialnych

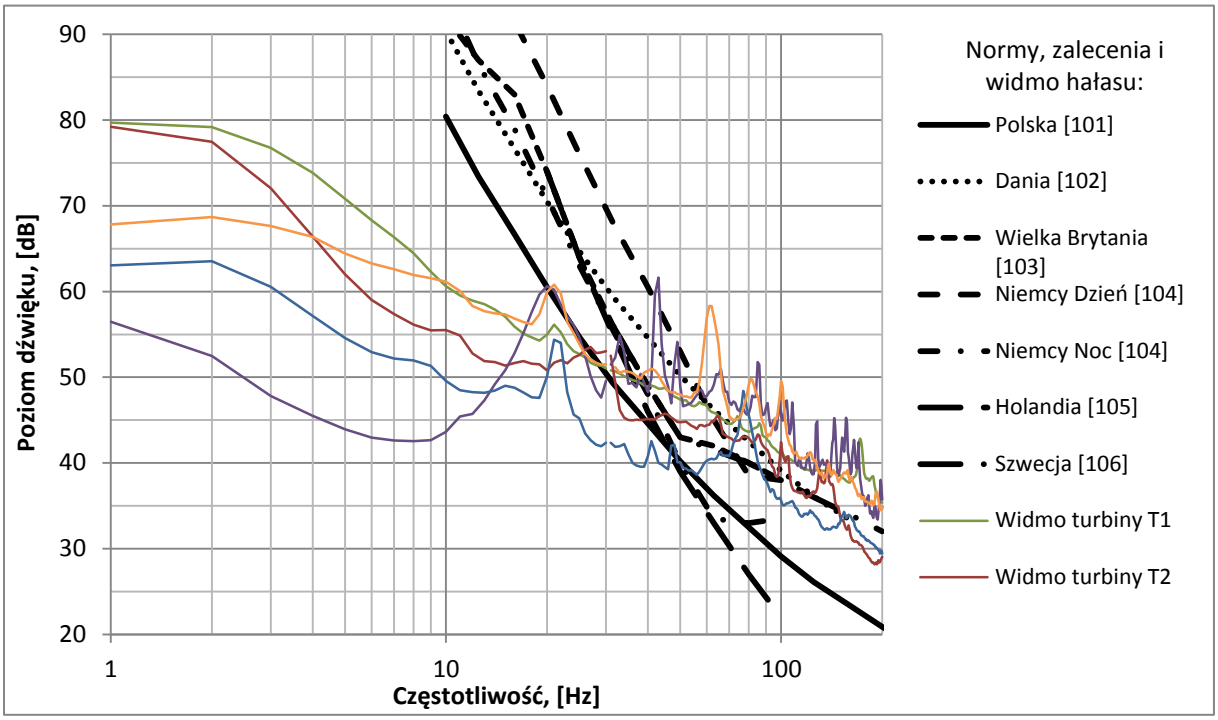
Szczegółowy przegląd przepisów prawnych dotyczących oceny szkodliwości hałasu infradźwiękowego przedstawiono w rozdz. 3.7 niniejszej pracy. W Polsce kwestia hałasu infradźwiękowego w środowisku zewnętrznym nie jest regulowana żadnymi przepisami prawa. W chwili obecnej, jedynymi przepisami regulującymi 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 warzonych krzywą G badanych turbin wraz z zaznaczeniem dopuszczalnych poziomów przedstawiono na Rys. 8.1. Mają na uwadze fakt, że zmierzone poziomy zarejestrowano w bezpośrednim sąsiedztwie badanych turbin, poziom dźwięku warzony 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. 8.1 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 [101], które definiują kryteria oparte na progach słyszenia. Ich zestawienie w porównaniu do analogicznych wytycznych obowiązujących w innych krajach przedstawiono w tabeli 3.8. w rozdz. 3.7 W ramach przeprowadzonej oceny porównano przedstawione w tabeli krzywe oceny z zmierzonym widmowym rozkładem poziomu hałasu. Zestawienie to przedstawiono na Rys. 8.2. 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. 8.2 Widma amplitudowe badanych turbin wiatrowych na tle krzywych ocen uciążliwości z różnych krajów. Opracowanie własne na podstawie [25]

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.

9 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]. 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]

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 9.1.

Tabela 9.1 Zalecenia dotyczące metodyki wykonywania pomiarów infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe

Element metodyki pomiarowej	Zalecenie	Uwagi / Komentarz
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. 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 przejazdy 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 Poziom dźwięku bez ważenia (widmo amplitudowe) Różnica między poziomem dźwięku ważonym krzywą A i C	Do ogólnej oceny uciążliwości wystarczający jest równoważny poziomy dźwięku ważony krzywą G. 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.

10 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 dużych 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 warzony 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 określenie 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 harmonicznych, 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.

11 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 dobranego 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 przestrzenni 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 umożliwiłby 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 Pomiary Automatyka Kontrola, Warszawa, 2008.

2 http://www.wwindea.org/hyr2015/ [dostęp październik 2015 r.].

3 BP Statistical Review of World Energy June 2015; http://www.bp.com/statisticalreview [dostęp październik 2015].

4 Wind in power: 2014 European statistics, European Wind Energy Association, http://www.ewea.org/statistics/european/, [dostęp październik 2015 r.].

5 Wegner S., Bareiss R., Guidati G., Wind Turbine Noise, Springer, Berlin, 1996.

6 PN-EN 61400-11:2002 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu.

7 PN-EN 61400-11:2004/A1 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu

8 Malec T,: Hałas infradźwiękowy i sposoby oceny jego uciążliwości, Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, nr 342, Elektryka z. 66, 2011, str. 51-52.

9 http://www.gumienny.edu.pl/projekty/energia_odnawialna/elektrownie%20wiatrowe.pdf [dostęp: czerwiec 2015].

10 http://www.eceo.org.pl [dostęp: czerwiec 2015].

11 Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P., Piechocki J., Bogacz P. „Poradnik małej energetyki wiatrowej poradnik małej energetyki wiatrowej", Olsztyn, 2011 na stronie: [http://www.wmae.pl/userfiles/file/Aktualnosci/poradnik_a5.pdf] [dostęp czerwiec 2012].

12 „Small Wind World Report", Published by World Wind Energy Association, Boon, Germany, 2014.

13 http://www.gumienny.edu.pl/projekty/energia_odnawialna/elektrownie%20wiatrowe.pdf [dostęp lipiec 2012].

14 http://www.wmae.pl/userfiles/file/Aktualnosci/poradnik_a5.pdf [dostęp maj 2012].

15 http://www.zielonaenergia.eco.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=196:turbiny-wiatrowe-duej-mocy&catid=48:wiatr&Itemid=205 [dostęp kwiecień 2012].

16 „Small Wind World Report", Published by World Wind Energy Association, Boon, Germany, 2014

17 nop.ciop.pl [dostęp: czerwiec 2015].

18 IEC 60050-501:1994 International Electrotechnical Vocabulary – Chapter 801: Acoustics and electroacoustics.

19 EFP-06 project: Low Frequency Noise from Large Wind Turbines, Summary and Conclusions on Measurements and Methods, DELTA Acoustics & Electronics, 2008.

20 Moore B. C. J., Wprowadzenie do psychologii słyszenia. Warszawa, PWN, 1999, str. 66–73.

21 http://www.lowertheboom.org/trice/infrasound.htm [dostęp listopad 2008].

22 M. Garces, M. Willis, Modeling and Characterization of Microbarom Signals in the Pacific. Storming Media, 2006.

23 Garces M., Hetzer C., Merrifield M., Willis M. i inni., Observations of surf infrasound in Hawai'i. Geophysical Research Letters. 24, 2264 (30), 2003.

24 Microbaroms, University of Alaska Fairbanks, Geophysical Institute, Infrasound Research Group, http://www2.gi.alaska.edu/infrasound/Infrasound254.htm [dostęp 22 listopada 2007].

25 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.

26 Stepanow V., Biological effects of low frequency acoustic oscillations and their hygienic regulation. Final report, State Research Center, Moskwa, 2001.

27 Berglund B., Hassmen P., Job R.F., Sources and effects of low-frequency noise. J. Acoust Soc. Am. 99(5), 1996.

28 Bedard A. J., George T. M., Atmospheric infrasound. Physics Today 53(3), 2000, pp. 32–37.

29 Leventhall G. What is infrasound? Progress in Biophysics and Molecular Biology 93, 2007, pp. 130–137.

30 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].

31 Chen C.H., Signal and Image Processing for Remote Sensing, CRC Press, 2007.

32 Takahashi Y. i in., An infrasonic experiment for industrial hygiene. Industrial Heath 35, 1997, pp. 480–488.

33 Tempest W., Bryan M.E., Low frequency noise measurement in vehicles. Applied Acoustics 5, 1972.

34 Kaczmarska A., Augustyńska D., Ograniczenie hałasu niskoczęstotliwościowego w kabinach przemysłowych. Warszawa, CIOP, 1999.

35 Kaczmarska A., Augustyńska D., Wierzejski A., Hałas infradźwiękowy na stanowiskach pracy kierowców. Bezpieczeństwo Pracy, nr 10, 2006, str. 6–7.

36 http://www.abc.com.pl/problem/945/8: Edward Kołodziejczyk „Hałas w środowisku pracy" [dostęp październik 2008].

37 http://www.halas.wortale.net/art.php?art=105 [dostęp październik 2008].

38 http://www.marlewo.pl/zagrozenia.html [dostęp październik 2008].

39 http://www.opracowania.info/readarticle.php?article_id=4657 [dostęp październik 2008].

40 http://www.echostar.pl/~remus/pwsz/pbwa/halaswpracy [dostęp październik 2008].

41 http://www.echostar.pl/~remus/pwsz/pbwa/halaswpracy [dostęp październik 2008].

42 http://www.portal-ekologia.pl/ekologia/stezenia-natezenia-czynnikow-szkodliwych/halas-infradzwiekowy-halas-ultradzwiekowy/ [dostęp październik 2008].

43 http://www.borderlands.com/newstuff/research/infra.htm [dostęp październik 2008].

44 Cocchi, A., Fausti, P., and Piva, S.: Experimental characteristics of the low frequency noise annoyance arising from industrial plants. Journal Low Frequency Noise Vibration 11, 1992, pp. 124-132.

45 Nakamura, N., and Inukai, Y. : Proposal of models which indicate unpleasantness of low frequency noise using exploratory factor analysis and structural covariance analysis, Journal Low Frequency Noise Vibration 17, 1998, pp. 127-132.

46 Berglund B., Hassmén P., Job S.: Sources and effects of low-frequency noise, The Journal of the Acoustical Society of America, vol. 99, 1996, pp. 2985-3002.

47 Holmberg, K., Landstrom, U., Kjellberg, A. : Effects of ventilation noise due to frequency characterisitics and sound level. Journal Low Frequency Noise Vibration 12, 1993, pp. 115-122.

48 Koradecka D., Augustyńska D., Pośniak M. i inni „Opracowanie zasad monitorowania stanu narażenia na czynniki szkodliwe i uciążliwe w środowisku pracy spełniających standardy obowiązujące w krajach UE w ramach działalności Europejskiej Fundacji na rzecz Poprawy Warunków Życia i Pracy. Zadanie 6.4, program wieloletni pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów Unii Europejskiej", etap II, CIOP-PIB 2003.

49 Pawlaczyk-Łuszczyńska M., Augustyńska D., Kaczmarska A. Hałas infradźwiękowy. Procedura pomiarowa. Dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego. „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy", Rok XVII zeszyt nr 2(28), 2001.

50 http://www.djgrean.type.pl/dzwiek/infradzwieki.htm [dostęp październik 2008].

51 http://www.szczecinek.gawex.pl/binczak/173.htm [dostęp październik 2008].

52 Brüel, P.: ISO Working Group Work for Infrasound and Ultrasound with particular Relation to Determination of Standards and Limitations for Working Environments, FANAK B 1/AK 1 Nr. 2-79.

53 Kjellberg, A.; Tesarz, M.; Landström, U.; Holmberg, K.: Subjective Response Patterns Related to Low Frequency Noise; Proceedings of the 8th International Meeting on Low Frequency Noise & Vibration; Göteborg, June 1997.

54 Kalveram, K. T. : How acoustical noise can cause physiological and psychological reactions. 5th International Symposium Transport Noise and Vibration. June 2000, St. Petersburg, Russia.

55 A. J. Bedard Jr and T. M. Georges, Atmosspheric Infrasound, Physiscs Today, 53(3), March 2000, pp. 32-37.

56 FHWA – Final Report Wy-09/02f, Practical Operational Implementation Of Teton Pass Avalanche Monitoring Infrasound System, www.dot.state.wy.us/files/.../RS06206_0902F.pdf [dostęp czerwiec 2014].

57 Tempest W., Infrasound and Low Frequency Vibration, Academic Press London 1976.

58 Bogusz B., Renowski J., Infradźwięki, Prac Naukowe Instytutu Telekomunikacji i Akustyki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1979.

59 Report of the International Colloquium on Infrasound, Paris, 1973.

60 Moller H., Pedersen C.S., Hearing at low and infrasonic frequencies. Noise and Health 6(23), 2004, pp. 37–57.

61 Mohr G.C. i in., Effects of low frequency and infrasonic noise on man. Aerospace Medicine 36(9), 1965, pp. 817–824.

62 Kaczmarska A., Augustyńska D., Wierzejski A, Hałas infradźwiękowy na stanowiskach pracy kierowców, Bezpieczeństwo Pracy CIOP, 10/2006.

63 Kaczmarska A., Augustyńska D., Wierzejski A, Hałas infradźwiękowy na stanowiskach pracy kierowców w warunkach eksperymentalnych, Bezpieczeństwo Pracy CIOP, 7-8/2007.

64 Kaczmarska A., Augustyńska D., Łuczak A., Hałas Infradźwiękowy na stanowiskach pracy wymagających koncentracji, Bezpieczeństwo Pracy, CIOP 7-8/2008.

65 Yeowart N.S., Bryan M.E., Tempest W., Low frequency noise thresholds. J. of Sound and Vibration 9, 1967, pp. 447–453.

66 Moller H., Pedersen C.S., Hearing at low and infrasonic frequencies. Noise and Health 6(23), 2004, pp. 37–57.

67 Johnson D.L., The effects of high level infrasound. Proceed of Conference on Low Frequency. Noise, Moller H. &Rubak P Aaalbork, 1980, pp.1–14.

68 Watanabe T., Moller H. (1990) Low frequency hearing threshold in pressure and in free field. J. of Low Frequency Noise and Vibration 9(3), 106–115

69 ISO 226:2003, Acoustics -Normal equal-loudness-level contours.

70 Dobrucki A., Bogusz B., Oddziaływanie infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe na zdrowie człowieka, Raport nr I-28/11/S-070, Politechnika Wrocławska, 2011 r.

71 Van der Berg M., Passhier-Vermeer W., Assessment of low frequency noise complaints. Proceed. Inter. Noise, Fort Lauderdale, 1999.

72 Watanabe T., Moller H., Low frequency hearing threshold in pressure and in free field. J. of Low Frequency Noise and Vibration 9(3), 1990, pp. 106–115.

73 Berglund B., Lindvall T., Schwela D.H., Guidelines for community noise, DMS/WHO 94, Genewa,1999.

74 Mohr G.C. i in., Effects of low frequency and infrasonic noise on man. Aerospace Medi-cine 36(9), 1965, pp. 817–824.

75 Johnson D.L., Hearing hazards associated with infrasound. New perspectives on noise-induced hearing. Loss New York, Raven Press, 1982, pp. 407–421.

76 Evans M.J., Tempest W., Some effects of infrasonic noise in transportation. J. Sound and Vibration 22(1), 1972, pp. 19–24.

77 Takahashi Y. i in., A pilot study on the human body vibration induced by low frequency noise. Industrial Health 37, 1999, pp. 28–35.

78 Altmann J., Acoustic weapons. A prospective assessment. Science & Global Security 9, 2001, pp. 165–234.

79 Mirowska M., An investigation and assessment of annoyance of low frequency noise in dwellings. Noise Notes vol. 1, 1, 2002, pp. 30–34.

80 Pawlaczyk-Łuszczyńska M. i in., Assessment of annoyance from low frequency and broadband noise. Int. J. Occupal. Med. Environe Health 16, 4, 2003, pp. 337–343.

81 Pawlaczyk-Łuszczyńska M. i in., Hałas infradźwiękowy. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2(28), 2001, str. 5–45.

82 Bengtsson J., Low frequency noise during work – effects on performance and annoyance. Thesis Goteborg University, 2003.

83 Waye K.P., Adverse effects of moderate levels of low frequency noise in the occupational environment ASHRAE Transaction 111, Career and Technical Education, 2005, pp. 672–683.

84 Holmberg K. i in., Hygienic assessment of low frequency noise annoyance in working environemnts. J. Low Freq. Noise Vibr. 15,1, 1996, pp. 7–15.

85 Borredon P., Physiological effects of infrasounds in our everyday environment. Proceedings of the Conference on Low frequency Noise and hearing. Alborg University Press: 61-76, 1980.

86 Castelo Branco N.A., Rodriquez E., The vibroacoustic disease an emerging pathology. Aviat Space Environ Med. 70(3 Pt 2), 1999, A1-6.

87 Alves-Pereira M., Noise-induced extra-aural pathology: a review and commentary. Aviat. Space Environ. Med. 70(3 Pt 2), 1999, A721.

88 WHO, World Health Organization (1980) Environmental Health Criteria 12 – Noise.

89 Babisch W., Health effects related to stress mechanisms – cardiovascular effects. [W:] WHO, Report on the second meeting on night noise guidelines. Geneve 2004, pp. 9–10.

90 Griefahn B., Noise-induced extraaural effects. Acoustical Science and Technology 21, 6, 2000, pp. 307–317.

91 Wagner, S., Bareib, R. and Guidati, G., Wind Turbine Noise, Springer, Berlin, 1996.

92 http://clf/org/orginal [dostęp czerwiec 2009].

93 mstudioblackboard.tudelft.nl [dostęp czerwiec 2009].

94 Guidati G., Bareiß R., and Wagner S., An investigation of blade-towerinteractionnoise (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.

95 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.

96 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.

97 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.

98 Augustyńska D., Wartości graniczne ekspozycji na infradźwięki – przegląd piśmiennictwa, Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy, nr 2(60), 2009, ss. 5–15.

99 PN-Z 01338:2010, Akustyka -- Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.

100 Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej *w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia* (Dz. U. 2002 nr 217 poz. 1833).

101 Mirowska M., An investigation and assessment of annoyance of low frequency noise in dwellings. Noise Notes vol. 1, 1, 2002, pp. 30–34.

102 Jakobsen J., Danish guidelines on environmental low frequency noise, infrasound and vibration, Journal of Low Frequency Noise. Vibration and Active Control. (20)3, 2001, pp. 141–148.

103 DEFRA Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance, 2005.

104 DIN 45680; 1997, Measurement and assessment of low-frequency noise imissions.

105 NSG (1999) Richtlijn Laagfrequent geluid, Delft.

106 Buller inomhus - SOSFS 1996:7.

107 Statutory Order on Noise from Wind Turbines; Statutory Order no. 1284 of 15. December 2011 (in Danish. English translation can be seen AT http://www.mst.dk/NR/rdonlyres/E8562E10-2B2D-4BF3-BAE0-A265C5A0B86E/0/engelsk_vindmoellebekendtgoerelse.pdf). [dostęp sierpień 2015].

108 http://nop.ciop.pl/). [dostęp sierpień 2015].

109 Hubbard H. H. and Shepherd K. P., Aeroacoustics of large wind turbines," J. Acoust. Soc. Am. 89(6), 1991, pp. 2495–2508.

110 Shepherd K. P. and Hubbard H. H., Physical characteristics and perception of low frequency noise from wind turbines, Noise Control Eng. J. 36(1), 1991, pp. 5–15.

111 Guidati G., Bareiß R., and Wagner S., An investigation of blade-tower interaction noise (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.

112 Betke K., Schultz-von Glahn M., Goos O., and Remmers H., Messung der Infraschallabstrahlung von Windkraftanlagen (Measurement infrasound emission from wind turbines), in Proceeding of DEWEK '96. 3rd German Wind Power Conference Wilhelmshaven, Germany, 1996, pp. 207–210.

113 Betke K. and Remmers H., Messung und Bewertung von Tieffrequentem Schall," (Measurement and assessment of low-frequency sound), Fortschr. Akustik, DAGA 1998, pp. 472–473.

114 Jakobsen J., Infrasound emission from wind turbines," J. Low Freq. Noise, Vib., Act. Control 24(3), 2005, pp. 145–155.

115 Lavfrekvent støj, infralyd og vibrationer i eksternt miljø (Low Frequency Noise, Infrasound and Vibrations in the External Environment), Orientering fra Miljøstyrelsen, nr. 9 (Danish Environmental Protection Agency, 1997).

116 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.

117 G. P. van den Berg, Do wind turbines produce significant low frequency sound levels, 11th Int. Meeting on Low. Frequency Noise Vib. its Control., Maastricht, The Netherlands, 2004.

118 Pedersen C. S., Møller H., Vurdering af lavfrekvent støj og infralyd fradecentrale el-elproducerende anlæg (Assessment of Low-Frequency Noise and Infrasound from Local Electricity-Producing Plants) (Department of Acoustics, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 2005).

119 "The measurement of low frequency noise at three UK wind farms,' Hayes McKenzie Partnership, Ltd., for Department Trade Industri (DTI), Contract No. W/45/00656/00/00, URN No. 06/1412, UK, 2006.

120 Moorhouse A., Waddington D., and Adams M., Proposed criteria for the assessment of low frequency noise disturbance," Project Rep. DEFRA NANR45, University of Salford, 2005.

121 Moorhouse A., Waddington D., Adams M., Procedure for the assessment of low frequency noise complaints," Project Rep. DEFRA NANR45, University of Salford, 2005.

122 Gastmeier W. J., Howe B., Recent studies of infrasound from industrial sources," Can. Acoust. 36(3), 2008, pp. 58–59.

123 Ramakrishnan R., Characteristics of wind turbine noise, Can. Acoust. 3, 2009, pp. 122–123.

124 Harrison J. P., Inadequacy of wind turbine noise regulations and their application," Can. Acoust. 37(3), 2009, pp. 156–157.

125 Karta specyfikacji technicznej mikrofonu B&K typ 4190.

126 Karta specyfikacji technicznej miernika B&K typ LAN-XI typ 3050-A-060.

127 Arendarski J.: Niepewność pomiarów. Oficyna Wyd. PW, 2006.

128 Manual PULSE LabShop Version 15.1.0.15.

129 Beranek L., Acoustics, Acoustuic Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Edition 1993.

130 IEC 61672:2003 Electroacoustics — Sound Level Meters, Part 1 Specifications.

131 IEC 60537 Frequency Weighting For The Measurement Of Aircraft Noise (D-Weighting).

132 ISO 7196:1995 Acoustics -- Frequency-weighting characteristic for infrasound measurements.

133 ANSI/ASA S1.26-1995 (R2009) Calculation of the Absorption of Sound by the Atmosphere.

134 C. M. Harris, "Absorption of Sound in Air versus Humidity and Temperature", Journal of the Acoustical Society of America, 40, p. 148.

135 http://en.wikibooks.org/wiki/Engineering_Acoustics/Outdoor_Sound_Propagation.

136 www.vensys.de [dostęp czerwiec 2014].

137 Boczar T., Możliwości zastosowania do opisu sygnałów emisji akustycznej od wyładowań niezupełnych analizy statystycznej i cyfrowych metod przetwarzania sygnałów, Opole : Oficyna Wydawnicza PO, 2003

138 PN-ISO 9613-2:2002 Akustyka. Tłumienie dźwięku podczas propagacji w przestrzenni otwartej. Ogólna metoda obliczania.

139 http://eng.mst.dk/media/mst/66206/engelsk_vindmoellebekendtgoerelse.pdf [dostęp: czerwiec 2013].