Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki (1-4)

doi:10.15199/48.2020.06.13

Wykorzystanie zaawansowanych metod przetwarzania sygnałów do analizy infradźwięków generowanych przez turbiny wiatrowe dużej mocy

Streszczenie. W artykule zostaną przedstawione wyniki pomiarów i analizy sygnałów infradźwiękowych emitowanych pracą turbiny wiatrowej o mocy znamionowej 2 MW. Pomiary zostały przeprowadzone jednocześnie w trzech punktach pomiarowych, których odległość od turbiny wynosiła ok. 100 m. Analizy zostaną przeprowadzone przy wykorzystaniu przekształceń częstotliwościowych i analizy korelacyjnej dla pomiarów wykonanych przy zmiennych warunkach metrologicznych.

Abstract. The article will present the results of measurements and analysis of infrasound signals emitted by a wind turbine of rated power of 2 MW. The measurements were carried out simultaneously in three measurement points, of which the distance to the turbine was about 100 m. The analyses will be carried out with the use of frequency and correlation, for measurements obtained with variable meteorological conditions. (**The use of advanced signal processing methods for the analysis of infrasound generated by high-power wind turbines**).

Słowa kluczowe: turbina wiatrowa, sygnały infradźwiękowe, analiza częstotliwościowa, analiza korelacyjna. **Keywords**: wind turbine, infrasound signals, frequency analysis, correlation analysis.

Wstęp

Problem szczegółowego zbadania i dokonania opisu mechanizmu generacji, propagacji, właściwego akustycznego osiąganych poziomów ciśnienia oraz odpowiadającego natężenia dźwięku, także mu а możliwego oddziaływania sygnałów niskoczęstotliwościowych

(10-250 Hz), w tym infradźwięków (1-20 Hz) emitowanych przez źródła sztuczne, do których zaliczane są turbiny wiatrowe, jest nadal aktualny i podejmowany przez liczne, głównie zagraniczne, instytuty naukowe oraz ośrodki badawcze m.in. [1-3]. Dotyczy to zarówno sfery naukowopoznawczej, jak również implementacyjnej, związanej z koniecznością jednoznacznego określenia granicznych wartości kryterialnych w przepisach normujących długotrwałe oddziaływanie dopuszczalne. hałasu infradźwiękowego na środowisko naturalne, w tym przede wszystkim wskaźniki charakteryzujące ekspozycję na organizmy żywe.

Prowadzone dotychczas przez autorów niniejszego artykuły prace naukowo-badawcze koncentrowały się porównaniu hasłu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny różnej mocy [4], w tym mikroturbiny różnej konstrukcji o pionowej i poziomej osi obrotu wirnika względem kierunku wiejącego wiatru [5], a także różniące się zastosowanym generatorem asynchronicznym i synchronicznym. W tym celu bazowano głównie na wynikach analizy porównawczej zarejestrowanych wartości poziomu ciśnienia akustycznego oraz widmach częstotliwościowych wyznaczanych przy zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera, a także spektrogramach obliczonych z wykorzystaniem krótko-czasowego przekształcenia Fouriera. Przy czym, pomiary wykonywano przy wykorzystaniu jednego toru pomiarowego zgodnie z procedurami opisanymi w normie PN-EN 61400-11:2004/A1 Turbozespoły wiatrowe – Część 11: Procedury pomiaru hałasu, które dotyczą sygnałów akustycznych w pasmie Natomiast słyszalnym. problem oceny poziomu emitowanych przez turbiny wiatrowe infradźwięków przy zmianie szeregu parametrów i czynników zewnętrznych, a następnie odniesienie zmierzonych wartości do wielkości kryterialnych oraz zaproponowanie wytycznych dla referencyjnej metodyki pomiarowej stanowiły tematykę i główne cele badawcze rozprawy doktorskiej dra inż. T. Malca pt. "Pomiary i analiza sygnałów infradźwiękowych

generowanych pracą turbin wiatrowych dużych mocy, obroniona w 2016 r na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej której promotorem był prof. T. Boczar.

Obecnie wykonywane badania realizowane m.in. w ramach projektu naukowo-badawczego nr: 2015/17 / B / ST8 /03371, pt. "Numeryczna i doświadczalna analiza niskoczęstotliwościowych zjawisk akustycznych generowanych podczas pracy turbin wiatrowych" finansowanego przez NCN w ramach konkursu OPUS 9, zmierzają do opracowania modelu opisującego procesy fizyczne związanych z generacją, rozwojem w czasie i propagacją, w zróżnicowanych ośrodkach akustycznych, sygnałów niskoczestotliwościowych emitowanych praca turbin wiatrowych różnych mocy, konstrukcji i zasadzie działania. W szczególności dotyczy to utworzenia modelu matematycznego opisującego źródła zaburzeń, w wyniku których następuje generacja hałasu infradźwiękowego. Podjęta w niniejszym artykule problematyka stanowi kolejny etap prac badawczych realizowanych w tym obszarze tematycznym.

Charakterystyka układu pomiarowego

Zastosowany podczas badań system INFRA, którego schemat funkcjonalny został przedstawiony na rysunku 1, umożliwia jednoczesną rejestrację w trzech niezależnych torach pomiarowych sygnałów niskiej częstotliwości i ich bezprzewodową transmisję do stacji bazowej, gdzie są archiwizowane. System składa się z następujących elementów składowych: stacji bazowej, trzech stacji pomiarowych, stacji meteorologicznej oraz laptopa DELL W Latitude E7270. warstwie softwarowej system wyposażony jest w dedykowane oprogramowanie INFRA v. 1.2, które umożliwia konfigurowanie parametrów pomiarowych, a także archiwizację i wstępne przetwarzanie rejestrowanych podczas pomiarów on-line danych. System został zaprojektowany według przygotowanych wymagań funkcjonalnych i założonych parametrów, a następnie wykonany przez firmę KFB ACOUSTICS Sp. z o.o. dla potrzeb realizacji w/w projektu naukowo-badawczego.

Stacja bazowa składa się z routera Wi-Fi Ubuquiti BULLET M2 oraz bazowej anteny dookólnej firmy CyberBajt, typ ProEter10, o polaryzacji pionowej i zysku energetycznym 10 dBi, przeznaczonej do pracy w paśmie 2,4 GHz. Jej zadaniem było zapewnienie pewnej

komunikacji bezprzewodowej ze stacjami pomiarowymi. Zastosowana antena jest dedykowana dla lokalizacji, w których występuje duża liczba innych sieci radiowych. Ponadto, duży kąt promieniowania w płaszczyźnie pionowej wynoszący 23⁰ dla -3 dB umożliwia realizację stabilnych połączeń w przypadku występowania nawet stosunkowo dużych różnic wysokości między bazą, a poszczególnymi stacjami pomiarowymi. Tego typu sytuacje często występują podczas pomiarów wykonywanych w warunkach terenowych. Router jest wyposażony w mikroprocesor Atheros MIPS 24KC, 400 MHz, a maksymalna wartość mocy wyjściowej RF (TX Power) wynosi 30 dBm. Podczas pomiarów antena była podłączona bezpośrednio do routera za pomocą dedykowanego konektora, tworząc punkt dostępowy Wi-Fi 2,4 GHz. Antena była umieszczona na maszcie pomiarowym na wysokości ok. 2 m, co zapewniało długodystansowe, pewne połączenia, przy realnej prędkości transmisji danych 100 Mbps+, niezależnie od warunków pogodowych

i ukształtowania terenu.



Rys.1. Ogólny schemat funkcjonalny systemu INFRA do pomiarów sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbiny wiatrowe (opracowanie własne)

W skład każdej z trzech stacji pomiarowych wchodzą następujące elementy: mikrofon pomiarowy z zintegrowanym przedwzmacniaczem, karta pomiarowa umożliwiająca bezprzewodową transmisję rejestrowanych sygnałów poprzez Wi-Fi, która umieszczona jest w specjalnie dostosowanej wodoodpornej, pyłoszczelnej oraz udaroodpornej walizce wykonanej z aluminium i bardzo mocnego polipropylenu, wiatrowskaz, anemometr oraz zewnętrzna antena Wi-Fi. Widok pojedynczej stacji pomiarowej został przedstawiony na rysunku 2.

W każdym z torów pomiarowych wykorzystano antenę kierunkową, mikropasmową firmy Cyberbajt, typ LineEter 19, o zysku energetycznym 19 dBi , przeznaczoną do pracy w paśmie częstotliwości 2,4–2,5 GHz. Jej kąt promieniowania w płaszczyźnie poziomej wynosi 25° dla - 3 dB i odpowiednio 20⁰ dla - 3 dB w pionowej. Wszystkie złącza pomiarowe przyłączone są do modułu pomiarowego National Instruments cDAQ-9191, do którego podłączona jest czterokanałowa, 24 bitowa karta pomiarowa NI 9234. Zastosowana karta, dla każdego z czterech kanałów ma standardowo wbudowane filtry antyaliasingowe, które w sposób automatyczny dostosowują się do bieżącej

częstotliwości próbkowania. Przy czym, maksymalna wartość częstotliwości próbkowania jest równa 51,2 kS/s.



Rys.2. Widok stacji pomiarowej, gdzie: A – wiatrowskaz, B – anemometr, C – antena kierunkowa, D – zewnętrzna ochrona przeciwwietrzna, E – płyta odbijająca, F – badana turbina wiatrowa, G – walizka pomiarowa

Przeprowadzone pomiary polegały na zsynchronizowanej rejestracji sygnałów niskiej częstotliwości z trzech stacji pomiarowych usytuowanych w różnych lokalizacjach względem źródła ich generacji. Oprócz jednoczesnego pomiaru emitowanych sygnałów niskoczęstotliwościowych z trzech różnych punktów pomiarowych, układ umożliwia równoległą rejestrację kierunku i prędkości wiatru, oddzielnie dla każdej z trzech stacji pomiarowych. Przy czym, jego dokładność wynosi +/-0,1 m/s, a zakres pomiarowy prędkości wiatru mieści się w przedziale od 0 m/s do 25 m/s. W zależności od zastosowanych mikrofonów, układ umożliwia zarówno rejestrację sygnałów akustycznych w zakresie niskiej częstotliwości, jak również pomiar hałasu w paśmie słyszalnym.

Mierzoną wielkością fizyczną były czasowe zmiany poziomu ciśnienia akustycznego, które nie były przeliczane na adekwatną wartość poziomu mocy akustycznej. Takie podejście daje możliwość określenia zakresu potencialnego oddziaływania infradźwięków bezpośrednio w miejscu lokalizacji punktów pomiarowych. Do ich rejestracji zastosowano mikrofony pojemnościowe, w których zmiany ciśnienia akustycznego wprawiają w drgania membranę. Membrana ta jest ruchomą okładziną kondensatora, która zamienia pojemność elektryczną w takt zmian ciśnienia. Ponieważ mikrofon jest wstępnie polaryzowany, a jego okładziny są ze sobą połączone za pomocą rezystora, to na wyjściu mikrofonu uzyskuje się proporcjonalne zmiany wartości napięcia. Podczas przeprowadzonych rejestracji zastosowano mikrofon pojemnościowy pola swobodnego firmy GRAS Sound & Vibration A/S typu GRAS 46AZ. Jego podstawowym przeznaczeniem są pomiary diagnostyczne sygnałów akustycznych w zakresie od 0,5 Hz do 20 kHz. Mikrofon zintegrowany jest w wspólnej obudowie z przedwzmacniaczem typu 26CI i charakteryzuje się odpowiedzią impulsową, która zoptymalizowana jest pod kątem pomiaru ciśnienia w polu dyfuzyjnym, rozproszonym. Wartości podstawowych parametrów zastosowanych mikrofonów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie podstawowych parametrów mikrofonu pomiarowego G.R.A.S. 46AZ

Parametr	Jednostka	Wartość
Zakres częstotliwości (±1 dB)	Hz	1 – 10 k
Zakres częstotliwości (±2 dB)	Hz	0,5 – 20 k
Czułość	mV/Pa	50
Dolny poziom zakresu dynamiki z	dB(A)	17
przedwzmacniaczem	dB	138
Nominalna czułość dla 250 Hz	mV/Pa	50
Prąd zasilania (CCP)	mA	2 – 20
Zakres temperatury pracy	°C	od -30 do +70

Dodatkowo podczas pomiarów. w każdym z trzech torów pomiarowych, zastosowano dwie ochronne osłony przeciwwietrzne oraz okrągłą, wykonaną z drewna, odbijającą powierzchnię pomiarową o średnicy 1 m (rys. 3, 4).



Rys.3. Schemat poglądowy zastosowanego zestawu pomiarowego mikrofon-płyta-odbijająca-osłony przeciwwietrzne (zewnętrzna i wewnętrzna)



Rys.4. Lokalizacja mikrofonu na płycie odbijającej, gdzie A = 1 m

Wykorzystano zestaw UA-2133 firmy Brüel&Kjær zaprojektowany i wykonany do pomiarów hałasu generowanego pracą turbin wiatrowych, zgodnie z założeniami zawartymi w normie PN-EN 61400-11.

W celu sprawdzenie poprawności działania układu pomiarowego, zarówno przed, jak również po każdej serii

pomiarowej, przeprowadzano jego kalibrację przv wykorzystaniu kalibratora akustycznego klasy 1 firmy B&K typ 4231. Sygnał testowy miał częstotliwość 1 kHz o poziomie 94 dB. Stabilność generowanego poziomu dźwięku wynosi ±0,2 dB. Natomiast stabilność generowanej częstotliwości wynosiła odpowiednio ±0,1%, przv zniekształceniach mniejszych od 1 %. Proces kalibracji był każdorazowo wykonywany według procedury opisanej przez producenta kalibratora, oddzielnie dla każdego z trzech torów pomiarowych.

Zastosowanie technologii Wi-Fi umożliwia komunikację stacji bazowej ze stacjami pomiarowymi w terenie otwartym w promieniu co najmniej 300 m. Do transferu danych pomiarowych wykorzystano standardowy i najczęściej stosowany w sieciach komputerowych protokół transmisyjny TCP/IP.

Dodatkowo podczas pomiarów sygnałów niskiei częstotliwości generowanych pracą turbin wiatrowych wykorzystywano bezprzewodową stację pogodową Davis Vantage Vue 6250EU. Wyposażona jest ona w zestaw zewnętrznych czujników, za pomocą których rejestrowane podstawowe parametrów meteorologicznych są charakteryzujące w sposób jednoznaczny aktualny stan W szczególności możliwy pogody. jest pomiar następujących wartości: temperatury powietrza w zakresie od -40°C do +65°C, z dokładnością ±0,1°C; wilgotności względnej powietrza od 0 do 100% z dokładnościa 1%; ciśnienia atmosferycznego w zakresie od 540 hPa do 1100 hPa, z dokładnością 0,1 hPa; prędkości wiatru w zakresie od 1 m/s do 80 m/s, z dokładnością 0,5 m/s oraz jego kierunku w zakresie od 0 do 359° z dokładnością 1°; a także opadów atmosferycznych w stanie ciekłym w zakresie od 1 do 1016 mm/h, z dokładnością 0,2 mm, Istnieje także możliwość wyznaczenia parametrów pochodnych, takich jak: temperatura punktu rosy i temperatura odczuwalna. System czujników komunikuje się z konsolą odbiorczą bezprzewodowo (868 MHz) na odległość do 300 m w otwartej przestrzeni, a przy wykorzystaniu dodatkowych wzmacniaczy sygnału i anten wzrasta nawet do 1-2 km.

W celu określenia dokładności otrzymywanych wyników rejestracji sygnałów niskoczęstotliwościowych dokonano oceny niepewności zastosowanego układu pomiarowego, którą wyznaczono na podstawie podanych przez producentów wartości niepewności poszczególnych przyrządów pomiarowych. Na tej podstawie oszacowano standardową niepewność typu B, która była równa 0,51 oraz obliczono niepewność rozszerzoną typu B, przy założonym przedziale ufności 95,5 %, która wynosiła 0,92.

Charakterystyka badanej turbiny wiatrowej

Badanym obiektem była trójłopatowa turbina wiatrowa duńskiej firmy Vestas serii V90 o mocy znamionowej 2 MW, która jest wyposażona w generator asynchroniczny dwustronnie zasilany o napięciu 690 V z innowacyjnym systemem sterowania mocą OptiSpeed®. Jego działanie polega na utrzymywaniu mocy wyjściowej generatora na stałym poziomie, niezależnym od zmian prędkości wiatru, co w konsekwencji zapewnia optymalizację wielkości produkowanej energii elektrycznej. W szczególności dotyczy to małych prędkościach wiatru. OptiSpeed® umożliwia zmianę prędkości wirnika w zakresie około 60 % w stosunku do nominalnej prędkości obrotowej, dzięki czemu prędkość wirnika może różnić się o maksymalnie 30 % w stosunku do prędkości synchronicznej. Tym samym możliwa jest minimalizacja zarówno niepożądanych wahań mocy wyjściowej wyprowadzanej do sieci, zmniejszenie odkształceń harmonicznych i migotań, jak również obciążeń mechanicznych istotnych z punktu widzenia w funkcjonalności elementach konstrukcyjnych turbiny.

Zastosowanie tej technologii umożliwia maksymalizację produkowanej energii dzięki wykorzystaniu większej wydajności przy wolnych i zmiennych obrotach wirnika, przechowaniu nadmiaru energii w formie obrotów oraz użyciu pełnej siły przejściowych podmuchów wiatru. Ponadto, ponieważ hałas emitowany pracą turbiny jest funkcją prędkości wiatru, stąd zmniejszenie prędkości obrotowej wirnika wprowadzane przez OptiSpeed® powoduje zmniejszenie jego poziomu. Dodatkowo turbiny V90-2.0 MW wyposażone są w system OptiTip® regulacji wzdłużnej kata ustawienia, wykonanych z włókien węglowych, łopat. Umożliwia on ciągłą regulację co w konsekwencji pozwala utrzymać optymalne nachylenie łopat w stosunku do dominującego kierunku wiatru. Jednocześnie, jego zastosowanie umożliwia zmniejszenie poziomu generowanych sygnałów akustycznych, w tym również niskoczęstotliwościowych.

Badana turbina jest zlokalizowana w południowej Polsce, na obszarze nizinnym i znajduje się w IV strefie tzw. niekorzystnej (według IMiGW z Warszawy), pod wzgledem uzyskiwanych wartości średniorocznych prędkości wiatru. Wirnik turbiny ma średnicę 90 m, wysokość wierzy wynosi 95 m, a powierzchnia omiatania jest równa 6,362 m². Jej prędkość startowa wynosi 3,5 m/s, nominalna prędkość wiatru przy której osiągane jest moc 2 MW jest równa 13 m/s, a automatyczne wyłączenie turbiny, ze względów bezpieczeństwa, następuje przy prędkości wiatru wynoszącej 25 m/s. Natomiast jako graniczna wartość predkości wiatru, która może wytrzymać konstrukcja turbiny, producent podał poziom 65 m/s. Zakres obrotów wirnika mieści się w przedziale od 9,0 do 14,9 obrotów/min [6].

Metodyka pomiarowa

Na rysunku 5 przedstawiono lokalizację trzech stacji pomiarowych (oznaczenie: ST_1; ST_2; ST_3), które zostały umieszczone w odległości ok. 100 m względem badanej turbiny wiatrowej (oznaczenie: WIND_TURBINE_2). Przy, czym wokół turbiny znajdowały się zaorane pola uprawne. Między stacjami pomiarowymi i analizowaną turbiną nie było przeszkód terenowych, a teren był praktycznie płaski.



Rys.5. Lokalizacja stacji pomiarowych względem badanej turbiny wiatrowej

Dla wskazanych lokalizacji sygnały niskiej częstotliwości rejestrowano w seriach trwających 15 minut, dokonując pomiary jednocześnie we wszystkich trzech stacjach pomiarowych, przy częstotliwości próbkowania równej 51,2 kS/s i przy zachowaniu stałej prędkości i kierunku wiatru. Prace eksperymentalne przeprowadzono w ciągu

siedmiu dni na przełomie października i listopada. Przy czym, podczas pomiarów były następujące warunki meteorologiczne: średnie wartości prędkości wiatru w zakresie od 3,7 do 13,5 m/s, ciśnienie atmosferyczne od 999,3 do 1001,7 hPa, temperatura powietrza w zakresie 4–11°C, a jego wilgotność: 72-84%. Podczas pomiarów nie występowały żadne opady atmosferyczne.

Należy zaznaczyć, że w każdym dniu pomiarowym, ро kalibracji bezpośrednio toru pomiarowego, przeprowadzono pomiar tła akustycznego, przy unieruchomionej turbinie wiatrowej. Uzyskane wartości były każdorazowo odejmowane od wartości rejestrowanych podczas normalnej pracy badanej turbiny wiatrowej. Z analizowanych danych były usuwane serie pomiarowe, w czasie których występowały dodatkowe źródła sygnałów niskiej częstotliwości, jak poruszające się maszyny leśne i olnicze oraz przejeżdżające pociągi.

Wyniki analizy zmierzonych sygnałów

Zarejestrowane sygnały niskiej częstotliwości poddano analizie częstotliwościowej wyznaczając przebiegi widm gęstości mocy przy zastosowaniu metody Welcha i okna Hamminga od długości N=512e³, wykorzystując skrypty obliczeniowe utworzone w środowisku programistycznym Matlab. W sposób szczegółowy metodyke obliczeń i wykorzystywane zależności matematyczne zaproponowane przez P.D. Welcha do estymacji widm gęstości mocy, zostały przedstawiono m.in. w [7]. Należy podkreślić, że metoda ta została zastosowana w tym artykule przede wszystkim w celu zmniejszenia wielkości szumu w szacowanych widmach gęstości mocy, co ma miejsce w przypadku zastosowania standardowego przekształcenia Fouriera.

Na rysunkach 6-8 przedstawiono przykładowe i reprezentatywne przebiegi zmian ciśnienia akustycznego zachodzące w czasie 15 minutowych serii pomiarowych, zarejestrowanych oddzielenie przez trzy stacje pomiarowe. Przy czym, zaprezentowane w artykule zależności dotyczą danych zarejestrowanych przy największej z prędkości wiatrów wynoszącej 13,5 m/s, dla której wykonano pomiary sygnałów akustycznych niskiej częstotliwość. Jest to wartość, przy której badana turbina osiąga znamionowe parametry pracy.



Rys.6. Zmiany ciśnienia akustycznego sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW zachodzące w czasie 15 min serii pomiarowej, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_1

Należy przy tym zaznaczyć, że zależności otrzymane dla mniejszych prędkości wiatrów nie różnią się pod względem jakościowym, zachowując charakter wyznaczonych przebiegów widm częstotliwościowych. Natomiast uzyskiwano mniejsze wartości rejestrowanych sygnałów niskoczęstotliwościowych.



Rys.7. Zmiany ciśnienia akustycznego sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zachodzące w czasie 15 min serii pomiarowej, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_2



Rys.8. Zmiany ciśnienia akustycznego sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zachodzące w czasie 15 min serii pomiarowej, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_3

Dla zarejestrowanych sygnałów niskiej częstotliwości wyznaczono przebiegi funkcji autokowariancji w celu określenia ich charakteru. Obliczone przebiegi przedstawiono na rysunkach 9-11.



Rys. 9. Przebieg funkcji autokowariancji sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_1

W kolejnym kroku dla zarejestrowanych przebiegów czasowych wyznaczono uśrednione przebiegi widm gęstości mocy obliczone przy zastosowaniu metody Welcha, które zilustrowano na rysunkach 12-14. Przy czym przedstawione przebiegi widm zostały wyznaczone w całym zakresie analizowanych częstotliwości tj. od 0,1 Hz do 10 kHz.



Rys.10. Przebieg funkcji autokowariancji sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_2



Rys.11. Przebieg funkcji autokowariancji sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_3



Rys.12. Widmo gęstości mocy sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_1

Natomiast na rysunkach 15-17, w celu wyeksponowania zakresu infradźwięków przedstawiono wyżej zilustrowane przebiegi uśrednionych widm gęstości mocy w zakresie od 0,1 Hz do 20 Hz.

Należy zaznaczyć, że zilustrowane na rysunkach 12-17 przebiegi widm gęstości mocy są reprezentatywne, a kształt ich przebiegu i zakresy dominujących częstotliwości są niezależne od prędkości wiatru, przy której odbywały się pomiary sygnałów niskoczęstotliwościowych, w tym infradźwiękowych generowanych przez badaną turbinę Wiatrową.



Rys.13. Widmo gęstości mocy sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_2



Rys.14. Widmo gęstości mocy sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_3



Rys.15. Widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_1

Ponadto, dla każdego z trzech torów pomiarowych otrzymano zbliżone kształty wyznaczonych charakterystyk. Należy jednak przy tym podkreślić, że wokół badanej turbiny znajdowała się taka sama płaska powierzchnia gruntu, pozbawiona przeszkód terenowych, które mogłyby wpływać na kształt rozchodzących się fal akustycznych.

W kolejnym kroku na podstawie wyznaczonych przebiegów uśrednionych widm gęstości mocy została wyznaczona krzywa trendu w postaci krzywej aproksymacyjnej S(f) (wzór 1). W procesie regresji zastosowano metodę Najmniejszych Kwadratów oraz

simpleksową metodę Neldera-Meada. Uzyskane przebiegi zostały przedstawione na rysunkach 18-20, na których punktami zaznaczono obliczone wartości widma gęstości mocy, a linią ciągłą zilustrowano wyznaczoną krzywą regresyjną S(f) Ponadto, w legendzie zamieszczono równanie wraz z oszacowanymi wartościami parametrów oraz wartość wskaźnika determinacji R^2 obrazującą stopień dopasowania wyznaczonego modelu do rzeczywistych wartości.

(1) $S(f) = -(a_1 log_{10} f)^{a_2}(a_3 + a_4 log_{10} f),$ gdzie: f - częstotliwość [Hz], a_i - parametry modelu

Dokładność procesu regresji została oszacowana przy wykorzystaniu normy reszt δ określonej za pomocą wyrażenia (2).

(2) $\delta = \|\hat{y} - y\| = \sqrt{\sum_{t=1}^{n} (\hat{y}_i - y_i)},$

gdzie: δ – wartość normy, \hat{y}_i – oszacowanie funkcji regresji, y_i – dane empiryczne, n - liczba próbek..



Rys.16. Widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_2



Rys.17. Widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_3

W kolejnym etapie przeprowadzonych analiz wyznaczony model regresyjny został odjęty od pierwotnego widma gęstości mocy. Jako rezultat uzyskano przebiegi tzw. widm zmodyfikowanych (ang. Detrended Spectrum Density), które przedstawiono na rysunkach 21-23. W uzyskanych w ten sposób przebiegach pozbawionych szumów można skuteczniej i w sposób automatyczny, za pomocą opracowanego algorytmu obliczeniowego, wyznaczyć wartości częstotliwości dominujących, a także zlokalizować charakterystyczne ekstrema lokalne, co zostało zilustrowane na rysunkach 24-26.



Rys.18. Widmo gęstości mocy (punkty) i krzywa trendu (linia ciągła) sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_1



Rys.19. Widmo gęstości mocy (punkty) i krzywa trendu (linia ciągła) sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_2



Rys.20. Widmo gęstości mocy (punkty) i krzywa trendu (linia ciągła) sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_3



Rys.21. Zmodyfikowane widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_1



Rys.22. Zmodyfikowane widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_2



Rys.23. Zmodyfikowane widmo gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez turbinę wiatrową o mocy 2 MW, zarejestrowane przez stację pomiarową ST_3

Podsumowanie

Na podstawie zaprezentowanych w artykule wyników można sfomułować następujące wnioski:

 przedstawione na rysunkach 6-8 przebiegi czasowe świadczą o stosukowo dużym zaszumieniu rejestrowanych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości.

- Obliczone przebiegi funkcji autokowariancji, niezależnie od stacji pomiarowej, w której dane zostały zarejestrowane, charakteryzują się występowaniem zarówno szerokopasmowej składowej stochastycznej o zmiennej amplitudzie, jak również istnieniem składowej deterministycznej o stosunkowo dużej wartości, co świadczy o dualnym charakterze zarejestrowanych sygnałów oraz ich znacznym zaszumieniu.

 Dla wyznaczonych krzywych trendu uzyskano dużą wartość współczynnika R² w zakresie od 0,789 do 0,874, co świadczy o dużym stopniu dopasowania wyznaczonego modelu do obliczonego na podstawie zarejestrowanych sygnałów widma gęstości mocy. Należy również zaznaczyć, że dla sygnałów niskoczęstotliwościowych zarejestrowanych przy mniejszych prędkościach wiatru uzyskano również znaczące wartości R², potwierdzające duży stopień dopasowania do danych empirycznych.

- Dla każdego z trzech torów pomiarowych, niezależnie od prędkości wiatru w przedziale od 3,7 m/s do 13,5 m/s i kierunku ustawienia wirnika turbiny, uzyskano zbliżone kształtem przebiegi widm gęstości mocy emitowanych pracą badanej turbiny sygnałów akustycznych w zakresie niskich częstotliwości. Znalazło to także potwierdzenie w wyznaczonym równaniu zamodelowanej krzywej trendu, której współczynniki mają zbliżone wartości liczbowe, natomiast równanie ma tożsamą postać dla wszystkich prezentowanych i wyznaczonych zależności. Wyznaczone przebiegi widm gęstości mocy mają kształt zbliżony do odwróconej, niesymetrycznej paraboli.
Począwszy od częstotliwości 0,1 Hz widoczny jest wzrost wartości obliczonych widm, aż do ekstremum, które osiągane jest przy częstotliwości zbliżonej do 1 Hz. Następnie następuje systematyczne, niemal liniowe, zmniejszenie wartości, aż do końca zakresu analizowanych częstotliwości. W uzyskanych przebiegach widoczne są liczne piki rezonansowe.

- Zastosowanie zaproponowanych procedur przetwarzania zarejestrowanych sygnałów umożliwiło wyznaczenie przebiegów tzw. widm zmodyfikowanych, pozbawionych sygnałów zakłócających, na podstawie których można w sposób automatyczny wyznaczyć wartości częstotliwości dominujących (rys. 24-26).



Rys.24. Przebieg zmodyfikowanego widma gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez badaną turbinę wiatrową

o mocy 2 MW i zarejestrowanych przez stację pomiarową ST_1 z wyznaczonymi wartościami częstotliwości dominujących

Zaimplementowanie trójtorowego układu pomiarowego oraz bezprzewodowej komunikacji radiowej między stacjami pomiarowymi i jednostką bazową umożliwiło wykonywanie rejestracji zachodzących zmian generowanych sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości, jednocześnie w trzech dowolnych kierunkach, w odległości do 300 m od miejsca emisji, nierealnych do przeprowadzenia dla komunikacji przewodowej. Wykonane badania w sposób jednoznaczny przydatność pomiarów potwierdziły jego do przeprowadzanych często trudnych warunkach w terenowych.



Rys.25. Przebieg zmodyfikowanego widma gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez badaną turbinę wiatrową

o mocy 2 MW i zarejestrowanych przez stację pomiarową ST_2 z wyznaczonymi wartościami częstotliwości dominujących



Rys.26. Przebieg zmodyfikowanego widma gęstości mocy sygnałów infradźwiękowych generowanych przez badaną turbinę wiatrową

o mocy 2 MW i zarejestrowanych przez stację pomiarową ST_3 z wyznaczonymi wartościami częstotliwości dominujących

Prace były współfinansowane ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach programu OPUS 9, projekt nr: 2015/17/B/ST8/03371

Autorzy: prof. dr hab. inż. Tomasz Boczar, prof. dr hab. inż. Dariusz Zmarzły, dr inż. Michał Kozioł, dr inż. Daria Wotzka, Politechnika

Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: t.boczar@edu.po.opole.pl, d.zmarzly@edu.po.opole.pl, m.koziol@edu.po.opole.pl, d.wotzka@edu.po.opole.pl.

LITERATURA

- Vincent P., Larsonnier, F. Rodrigues D., Durand S., Analytical Modelling and Characterisation of an Infrasound Generator in the Air, *Appl. Acoust.*, 148, (2019), 476–483
- [2] Thorsson P., Persson W. K., Smith M., Ögren M., Pedersen E., Forssén J., Low-frequency Outdoor–Indoor Noise Level Difference for Wind Turbine Assessment, *The J. of the Acoust. Soc. of America*, 143 (2018), n. 3
- [3] van Kamp I., van den Berg F., Health Effects Related to Wind Turbine Sound, Including Low-frequency Sound and Infrasound, Acous. Australia, 46 (2018), n. 1, 31–57
- [4] Boczar T., Malec T., Wotzka D., Studies on Infrasound Noise Emitted by Wind Turbines of Large Power, Acta Phys. Pol. A, 122, (2012), n. 5, 850-853.
- [5] Pierzga R., Boczar T., Wotzka D., Zmarzły D., Studies on Infrasound Noise Generated by Operation of Low-Power Wind Turbine, *Acta Phys. Pol. A*, 124, (2013), n. 3, 542-545
- [6] Karta katalogowa turbin wiatrowych Vestas typu V90 o mocach 1,8 MW i 2,0 MW Vestas Wind Systems A/S, 02/2008
- [7] Gupta H. R., Mehra R., Power Spectrum Estimation Using Welch Method for Various Window Techniques, *Int. J. of Sci. Res. Eng. & Tech.*, 2 (2013), n. 3, 389-392