

Daniel JANCARCZYK¹, Jakub KLIŚ²

WYKORZYSTANIE METODY WIDMOWEJ DO ANALIZY SYGNAŁÓW NISKIEJ CZĘSTOTLIWOŚCI EMITOWANYCH PRZEZ TRANSFORMATORY ELEKTROENERGETYCZNE

Streszczenie: W artykule zostaną przedstawione wyniki pomiarów i analizy sygnałów niskoczęstotliwościowych emitowanych pracą transformatora elektroenergetycznego o mocy znamionowej 400 kVA. Pomiary zostały przeprowadzone w czterech punktach pomiarowych, których odległość od źródła wynosiła ok. 50 m. Analizy zostaną przeprowadzone przy wykorzystaniu przekształceń częstotliwościowych oraz czasowo-częstotliwościowych wykonanych pomiarów.

Słowa kluczowe: transformator, sygnały infradźwiękowe i niskoczęstotliwościowe, analiza częstotliwościowa.

THE USE OF THE SPECTRUM METHOD FOR THE ANALYSIS OF LOW FREQUENCY SIGNALS EMITTED BY POWER TRANSFORMERS

Summary: The article will present the results of measurements and analysis of low-frequency signals emitted by the operation of a power transformer of rated power of 400 kVA. The measurements were carried out at four measuring points, of which the distance to the source was about 50 m. The analyses will be carried out with the use of frequency and time-frequency transformations of the performed measurements...

Keywords: transformer, infrasound and low-frequency signals, frequency analysis.

1. Wprowadzenie

Transformatorem w elektrotechnice nazywa się urządzenie, służące do przetwarzania energii elektrycznej, działającym w oparciu o zasadę indukcji elektromagnetycznej, bez udziału ruchu mechanicznego. Transformator, ma minimum 2 uzwojenia oddzielone od siebie galwanicznie, które są nawinięte na kolumny rdzenia zamknięte jarzmami, tworzące zamknięty obwód magnetyczny. Rdzeń transformatora, przez który przenika strumień magnetyczny, wykonany jest z pakietu blach wzajemnie od siebie odizolowanych. Zależnie od kierunku przepływu energii przez transformator,

¹ dr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, e-mail: djancarczyk@ath.bielsko.pl

² mgr inż., Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki.

uzwojenia dzielą się na pierwotne i wtórne. Uzwojenie pierwotne pobiera energię elektryczną ze źródła a wtórne oddaje ją do odbiornika [1].

Transformator odgrywa w elektrotechnice bardzo ważną rolę. Dzięki niemu można bowiem zmieniać napięcie wytwarzanej energii elektrycznej w jednym miejscu oraz rozprowadzać ją do punktów odbiorczych, nieraz bardzo odległych od wytwórni minimalizując straty. Jednym słowem transformator pomaga w rozwiązywaniu problemu transportu energii. Przesyłanie energii elektrycznej przy niskim napięciu pociąga za sobą konieczność stosowania bardzo dużych przekrojów przewodów elektrycznych, co znacząco zwiększa koszt linii. Przenosząc tę samą moc przy napięciu wyższym, zmniejsza się przekrój, a tym samym koszt linii przesyłowych. W miejscu dostarczenia energii elektrycznej napięcie trzeba obniżyć, gdyż takie odbiorniki, jak żarówki, grzejniki, małe silniki są zbudowane na niskie napięcie.

Hałas niskoczęstotliwościowy generowany przez pracujące transformatory elektroenergetyczne jest zagadnieniem często podnoszonym przez różnego rodzaju instytucje i organy opiniujące ich potencjalny wpływ i oddziaływanie na środowisko[2-4]. 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 niskoczęstotliwościowego generowanego przez transformatory, 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, o każdym z aspektów oceny hałasu niskoczęstotliwościowego emitowanego przez transformatory jest dość zróżnicowany.

Sygnały niskoczęstotliwościowe to sygnały reprezentujące informacje fali akustycznej w postaci analogowej lub cyfrowej. Falę akustyczną definiuje się jako zaburzenie gęstości i ciśnienia rozchodzące się w ośrodku w postaci fali podłużnej, któremu towarzyszą drgania cząsteczek ośrodka. Ośrodki, w których takie fale mogą się poruszać, to ośrodki sprężyste, takie jak: ciało stałe, ciecz i gaz. Brak jest standaryzacji zakresu częstotliwościowego dźwięków o niskich częstotliwościach, jednakże przy wykonywaniu analiz technicznych i jego ocenie przyjmuje się zakres od 10 Hz do 200 Hz [5]. Dolna granica (10 Hz) tłumaczona jest w literaturze faktem trudności wykonania oraz zinterpretowania pomiaru poziomu dźwięku, w zakresie częstotliwości niższych niż 10 Hz.

Sposób opisu zjawisk generacji i propagacji sygnałów niskoczęstotliwościowych jest analogiczny jak dla sygnałów słyszalnych, czy naddźwiękowych (ultradźwiękowych). Hałasem niskoczęstotliwościowym, w tym infradźwiękowym przyjęto nazywać hałas, w którego widmie występują składowe o częstotliwościach od 1 do 200 Hz. Należy pamiętać jednak, że zakresy infradźwiękowy i niskoczęstotliwościowy często w sposób płynny nakładają się na siebie, co w konsekwencji wymaga analizy zarówno sygnałów infradźwiękowych oraz częstotliwości, z zakresu niskoczęstotliwościowego.

2. Charakterystyka badanego obiektu oraz systemu pomiarowego

Badanym obiektem był słupowy transformator rozdzielczy, średniego napięcia obniżający napięcie z 15 kV na 0,4 kV o mocy znamionowej 400 kVA zlokalizowany w powiecie bielskim. Zdjęcie poglądowe transformatora przedstawiono na rysunku 1.



Rysunek 1. Widok poglądowy badanego obiektu [opracowanie własne]

Lokalizacja transformatora była tak dobrana, aby wyeliminować wpływ naturalnych i sztucznych źródeł sygnałów niskoczęstotliwościowych występujących w okolicy badanego obiektu. Zdecydowano się zatem na miejsce na uboczu, z dala od dróg szybkiego ruchu i rwących rzek a pomiar dokonywano w godzinach wieczornych, bądź rannych. Gdy jednak w trakcie wykonywania pomiarów pojawiło się zakłócenie w postaci pracującego ciągnika rolniczego lub przelatującego samolotu, fakt taki był notowany a pomiar powtarzany.

Podczas przeprowadzonych pomiarów hałasu niskoczęstotliwościowego emitowanego przez transformatory elektroenergetyczne mierzoną wielkością fizyczną były zmiany poziomu ciśnienia akustycznego. Do ich rejestracji wykorzystano mikrofon typu pojemnościowego, w którym zmiany ciśnienia akustycznego wprawiają w drgania membranę. Membrana ta jest ruchomą okładziną kondensatora a jej ruch powoduje zmianę pojemności elektrycznej w takt zmian ciśnienia. Mikrofon jest wstępnie polaryzowany. Natomiast obie okładziny są ze sobą połączone rezystorem, dlatego na wyjściu mikrofonu można rejestrować zmiany napięcia proporcjonalne do zmian poziomu ciśnienia akustycznego. Do przeprowadzonych prac badawczych wykorzystano zestaw pomiarowy duńskiej firmy Brüel&Kjær będący w posiadaniu Katedry Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej Politechniki Opolskiej. System składa się z następujących elementów:

- mikrofon pojemnościowy typ 4190 z przedwzmacniaczem typ 2669L firmy Brüel&Kjær,
- miernik LAN-XI typ 3050-A-60 firmy Brüel&Kjær,
- kalibrator akustyczny typ 4231 firmy Brüel&Kjær,
- zestaw osłon wietrznych typ UA-2133 firmy Brüel&Kjær.

Widok zastosowanej aparatury pomiarowej przedstawiono na rysunku 2.



Rysunek 2. Cyfrowy miernik sygnału oraz mikrofon z osłoną przeciwwietrzną
[opracowanie własne]

Zastosowany rejestrator LAN-XI typ 3050-A-060 należy do grupy przyrządów PULSE firmy B&K. PULSE jest platformą sprzętową firmy Brüel&Kjær do wielokanałowej analizy dźwięku i drgań w czasie rzeczywistym. Analizator wielokanałowy PULSE to rozwiązanie technologiczne umożliwiające jednoczesne rejestrowanie dźwięków z wielu źródeł w czasie rzeczywistym. Taka metoda pozwala na śledzenie i analizę wyników już w momencie ich zapisywania. Analizator wielokanałowy umożliwia pracę i przetwarzanie danych jednocześnie różnymi metodami, skracając do minimum czas pomiarów. Dodatkowo rejestrowane dane są na dysku. Wybrane parametry techniczne miernika zestawiono w Tabeli 1.

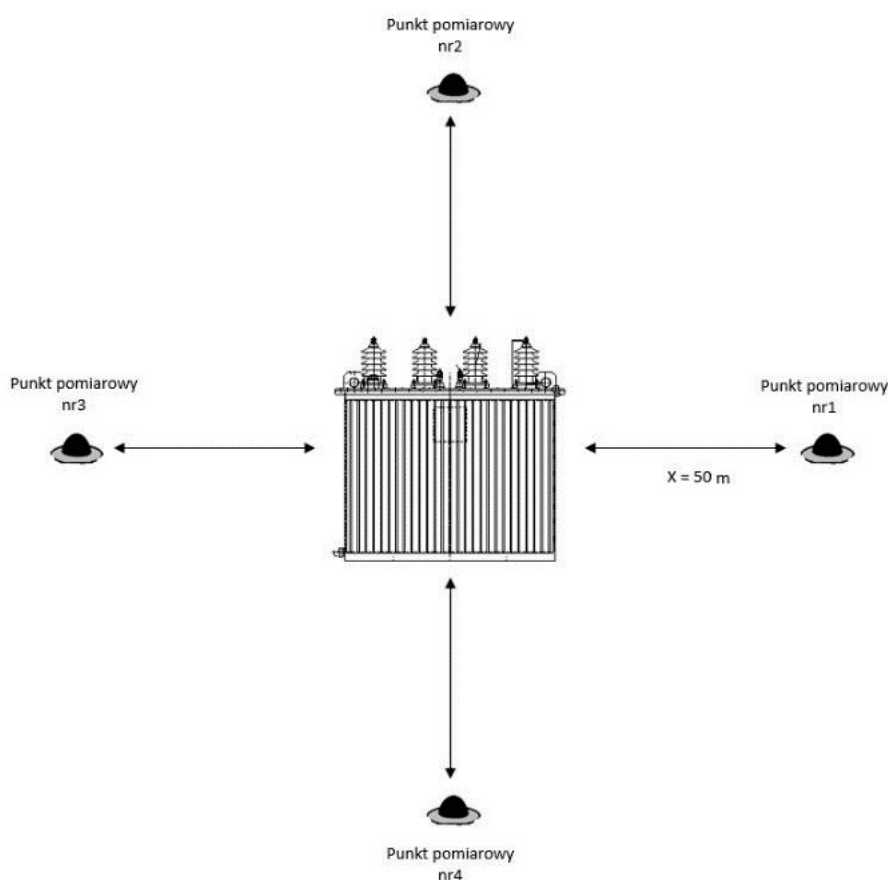
Tabela 1. Wybrane parametry techniczne miernika 3050-A-060 [6]

Cecha	Specyfikacja techniczna
Zakres mierzonych częstotliwości	0,7 ÷ 51,2 kHz
Próbkowanie	131 000 próbek na sekundę
Kwantowanie	2 x 24 bit
Charakterystyka przenoszenia	0,1 dB względem częstotliwości 1 kHz
Zniekształcenia harmoniczne	- 80 dB, typowe: -100 dB dla 1 kHz
Przesłuchy międzykanałowe	-100 dB, typowe: -140 dB

Urządzenia PULSE przystosowane są do szybkiego sporządzania raportów końcowych, dzięki czemu umożliwiają diagnozowanie problemów bezpośrednio po dokonaniu pomiaru. Dodatkowym atutem, jaki wyróżnia analizator wielokanałowy jest prosty interfejs oparty na systemie Windows z możliwością jego indywidualnego dostosowania do potrzeb użytkownika. Platforma PULSE z szerokim zakresem aplikacji programowych i konfiguracji sprzętowych jest jednym z najczęściej wykorzystywanych w pomiarach technicznych profesjonalnych analizatorów wielokanałowych. Kompletną konfigurację toru pomiarowego dokonano z wykorzystaniem oprogramowania narzędziowego PULSE LabShop. Oprogramowanie to umożliwia rejestrację mierzonych sygnałów oraz ich przetwarzanie po zakończeniu pomiarów (w trybie pracy offline) [7, 8].

3. Metodyka pomiarowa

Mierzoną wielkością fizyczną były czasowe zmiany poziomu ciśnienia akustycznego, które nie były przeliczane na adekwatną wartość poziomu mocy akustycznej. Podejście to daje możliwość określenia zakresu potencjalnego oddziaływania sygnałów niskoczęstotliwościowych bezpośrednio w miejscu lokalizacji punktów pomiarowych. Pomiary wykonano na powierzchni gruntu, umieszczając mikrofon na powierzchni odbijającej o średnicy jednego metra, w odległości 50 m od badanego transformatora. Dodatkowo, w celu ograniczenia wpływu zakłóceń, mikrofon został umieszczony pod dwoma osłonami przeciwwietrznymi. Rysunek 3 prezentuje widok zastosowanej metody pomiarowej.



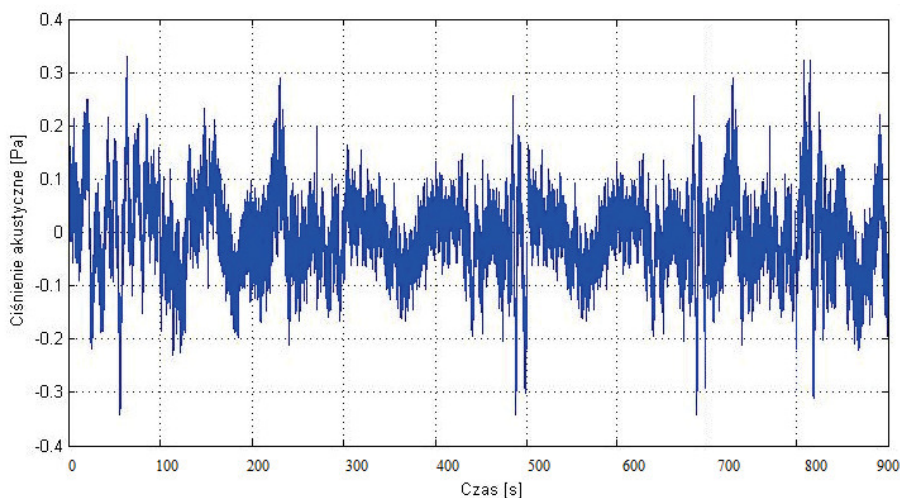
Rysunek 3. Lokalizacja punktów pomiarowych względem badanego transformatora
[opracowanie własne]

Dla wskazanych punktów pomiarowych sygnały niskiej częstotliwości rejestrowano w seriach trwających pod 15 minut każda, przy częstotliwości próbkowania równej 51,2 kS/s. Należy podkreślić, że z analizowanych danych usunięto błędne serie

pomiarowe, w czasie, których występowały dodatkowe źródła sygnałów niskiej częstotliwości, jak poruszające się maszyny rolnicze czy leśne.

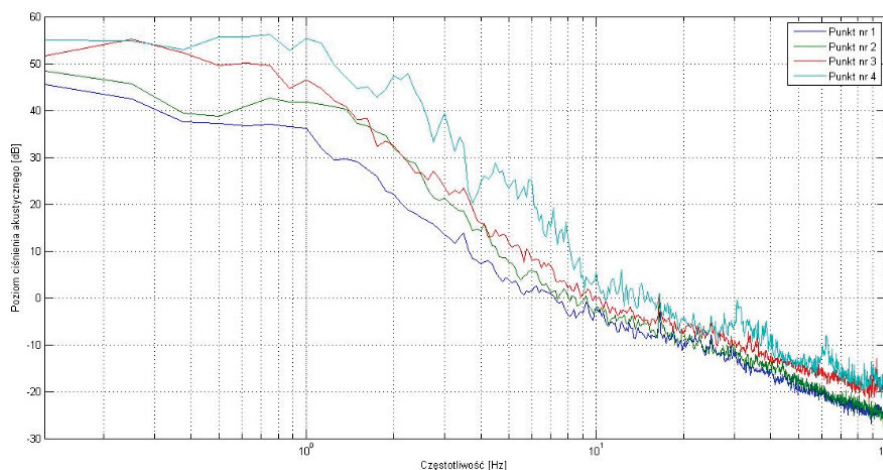
4. Wyniki badań

Pierwszy etap przetwarzania zarejestrowanych sygnałów polegał na wyeksportowaniu wyników pomiarowych w postaci ciągu danych do środowiska Matlab. Dane są przedstawiane jako szeregi czasowe X . W kolejnym kroku wykorzystując skrypty obliczeniowe, dane z wektora X poddano przetwarzaniu przy zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera z oknem Hamminga. Procedura ta definiowana jest jako metoda Welch [9] i umożliwia określenie szacunkowej gęstości widmowej mocy sygnału. Zastosowanie metody Welch ma na celu zminimalizowanie wpływu szumu zewnętrznego poprzez uśrednienie (wygładzanie) chwilowego widma. Zastosowane podczas przekształcania zarejestrowanych sygnałów z dziedziny czasu do dziedziny częstotliwości parametry zostały dobrane na drodze doświadczalnej na podstawie specyfikacji technicznej aparatury badawczej i analizowanego zakresu częstotliwości. Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy i reprezentatywny przebieg zmian ciśnienia akustycznego zachodzący w czasie 15 minutowej serii pomiarowej.



Rysunek 4. Zmiany ciśnienia akustycznego sygnałów niskoczęstotliwościowych generowanych przez transformator rozdzielczy o mocy 400kVA zachodzące w czasie 15 min serii pomiarowej

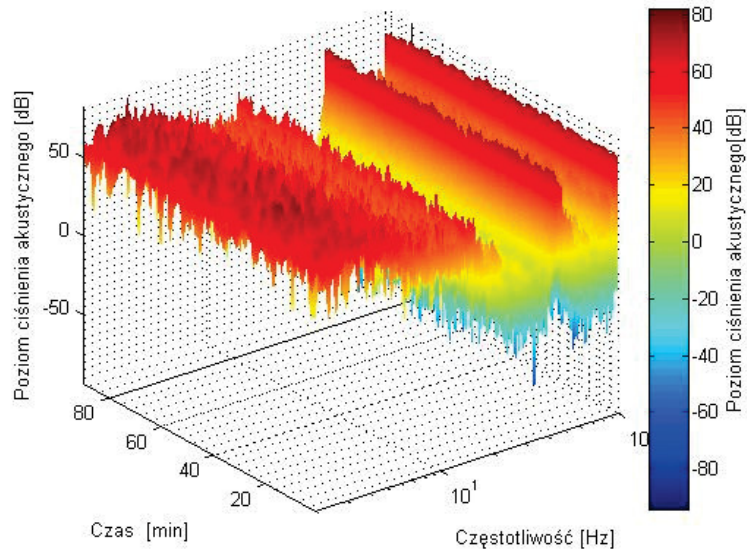
W kolejnym kroku dla zarejestrowanych przebiegów czasowych wyznaczono uśrednione przebiegi widm częstotliwościowych, prezentujące zależność poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości. Podczas analizy skupiono się na przedziale częstotliwości od 1 do 100 Hz. Przebiegi te zilustrowano na rysunku 5. Otrzymane zależności uzyskano poprzez obliczenie średniej arytmetycznej oddzielnie dla wszystkich wartości ciśnienia akustycznego, które zarejestrowano dla danego punktu pomiarowego.



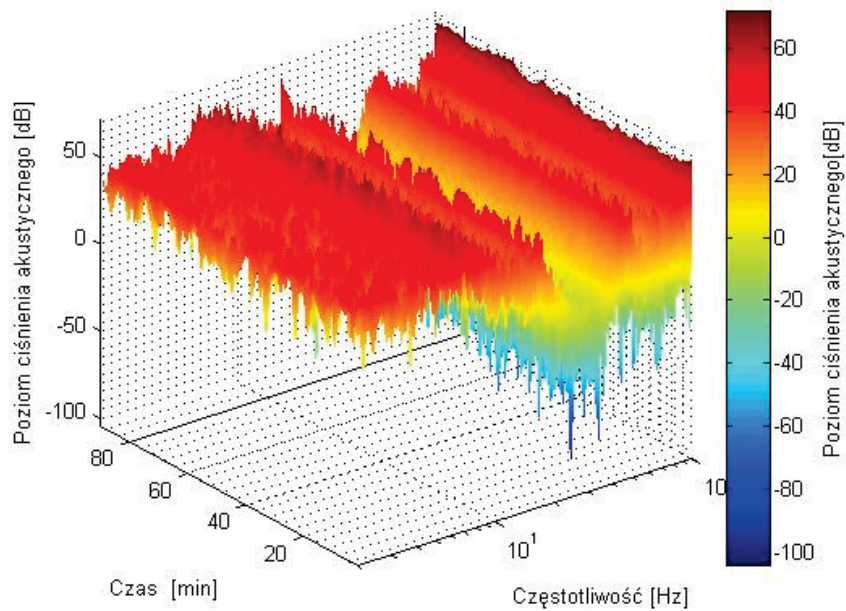
Rysunek 5. *Usrednione widma amplitudowe sygnałów akustycznych niskiej częstotliwości generowanych przez badany transformator*

Na podstawie rysunku 5 można stwierdzić, że wyznaczony poziom ciśnienia akustycznego generowanego hałasu jest porównywalny co do kształtu wyznaczonych przebiegów i dynamiki zmian dla czterech wskazanych punktów pomiarowych oraz dotyczy całego badanego zakresu częstotliwości. Przedział częstotliwości, w którym występują różnice w wartościach poziomu ciśnienia akustycznego pomiędzy transformatorami należy do pasma infradźwięków. Infradźwięki są sygnałami słabo tłumionymi i mogącymi rozchodzić się na znaczne odległości. Największa wartość mierzonych sygnałów występuje również w paśmie infradźwiękowym (do 10 Hz) i zmienia się w zakresie 45-55 dB w zależności od punktu pomiarowego. Wraz ze wzrostem częstotliwości wartość poziomu ciśnienia akustycznego zmniejsza się w sposób zbliżony do liniowego w skali logarytmicznej.

Kolejno dla każdego z punktów pomiarowych wyznaczono trójwymiarowe spektrogramy obliczone, przy zastosowaniu przekształcenia STFT (ang. Short Time Fourier Transform) dla zarejestrowanych zmian poziomu ciśnienia akustycznego. Zaprezentowane spektrogramy opisano stosując skalę w postaci paska palety kolorów, których poszczególne barwy odpowiadają odpowiednim wartościom, wyrażonego w skali logarytmicznej (decybelach), poziomu ciśnienia akustycznego. Wyniki pomiarów uzyskane dla wybranych punktów pomiarowych przedstawione są na rysunku 6 oraz rysunku 7. Uzyskane spektrogramy przedstawiają obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanych zmian poziomu ciśnienia akustycznego, łącznie ze zdarzeniami, które były źródłami zakłóceń.



Rysunek 6. Trójwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych generowanych przez badany transformator dla punktu pomiarowego nr 3



Rysunek 7. Trójwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych generowanych przez badany transformator dla punktu pomiarowego nr 4

Na prezentowanych rozkładach można szczegółowo prześledzić zmiany struktur czasowo-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.

5. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wyników analiz częstotliwościowych i czasowo-częstotliwościowych zarejestrowanych sygnałów niskoczęstotliwościowych można wskazać następujące wnioski:

- transformatory elektroenergetyczne są źródłem sygnałów niskoczęstotliwościowych w tym infradźwiękowych,
- wyznaczone przebiegi widm amplitudowych dla zarejestrowanych sygnałów niskoczęstotliwościowych emitowanych pracą badanych transformatorów osiągają maksymalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości infradźwiękowych z przedziału (1-20) Hz, a kształt widm charakteryzuje się podobnymi zmianami, w postaci zmniejszających się wartości poziomu ciśnienia akustycznego wraz ze wzrostem częstotliwości oraz występowaniem składowych harmonicznymi, dla których występują lokalne skoki (piki) mierzonych wartości,
- obrazy czasowo – częstotliwościowe przedstawione na trójwymiarowych spektrogramach cechują się występowaniem maksymalnych wartości poziomów ciśnienia akustycznego w zakresie niskich częstotliwości tj. (1-10) Hz.

LITERATURA

1. PLAMITZER A.: Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa, 1982, 108-115.
2. YING L., WANG D., WANG J., WANG G., WU X., LIU J. : Power Transformer Spatial Acoustic Radiation Characteristics Analysis under Multiple Operating Conditions, *Energies*, 2018.
3. JAWORSKI M., SZUBA M.: Ocena uciążliwości akustycznej stacji elektroenergetycznych najwyższych napięć, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej* Nr 56, 2017, 33-38.
4. BOCZAR T., BORUCKI S., CICHON A., LORENC M. : The Analysis of Mechanical Vibrations and Acoustic Pressure Level of a Transformer Model, *ACTA PHYSICA POLONICA A, Acoustics, Optical and Acoustical Methods in Science and Technology*, Vol. 114, 2008, A19-A24.
5. PAWLAS K., PAWLAS N., BOROŃ M., SZŁAPA P., ZACHARA J.: Infrasound and Low Frequency Noise Assessment at Workplaces and Environment – Review of Criteria, *Environmental Medicine*, 16(1), 2013, 82-89.
6. Brüel & Kjør 4/6-ch. Input Module LAN-XI 51.2 kHz Type 3050 – product data.
7. LAN-XI: Data Acquisition Hardware for PULSE™ – product data.

8. JANCARCZYK D., BERNAŚ M., BOCZAR T.: Distribution Transformer Parameters Detection Based on Low-Frequency Noise Machine Learning Methods and Evolutionary Algorithm, *Sensors*, 2020.
9. GUPTA H. R., MEHRA R.: Power Spectrum Estimation Using Welch Method for Various Window Techniques, *Int. J. of Sci. Res. Eng. & Tech.*, 2(2013)3, 389-392.