

ANALIZA PORÓWNAWCZA HAŁASU INFRADŹWIĘKOWEGO GENEROWANEGO PRACĄ TRANSFORMATORÓW ELEKTROENERGETYCZNYCH

Daniel JANCARCZYK¹, Marcin BERNAS², Marcin SIDZINA³, Jarosław JANUSZ⁴

1. Akademia Techniczno - Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
tel.: 33 827 92 62 e-mail: djancarczyk@ath.bielsko.pl
2. Akademia Techniczno - Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
tel.: 33 827 92 62 e-mail: mbernas@ath.bielsko.pl
3. Akademia Techniczno - Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
tel.: 33 827 93 61 e-mail: msidzina@ath.bielsko.pl
4. Akademia Techniczno - Humanistyczna w Bielsku-Białej, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
tel.: 33 827 93 61 e-mail: jjanusz@ath.bielsko.pl

Streszczenie: W ramach artykułu przedstawiono wyniki analizy porównawczej poziomu ciśnienia akustycznego hałasu infradźwiękowego generowanego przez dwa transformatory elektroenergetyczne średniego napięcia o znamionowych mocach pozornych 250 kVA oraz 1250 kVA. Porównanie, zawarte w części wynikowej, oparto na analizie widm częstotliwości i spektrogramów, które wyznaczono dla zarejestrowanych sygnałów niskoczęstotliwościowych. Uzyskana charakterystyka hałasu infradźwiękowego, dla poszczególnych transformatorów, uwzględnienia lokalizację punktów pomiarowych względem miejsca emisji i jej wpływ na uzyskane wartości poziomu ciśnienia akustycznego. Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie wielkości oddziaływania infradźwiękowego badanych transformatorów oraz zmian widma emitowanego hałasu w ich otoczeniu.

Słowa kluczowe: transformatory elektroenergetyczne, infradźwięki, hałas, poziom ciśnienia akustycznego.

1. WPROWADZENIE

Transformatory energetyczne uznane są za źródła hałasu niskoczęstotliwościowego. Ma on charakter stacjonarny, o widmie z wyraźnie wyróżnionymi składnikami dla częstotliwości stanowiących wielokrotność podwójnej częstotliwości sieci elektroenergetycznej. Podstawowym źródłem hałasu są drgania rdzenia spowodowane zjawiskiem magnetostrykcji. Transformatory coraz częściej umieszczane są na terenach wypoczynku i rekreacji oraz w obrębie osiedli mieszkaniowych. Bliskie sąsiedztwo terenów zamieszkałych wymusza stosowanie ostrych norm [1] dotyczących ich parametrów akustycznych i podejmowanie działań w kierunku ograniczenia promieniowanej przez nie energii akustycznej, natomiast nie ma norm dotyczących hałasu infradźwiękowego. Hałas wytwarzany przez transformator, jak wspomniano w wstępie, związany jest z występowaniem zjawiska magnetostrykcji [2]. Materiał ferromagnetyczny stanowiący rdzeń transformatora w zmiennym polu magnetycznym zmienia swoje rozmiary. Odształcanie rdzenia transformatora umieszczonego wewnątrz uzwojenia, przez

który płynie prąd zmienny, powoduje jego drgania z częstotliwością równą podwójnej częstotliwości prądu. Jest to spowodowane faktem, że zmiana wymiarów rdzenia towarzyszy bezwzględnej zmianie wartości natężenia pola magnetycznego niezależnie od kierunku zmian. Ponieważ częstotliwość sygnału w systemach elektroenergetycznych w zależności od kraju wynosi 50Hz lub 60Hz transformatory energetyczne są klasycznym wręcz przykładem źródeł hałasu niskoczęstotliwościowego.

Hałasem infradźwiękowym przyjęto nazywać hałas, w którego widmie dominującą rolę odgrywają niskie częstotliwości do 20 Hz zgodnie z normą PN-ISO 7196:2002 [3]. Brak jest standaryzacji dźwięków o niskich częstotliwościach, jednak większość naukowców zakres tych częstotliwości określa w granicach od 10 do 200 Hz [4].

Problem hałasu infradźwiękowego generowanego przez nowe oraz wyeksploatowane transformatory elektroenergetyczne wymaga przeprowadzenia szerokiego zakresu badań. Należy jednoznacznie określić referencyjne metodyki pomiarowe, sposoby analizy oraz ocenę uciążliwości generowanego hałasu. Pomimo, że udowodniono szkodliwe działanie infradźwięków na środowisko naturalne [5], nie badano transformatorów jako ich źródła. Warto zwrócić również uwagę na fakt, że ocenę uciążliwości hałasu infradźwiękowego przeprowadza się jedynie na stanowiskach pracy [6].

W ramach badań podjęto próbę określenia poziomu hałasu infradźwiękowego generowanego przez transformatory elektroenergetyczne, pracujące w warunkach znamionowych. Badaniom poddano transformatory rozdzielcze obniżające napięcie z 15 kV na 0,4 kV zarówno o izolacji olejowej, jak również suchej o znamionowych mocach pozornych równych 250 kVA oraz 1250 kVA. W przeprowadzonych badaniach zastosowano aparaturę pomiarową firmy Brüel&Kjær i skupiono się jedynie 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.

Zakres wykonanych analiz obejmuje wyznaczenie przebiegów obrazujących zmiany poziomu ciśnienia akustycznego w funkcji częstotliwości (widma amplitudowe) i w dziedzinie czasowo-częstotliwościowej (spektrogramy). W celach porównawczych charakterystyki wyznaczono oddzielnie dla dwóch badanych transformatorów oraz dla wybranych punktów pomiarowych.

2. CHARAKTERYSTYKA APARATURY POMIAROWEJ ORAZ BADANYCH TRANSFORMATORÓW

Pierwszym badanym obiektem był transformator napowietrzny średniego napięcia (15 kV / 0,4 kV) o mocy pozornej 250 kVA (Transformator 1), przedstawiony na rysunku 1. Obiekt zlokalizowany jest w miejscowości Jasienica w województwie śląskim.



Rys. 1. Transformator napowietrzny o mocy pozornej 250kVA (Transformator 1)

Drugim badanym obiektem był transformator wewnątrzowy średniego napięcia (15 kV / 0,4 kV) żywicznym typ: TRICAST 1250/15 firmy Schneider Electric o mocy pozornej 1250kVA (Transformator 2), przedstawiony na rysunku 2. Obiekt zlokalizowany jest w miejscowości Bielsko-Biała w województwie śląskim.

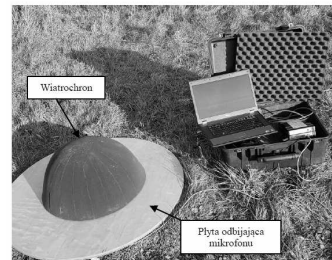


Rys. 2. Transformator wewnątrzowy o mocy pozornej 1250kVA (Transformator 2)

Do rejestracji sygnałów niskoczęstotliwościowych wykorzystano układ pomiarowy składający się z mikrofonu pojemnościowego typ 4190 zaprojektowanego do dokładnych pomiarów w polu swobodnym, podłączonego z przedwzmacniaczem typ 2669L firmy Brüel&Kjær oraz cyfrowego miernika sygnału z funkcją rejestracji LAN-XI typ 3050-A-60 firmy Brüel&Kjær. 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, takich jak: diagnostyka maszyn, analiza modalna oraz badania elektroakustyczne przetworników akustycznych [2]. W przypadku używanego zestawu, zakres mierzonych częstotliwości zawierał się w przedziale od 0,7 Hz do 20 kHz.

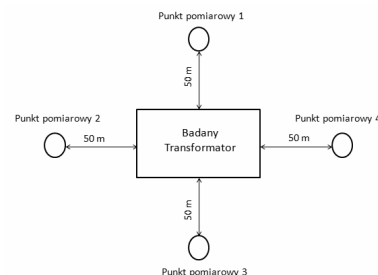
Przed rozpoczęciem pomiarów przeprowadzano kalibrację układu pomiarowego przy wykorzystaniu kalibratora akustycznego typ 4231 firmy Brüel&Kjær. Dodatkowo do pomiarów użyto ochron przeciwwietrznych oraz okrągłej odbijającej powierzchni pomiarowej o średnicy 1 m, które stanowiły zestaw UA-2133 firmy Brüel&Kjær (rys. 3).



Rys.3. Widok płyty odbijającej oraz wiatrochronu dla zastosowanego mikrofonu typ 4190

Do obsługi zastosowanego miernika wykorzystano komputer wraz z dedykowanym oprogramowaniem, który połączono z systemem pomiarowym przewodem typu LAN. Wszystkie parametry pracy definiowano za pomocą aplikacji PULSE LabShop, która stanowi integralną część zestawu pomiarowego. Oprogramowanie to, oprócz możliwości dokładnego skonfigurowania przyrządu, umożliwia rejestrację mierzonych sygnałów oraz ich wstępne przetwarzanie i wizualizację w trybie off-line. Do analizy zarejestrowanych sygnałów niskoczęstotliwościowych wykorzystano metodę Welch [7], która umożliwia określenie szacunkowej widmowej gęstości mocy sygnału. Parametry metody dostosowano do charakterystyki aparatury badawczej oraz analizowanego przedmiotu częstotliwości.

Pomiary poziomu ciśnienia akustycznego hałasu niskoczęstotliwościowego generowanego przez badane transformatory (Transformator 1 oraz Transformator 2) wykonano kolejno w czterech punktach referencyjnych, rozmieszczonych wokół transformatora co 90⁰ w odległości 50 m od źródła emisji (rys. 4).

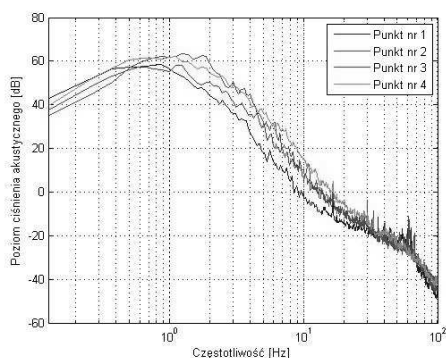


Rys.4. Schemat poglądowy rozmieszczenia punktów pomiarowych względem badanego transformatora

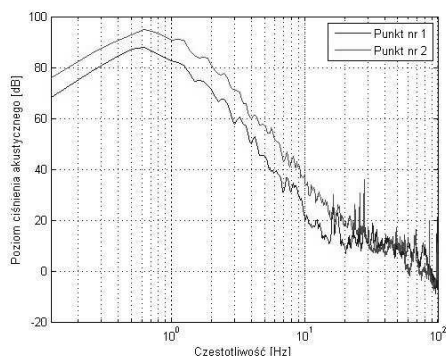
3. ANALIZA OTRZYMANYCH WYNIKÓW

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej poziomu ciśnienia akustycznego pochodzącego od hałasu

infradźwiękowego generowanego przez badane transformatory dokonano wyboru czterech punktów pomiarowych oznaczonych: Punkt 1, Punkt 2, Punkt 3, Punkt 4 (rys. 4), które w sposób reprezentatywny obrazują zakres rejestrowanych zmian. Przebiegi uśrednionych widm [8] częstotliwościowych wyznaczonych dla badanych transformatorów przedstawiono odpowiednio na rysunku 5 (Transformator 1) i na rysunku 6 (Transformator 2). Otrzymane zależności uzyskano poprzez obliczenie średniej arytmetycznej oddzielnie dla wszystkich wartości ciśnienia akustycznego, które zarejestrowano w danym punkcie pomiarowym. Wyznaczone wartości wyrażono w decybelach odnosząc je względem progu słyszenia tj. $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa.



Rys.5. Uśrednione widma amplitudowe ciśnienia akustycznego niskiej częstotliwości generowanego przez Transformator 1 dla czterech punktów pomiarowych



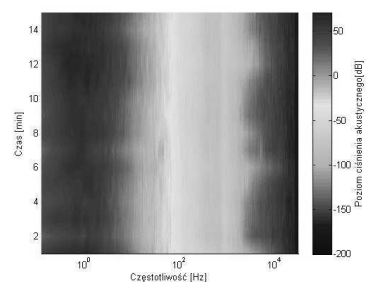
Rys.6. Uśrednione widma amplitudowe ciśnienia akustycznego niskiej częstotliwości generowanego przez Transformator 2 dla dwóch punktów pomiarowych

Dla Transformatora 1 wyznaczone poziomy ciśnienia akustycznego generowanego hałasu jest porównywalny dla czterech punktów pomiarowych oraz dotyczy całego badanego zakresu częstotliwości. Największa wartość mierzonych sygnałów występuje w paśmie infradźwiękowym (do 20 Hz). Wraz ze wzrostem częstotliwości wartość ciśnienia akustycznego zmniejsza się w sposób zbliżony do liniowego w skali logarytmicznej.

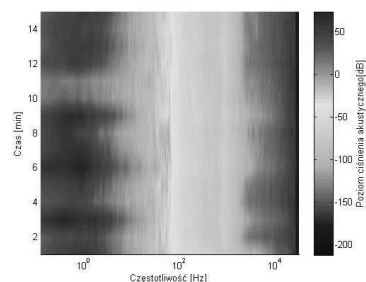
W przypadku Transformatora 2 przeprowadzono pomiary tylko w punktach 1 i 2 (rys. 4), ponieważ transformator ten jest transformatorem przyłączeniowym w zakładzie produkcyjnym oraz ma budowę wnętrzą co znacznie ogranicza jego dostępność. Kształt uśrednionych widm amplitudowych dla punktów pomiarowych jest zbliżony, natomiast zauważalna jest różnica w wartości poziomu ciśnienia akustycznego, która wynosi ok. 8dB i utrzymuje się do częstotliwości 15 Hz. Między częstotliwością 15 a 100 Hz można wyróżnić kilka

charakterystycznych składowych harmoniczných. Pierwsza z nich, której poziom był największy, znajduje się w paśmie od 15 do 20 Hz, następną z kolei w paśmie od 20 do 30 Hz. Są to zakłócenia, których źródłem mogły być pracujące maszyny w fabryce lub komin elektrociepłowni zlokalizowany w pobliżu badanego transformatora. Oba te czynniki są w literaturze uznawane jako źródła hałasu niskoczęstotliwościowego.

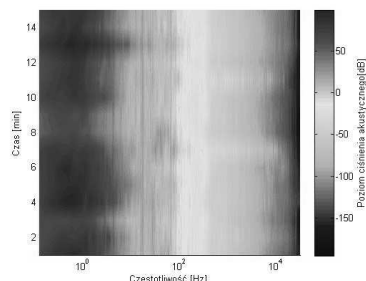
W kolejnym kroku analizy obliczono, osobno dla każdego z badanych transformatorów oraz wybranych punktów pomiarowych, dwuwymiarowe spektrogramy. Przedstawiają one obrazy czasowo-częstotliwościowe zarejestrowanego poziomu ciśnienia akustycznego. Zaprezentowane spektrogramy opisano stosując skalę w postaci paska palety kolorów, których poszczególne barwy odpowiadają odpowiednim wartościom, wyrażonego w skali logarytmicznej (decybelach), poziomu ciśnienia akustycznego.



Rys.7. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych generowanych przez transformator elektroenergetyczny (Transformator 1 punkt 1)



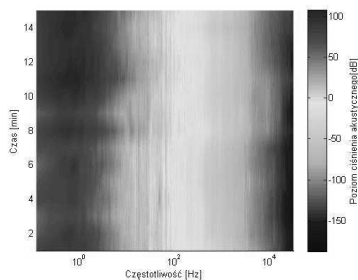
Rys.8. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych generowanych przez transformator elektroenergetyczny (Transformator 1 punkt 2)



Rys.9. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych generowanych przez transformator elektroenergetyczny (Transformator 2 punkt 1)

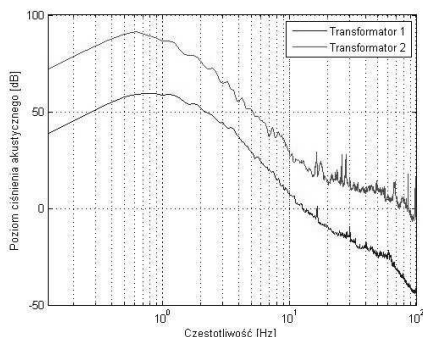
Analizując wyznaczone spektrogramy dla Transformatora 1 (rys. 7 i 8), można stwierdzić, że charakterystyczne są prążki przedstawiające podwyższone poziomy ciśnienia akustycznego dla pasma częstotliwości infradźwiękowych (do ok. 10 Hz).

W przypadku Transformatora 2 (rys. 9 i 10), wartość ciśnienia akustycznego dla pasma niskich częstotliwości jest znacznie wyższa w stosunku do pierwszego transformatora.



Rys.10. Dwuwymiarowy spektrogram sygnałów akustycznych generowanych przez transformator elektroenergetyczny (Transformator 2 punkt 2)

Ponadto w celach porównawczych zestawiono na pojedynczej charakterystyce dwa uśrednione przebiegi widm częstotliwościowych osobno dla każdego z transformatorów (rys. 11).



Rys.11. Uśrednione widma amplitudowe ciśnienia akustycznego niskiej częstotliwości generowanego przez badane transformatory

Porównanie uśrednionych widm amplitudowych obu transformatorów (rys. 11), wskazuje na większe oddziaływanie akustyczne Transformatora 2, których wartości w całym analizowanym paśmie częstotliwości są większe od poziomów emitowanych przez Transformator 1.

4. WNIOSKI KOŃCOWE

Dokonano analizy hałasu infradźwiękowego generowanego przez dwa transformatory o różnej budowie i mocy pozornej. W obu przypadkach uzyskano zbliżone pod względem kształtu przebiegi uśrednionych widm amplitudowych, a także podobny charakter zmian czasowo-

częstotliwościowych. Przebiegi charakteryzują się stosunkowo dynamicznie zmniejszającymi się (wykładniczo) wartościami zarejestrowanego ciśnienia akustycznego (średnio o ok. 40 dB), które występuje wraz ze wzrostem częstotliwości w przedziale od 10 Hz do 100 Hz. Największa wartość poziomu ciśnienia akustycznego, występuje zawsze w okolicach 1 Hz. Odpowiednio dla Transformatora 1 jest to średnio 55 dB, a dla Transformatora 2 odpowiednio 95 dB.

Reasumując, na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że podczas pracy badanych transformatorów elektroenergetycznych generowany jest hałas akustyczny zawierający składowe infradźwiękowe, przy czym mniejsze poziomy ciśnienia akustycznego występują dla transformatora napowietrznego mniejszej mocy (Transformator 1).

Następnym etapem badań będzie wykonanie analogicznych pomiarów dla innych typów transformatorów różniących się konstrukcją, wielkością mocy, jak również czasem eksploatacji. Przeprowadzenie tego typu analiz umożliwi dokonanie uogólnionej oceny stopnia oddziaływania hałasu infradźwiękowego powstającego wokół pracujących transformatorów.

5. BIBLIOGRAFIA

1. PN-EN 60076-10:2003, Transformatory Część 10: Wyznaczanie poziomów dźwięku.
2. Majer K.: Obliczanie hałasu emitowanego przez transformatory, Przegląd Elektrotechniczny, nr 2, 2015.
3. PN-ISO 7196:2002, Akustyka - Charakterystyka częstotliwościowa filtru do pomiarów infradźwięków.
4. 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, s. 82-89.
5. Hensela J., Scholza G., Hurrtega U., Mrowinska D., Janssenb T.: Impact of infrasound on the human cochlea, Hearing Research, Vol. 233, 2007, s. 67-76.
6. Malec T., Boczar T., Wotzka D.: Analiza porównawcza hałasu infradźwiękowego emitowanego przez turbiny wiatrowe różnych mocy, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 9, 2012, s. 773-778.
7. Welch P.: The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms, IEEE Transactions on audio and electroacoustics, 15(2), 1967, s.70-73.
8. Hanus R.: Uśrednianie sygnałów, Pomiary Automatyka Kontrola, nr 12, 2007, s.108-110.

COMPARATIVE ANALYSIS OF INFRASOUND NOISE EMITTED BY TRANSFORMERS

The subject area of this article applies to study of infrasound signals generated by transformers. The tests were carried out on medium voltage transformers which reduce the voltage from 15 kV to 0.4 kV, using oil and dry insulation with nominal apparent power in the range from 250 kVA to 1250 kVA. Moreover, the transformers working in overhead and indoor were compared. The aim of the analyzes was to determine the frequency spectra of the recorded infrasound signals and to calculate the corresponding spectrograms. For comparative purposes, the characteristics presented in this paper, were calculated separately for the analyzed transformers taking into account four selected measurement points located around the transformers.

Keywords: transformers, infrasound, low - frequency noise, pulse labshop.