



Politechnika Lubelska

Wydział Mechaniczny



**Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
i Mechatroniki**

Laboratorium nr 1
Lokalizacja źródeł hałasu

Laboratorium nr 2
Wyznaczanie mocy akustycznej metodą przybliżoną_{wersja2}

Opracował:

Dr inż. Łukasz Jedliński

LUBLIN 2016

1. Cel i zakres laboratorium

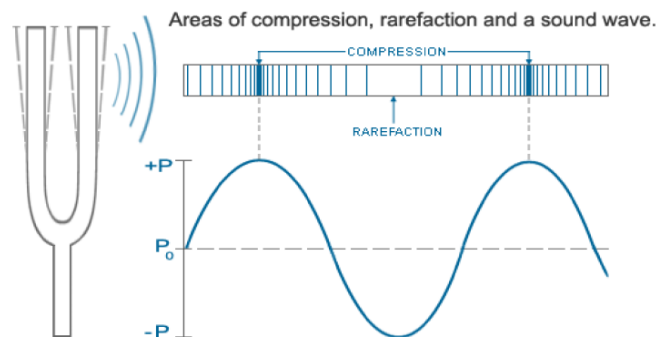
Głównym celem laboratorium jest nabycie przez studentów praktycznych umiejętności przeprowadzania pomiarów akustycznych oraz zapoznania się przez nich z urządzeniami pomiarowymi, służącymi do lokalizacji źródeł hałasu i określenia poziomu ciśnienia akustycznego. Ponadto posiadają oni wiedzę na temat wyznaczania mocy akustycznej urządzeń na podstawie poziomu ciśnienia akustycznego i interpretacji widma sygnału akustycznego.

2. Informacje ogólne

Pomiar parametrów dźwięków występujących w środowisku wykonuje się w celu:

- ochrony człowieka i przyrody (np. pomiar hałasu na stanowisku pracy, pomiar hałasu generowanego przez ruch uliczny, atesty nowych urządzeń),
- diagnostyki (np. maszyn, ludzi),
- poprawy akustyki (np. instrumentów muzycznych, sal koncertowych i głośników).

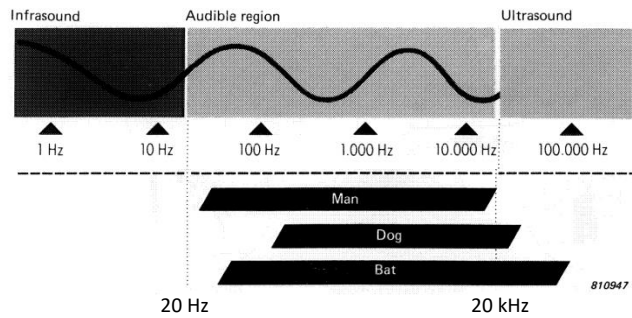
Dźwięk jest to zmiana ciśnienia ośrodka (sprężystego), które jest w stanie odczuć ludzkie ucho. Cząsteczki ośrodka drgają wokół położenia równowagi, zagęszczając i rozrzedzając go. Zaburzenie to przekazywane jest na inne cząsteczki, tworząc **falę dźwiękową** (rys. 1). Dwa podstawowe parametry określają właściwości dźwięku: wartość ciśnienia i częstotliwość jego zmian. Człowiek jest w stanie usłyszeć dźwięk o minimalnym ciśnieniu (próg słyszalności) $20 \mu\text{Pa} = 0 \text{ dB}$ dla tonu¹ o częstotliwości 1000 Hz a ból sprawia ciśnienie 20 Pa (120 dB). Dźwięki o niższym ciśnieniu są niesłyszalne a o wyższym mają bardzo poważne konsekwencje dla zdrowia nawet przy krótkotrwałym oddziaływaniu. Również, aby dźwięk był słyszalny, jego najmniejsza częstotliwość zmian ciśnienia musi wynosić $16 \div 20$ razy na sekundę ($16 \div 20 \text{ Hz}$) a górna granica to nie więcej niż 20 000 zmian na sekundę (20 kHz).



Rys. 1. Fala dźwiękowa i odpowiadające jej ciśnienie akustyczne [Osha]

Niesłyszalne dźwięki o częstotliwości poniżej 20 Hz nazywają się **infradźwiękami** a powyżej 20 kHz **ultradźwiękami** (rys.2). **Hałas** jest to natomiast dźwięk, który jest nieprzyjemny, uciążliwy oraz może być szkodliwy dla człowieka.

¹ Ton – dźwięk prosty o przebiegu sinusoidalnym, mający tylko jedną częstotliwość.

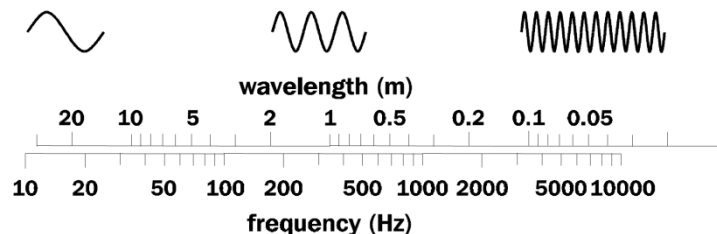


Rys. 2. Przybliżony zakresy słyszalności wybranych ssaków [B&K Noise control]

Znając częstotliwość dźwięku i prędkość rozchodzenia się w danym ośrodku (powietrze 344 m/s, stal 5000 m/s), **długość fali** można obliczyć z zależności:

$$\text{Długość fali} = \frac{\text{Prędkość dźwięku}}{\text{Częstotliwość}} \quad (1)$$

Ze wzoru (1) wynika, że długości fal akustycznych w paśmie słyszalnym są w zakresie od 17,2 m do 0,0172 m (rys. 3).



Rys. 3. Zależność między częstotliwością a długością fali akustycznej [Hansen]

Głośność dźwięku, jak już zaznaczono, związana jest z amplitudą ciśnienia. Postępowanie się jednostką ciśnienia byłoby kłopotliwe ze względu na szeroki zakres wartości dla fal dźwiękowych. Dlatego wprowadzono jednostki względne w decybelach (dB). **Poziom ciśnienia akustycznego L_p** obliczany jest z zależności:

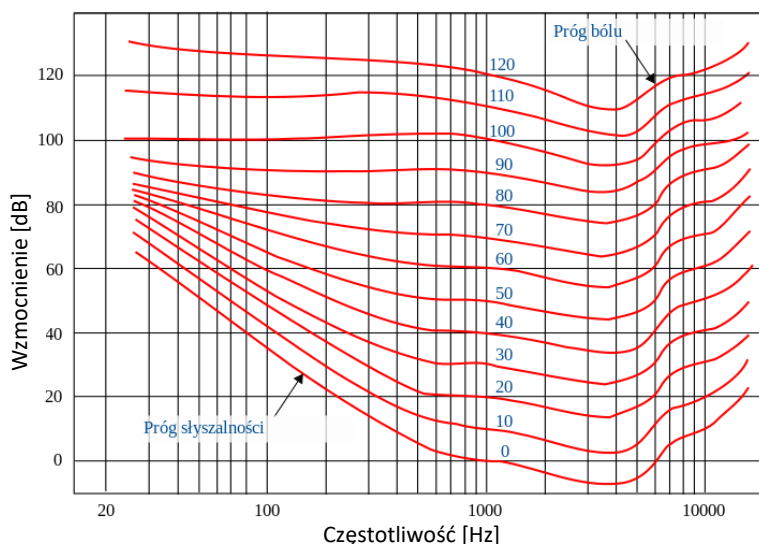
$$L_p = 10 \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad [\text{dB}] \quad (2)$$

gdzie: p – wartość ciśnienia akustycznego [Pa],

p_0 – ciśnienie odniesienia równe $20 \mu\text{Pa} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa}$ [N/m²] (jest to minimalna wartość ciśnienia odczuwalna przez człowieka dla tonu o częstotliwości 1000 Hz).

Zatem decybele są jednostką logarymiczną, wyrażającą względny stosunek dwóch wielkości za pomocą liczb ze stosunkowo małego zakresu. Najmniejsza odczuwalna zmiana głośności wynosi około 1 dB.

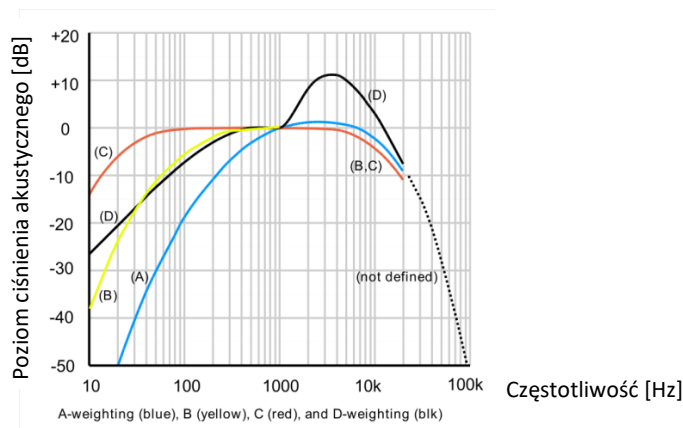
Odbiór dźwięków przez człowieka przebiega w sposób nieliniowy. Dwukrotne zwiększenie ciśnienia akustycznego nie jest odbierane jako dwukrotny wzrost głośności. Podwójne zwiększenie głośności występuje przy zmianie poziomu ciśnienia akustycznego o 10 dB (dwukrotna zmiana ciśnienia akustycznego to 6 dB). Dodatkowo taka sama zmiana ciśnienia dla różnych częstotliwości (tonów) np. 50 Hz i 500 Hz odczuwana jest jako różna zmiana głośności, co więcej uzależnione jest to od pierwotnej wartości ciśnienia. Dobrze obrazują to izofony, czyli krzywe jednakowego poziomu głośności (rys. 4).



Rys. 4. Krzywe izofoniczne [Wiki]

Z powyższego rysunku wynika, że ucho ludzkie jest najbardziej czułe w zakresie od 1000 Hz do 6000 Hz, natomiast tony niskie i wysokie są słabiej odczuwalne. Ton o częstotliwości 100 Hz, aby był słyszalny, musi mieć poziom ciśnienia akustycznego ≈ 35 dB ($\approx 1125 \mu\text{Pa}$). Dla przypomnienia, dla tonu 1000 Hz wystarczy 0 dB ($20 \mu\text{Pa}$).

Pomiar dźwięku odbywa się za pomocą mikrofonu, który reaguje na zmianę ciśnienia akustycznego. Wyniki mogą być wyświetlane m.in. w paskalach Pa (dla ciśnienia akustycznego p) lub decybelach dB (dla poziomu ciśnienia akustycznego L_p). Tak uzyskane wartości nie odpowiadają jednak wrażeniom słuchowym ludzi. Aby uwzględnić czułość człowieka na dźwięki zostały wprowadzone **krzywe korekcyjne A, B, C i D** (rys. 5). Najczęściej stosowana jest krzywa korekcyjna A, gdyż jest najbardziej zgodna z postrzeganiem dźwięków przez ludzi oraz w większości przypadków wymagana jest przy pomiarach przeprowadzanych zgodnie z normami. Teoretycznie krzywa A stosowana jest do dźwięków cichych (\approx do 55 fonów²), krzywa B o średniej głośności ($\approx 55 \div 85$ fonów), krzywa C powyżej 85 fonów a krzywa D dla bardzo dużej głośności jak np. hałas lotniczy. W przyrządach pomiarowych krzywe korekcyjne uzyskiwane są poprzez zastosowanie odpowiednich filtrów. Charakterystyka filtru dla krzywej korekcyjnej A jest w przybliżeniu odwróconą krzywą izofony o wartości 40 fonów. Zastosowanie krzywej korekcyjnej w trakcie pomiaru powoduje tłumienie niskich i wysokich częstotliwości. **Poziom dźwięku**, czyli poziom ciśnienia akustycznego, wyznaczony z użyciem krzywej korekcyjnej, dla krzywej A zapisuje się jako dB(A). Analogicznie zapisuje się wartości uzyskane dla innych krzywych.



Rys. 5. Krzywe korekcyjne A, B, C, D [Wiki]

² Fon – jest to jednostka poziomu głośności. Dźwięki o takiej samej liczbie fonów niezależnie od częstotliwości wywołują takie samo wrażenie głośności. Dla tonu o częstotliwości 1000 Hz liczba fonów równa jest liczbie decybeli [dB].

W przypadku oceny głośności maszyn nie jest jednoznaczne podanie wartości poziomu ciśnienia akustycznego. Miara ta bowiem zależy od odległości od źródła dźwięku oraz akustyki miejsca pomiarowego (jak stopień absorpcji, wielkość pomieszczenia). Pierwotnym procesem jest rozpraszanie energii w postaci dźwięku, dlatego lepszą miarą w tym przypadku jest **moc akustyczna W** wyrażona w watach [W]. Z tych samych powodów co dla ciśnienia akustycznego, moc podawana jest najczęściej w decybelach jako **poziom mocy akustycznej L_W** :

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} \text{ [dB]} \quad (3)$$

gdzie: W – wartość mocy akustycznej [W],
 W_0 – moc odniesienia $1 \cdot 10^{-12} \text{ W} = 1 \text{ pW}$.

Bezpośredni pomiar mocy akustycznej jest niemożliwy. Obliczenie jej może być wykonane na podstawie pomiaru ciśnienia akustycznego metodą bezpośrednią lub pośrednią. Przy zastosowaniu krzywej korekcyjnej mikrofonu w trakcie pomiarów wyznaczona zostaje **skorygowana moc akustyczna** np. L_{WA} . Pomiar wykonywane są w polu swobodnym albo rozproszonym. Warunki takie można uzyskać w komorze bezchowej lub pogłosowej. Dla pomiarów wykonywanych in situ wygodnie jest zmierzyć natężenie dźwięku. **Natężenie dźwięku I** jest określone jako ilość energii w odniesieniu do powierzchni 1 m^2 a **poziom natężenia dźwięku L_I** wyznaczany jest z zależności:

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} \text{ [dB]} \quad (4)$$

gdzie: I – wartość natężenia dźwięku [W/m^2],
 I_0 – natężenie odniesienia $1 \cdot 10^{-12} \text{ W}/\text{m}^2 = 1 \text{ pW}/\text{m}^2$.

Poziom mocy akustycznej oblicza się mnożąc pole powierzchni pomiarowej i poziom natężenia dźwięku:

$$W = I \cdot S \text{ [W]} \quad (5)$$

gdzie: S – pole powierzchni pomiarowej [m^2].

W polu akustycznym swobodnym między natężeniem dźwięku a ciśnieniem akustycznym zachodzi zależność:

$$I = \frac{p_{rms}^2}{\rho \cdot c} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (6)$$

gdzie: p_{rms}^2 – wartość skuteczna ciśnienia akustycznego [Pa],
 ρ – gęstość ośrodka [kg/m^3], powietrze $\approx 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$,
 c – prędkość rozchodzenia się fali w ośrodku [m/s], w powietrzu $\approx 344 \text{ m}/\text{s}$.

Dla źródła punktowego³ i pola swobodnego⁴ można obliczyć poziom mocy akustycznej na podstawie poziomu ciśnienia akustycznego:

$$L_W = L_p + 10 \log \left(\frac{4\pi r^2}{S_0} \right) \text{ [dB]} \quad (7)$$

gdzie: r^2 – odległość od źródła dźwięku do punktu pomiarowego [m],
 $4\pi r^2$ – licznik ułamka – pole powierzchni kuli,
 S_0 – pole powierzchni odniesienia równe 1 m^2 .

³ Źródło punktowe – jeśli wielkość emitera dźwięku jest mała w porównaniu do odległości pomiarowej, to taki emitery nazywamy źródłem punktowym.

⁴ Pole swobodne – jest to pole akustyczne (obszar powstawania i występowania fal dźwiękowych) w jednorodnym ośrodku, w którym nie występują fale odbite. W takim polu dla źródła punktowego przy dwukrotnej zmianie odległości od emitera zachodzi spadek poziomu ciśnienia akustycznego o 6 db.

W przypadku pomiaru w polu swobodnym nad płaszczyzną odbijającą dźwięk i przy wyborze półkulistej powierzchni pomiarowej wzór przyjmuje postać:

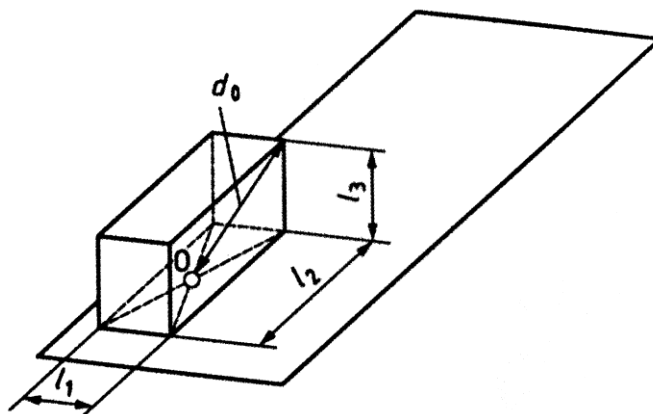
$$L_W = L_p + 10 \log \left(\frac{2\pi r^2}{S_0} \right) \text{ [dB]} \quad (8)$$

gdzie: r^2 – odległość od źródła dźwięku do punktu pomiarowego [m],

$2\pi r^2$ – licznik ułamka – pole powierzchni półkuli,

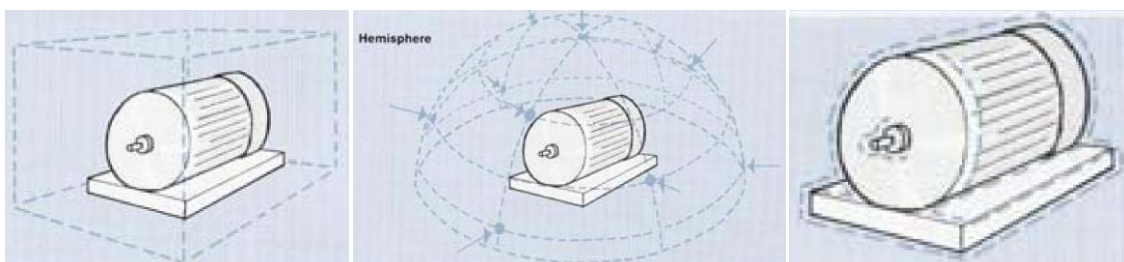
S_0 – pole powierzchni odniesienia równe 1 m^2 .

Przystępując do pomiarów należy ustalić prostopadłościan odniesienia. Określony jest on jako hipotetyczny najmniejszy prostopadłościan otaczający obiekt badań z początkiem układu współrzędnych w punkcie O . Dla jednej płaszczyzny odbijającej dźwięk⁵ wymiar charakterystyczny źródła d_0 ⁶ wyznaczany jest jak na rysunku 6.



Rys. 6. Prostopadłościan odniesienia z zaznaczonym wymiarem charakterystycznym źródła $d_0 = \sqrt{(l_1/2)^2 + (l_2/2)^2 + l_3^2}$ [m] dla jednej płaszczyzny odbijającej dźwięk [EN ISO 3746:2010]

Wyznaczając moc akustyczną należy wybrać kształt powierzchni pomiarowej. Spotykane są trzy typy: prostopadłościenna, półkulista i konforemna (rys. 7) przy czym dwie pierwsze są stosowane najczęściej.



Rys. 7. Powierzchnie pomiarowe (w kolejności): prostopadłościenna, półkulista i konforemna [B&K Sound intensity]

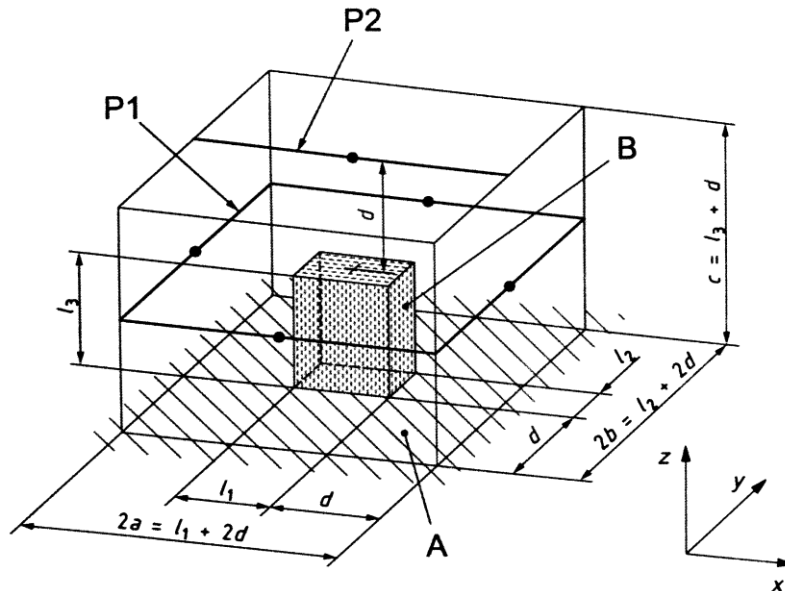
Zastosowanie powierzchni półkulistej skutkuje najmniejszą liczbą punktów pomiarowych, których liczba i położenie uzależnione jest od wielkości obiektu. Korzystne jest wybranie tej powierzchni w przestrzeni otwartej z większym promieniem pomiarowym⁷. W pomieszczeniach, w których występuje znaczny hałas i przedmioty odbijające dźwięk, stosowanie mniejszych odległości

⁵ Płaszczyzna odbijająca dźwięk – płaska powierzchnia na której znajduje się obiekt badań lub jest w bezpośrednim sąsiedztwie.

⁶ Wymiar charakterystyczny źródła d_0 [m] – odległość między początkiem układu współrzędnych a najbardziej oddalonym wierzchołkiem prostopadłościanu odniesienia.

⁷ Promień pomiarowy r [m] – promień kuli lub wycinka kuli.

pomiarowych d^8 minimalizuje wpływ tych czynników na wynik pomiaru. W tym przypadku lepiej sprawdza się prostopadłościenna powierzchnia pomiarowa. Minimalna odległość pomiarowa powinna wynosić co najmniej 0,15 m a najlepiej 1 m lub więcej. Dla małego źródła hałasu spełniającego warunki wymiarowe ($l_1 \leq d$, $l_2 \leq d$, $l_3 \leq 2d$) ilość i rozmieszczenie pozycji mikrofonu przedstawione są na rys. 8. Pole powierzchni pomiarowej składa się w tym przypadku z pięciu ścianek.



Rys. 8. Graficzne przedstawienie prostopadłościanu odniesienia, prostopadłościennej powierzchni pomiarowej, pozycji mikrofonu i charakterystycznych wymiarów dla małego obiektu badań spełniającego założenia ($l_1 \leq d$, $l_2 \leq d$, $l_3 \leq 2d$).

• - pozycja mikrofonu, A – powierzchnia odbijająca, B – prostopadłościan odniesienia, 2a - długość powierzchni pomiarowej, 2b – szerokość powierzchni pomiarowej, c – wysokość powierzchni pomiarowej, d – odległość pomiarowa, l_1, l_2, l_3 – wymiary prostopadłościanu odniesienia, P1, P2 – tory pomiarowe [EN ISO 3746:2010]

Wykonując pomiary dźwięku należy wybrać jedną ze **stałych czasowych Slow (S)** – wolno = 1 s, **Fast (F)** – szybko = 0,125 s lub w niektórych miernikach występuje także stała **Impulse (I)** – impuls = 0,035 s dla dźwięku narastającego i 1,5 s dla zmniejszającego się (**F** i **S** są w przybliżeniu symetryczne). Stałe czasowe należy rozumieć jako szybkość reakcji wskaźnika na zmiany ciśnienia akustycznego lub inaczej czas po jakim uśredniany jest pomiar. Wprowadzenie ich było konieczne w pierwszych miernikach ze wskaźnikiem analogowym. Przy szybkich zmianach ciśnienia wskazówka bardzo dynamicznie zmieniała swoje położenie, uniemożliwiając prawidłowy odczyt. Dla dużych wahań ciśnienia stosowano stałą czasową **S**, uśredniającą wyniki po dłuższym czasie, a dla wolniejszych zmian **F**, pozwalającą na śledzenie wartości z dużą dynamiką. Obecnie stosowane są mierniki cyfrowe, gdzie nie występuje problem z odczytem wskaźnika i uzyskaniem informacji np. o wartości maksymalnej poziomu ciśnienia. Jednak stałe czasowe nadal pozostały, ponieważ normy w tym względzie się nie zmieniły. Najczęściej stosowaną stałą czasową jest **F**. Stała **S** może być stosowana w przypadku pomiarów z krótkotrwałymi zakłóceniami dźwiękowymi w celu minimalizacji ich wpływu. W przypadku szybkozmiennych i znacznych zmian amplitudy ciśnienia akustycznego wartości wyświetlane dla stałej **F** będą wyższe niż dla stałej **S**. Trzecia stała czasowa **I** stosowana jest do dźwięków o charakterze impulsowym, uderzeniowym, umożliwiając ich poprawny pomiar.

Zadania takie jak diagnostyka czy ochrona przed hałasem wymagają poznania struktury dźwięku, czyli określenia jego częstotliwości i amplitud. W akustyce bardzo często stosowane są **analizy oktauwowe i tercjowe**. Uzasadnia to fakt, że częstotliwości pasm tych analiz zostały znormalizowane, co zapewnia możliwość porównania wyników. Dodatkowo człowiek lepiej rozróżnia dźwięki o niskiej częstotliwości niż o wysokiej, a szerokości pasm analizy oktauwowej i tercjowej mają stałą względną

⁸ Odległość pomiarowa d [m] – najmniejsza odległość między równoległymi ściankami prostopadłościanu odniesienia i prostopadłościanu pomiarowego.

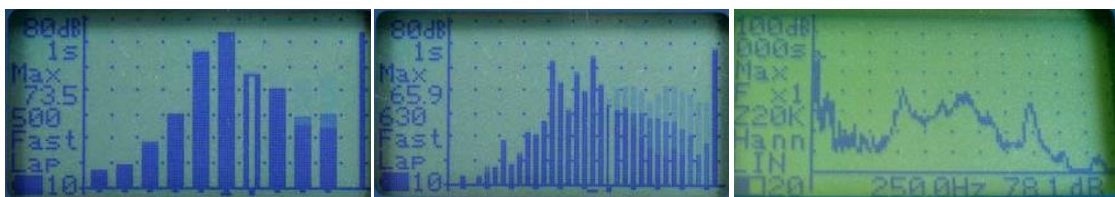
szerokość. Na przykład tony niskie o różnicy 10 Hz będą wyraźnie rozróżniane np. 30 Hz i 40 Hz, natomiast tony wysokie 17 000 Hz i 17 010 Hz już nie. Wydzielenie pasm o określonych częstotliwościach odbywa się z zastosowaniem filtrów. Proces filtracji usuwa wybrane częstotliwości z sygnału, pozostawiając tylko pożądane. W filtrach oktaowych (pasmowo-przepustowych) częstotliwość górna F_{pass} równa jest dwukrotności częstotliwości dolnej F_{stop} , również kolejne częstotliwości środkowe filtrów są w przybliżeniu dwukrotnością poprzednich (Tab. 1).

Tabela. 1. Częstotliwości filtrów oktaowych w paśmie słyszalnym

Dolna częstotliwość [Hz]	Środkowa częstotliwość [Hz]	Górna częstotliwość [Hz]
11	16	22
22	31.5	44
44	63	88
88	125	177
177	250	355
355	500	710
710	1000	1420
1420	2000	2840
2840	4000	5680
5680	8000	11360
11360	16000	22720

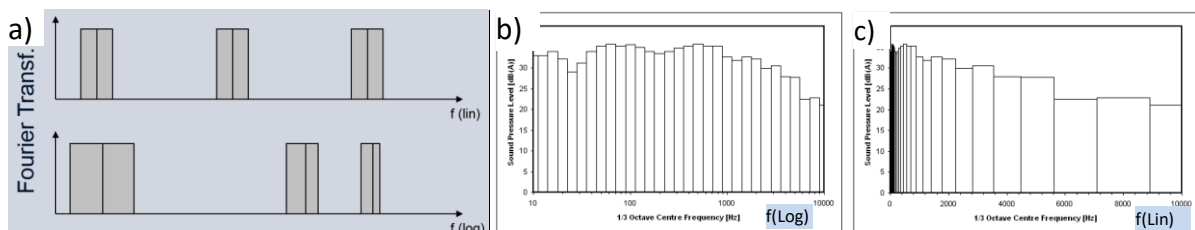
Filtry tercjowe mają stałą względną szerokość równą jedną trzecią filtrów oktaowych, dlatego często stosowana jest także nazwa filtry 1/3 oktawy. Analiza tercjowa pozwala na uzyskanie bardziej szczegółowych informacji o widmie sygnału. Wymaga to przeprowadzenia większej ilości obliczeń. Wykres częstotliwościowy może zawierać 31 pasm. Częstotliwości środkowe filtrów wynoszą: 22.4, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000. Istnieją również inne metody analizy o stałej względnej szerokości pasma jak 1/12 czy 1/24 oktawy.

Bardzo popularnym typem analizy jest dyskretna transformata Fouriera (DFT) w praktyce realizowana algorytmem szybkiej transformaty Fouriera (FFT). Szerokość pasma częstotliwościowego (rozdzielczość) jest stała np. 10 Hz niezależnie od zakresu częstotliwości. Realizacja za pomocą filtrów wymagałaby zastosowania stałej bezwzględnej szerokości pasma. Standardowa ilość uzyskiwanych pasm jest zazwyczaj znacznie większa niż przy analizach oktaowych i tercjowych (rys. 9). Pozwala to na szczegółową analizę widma.



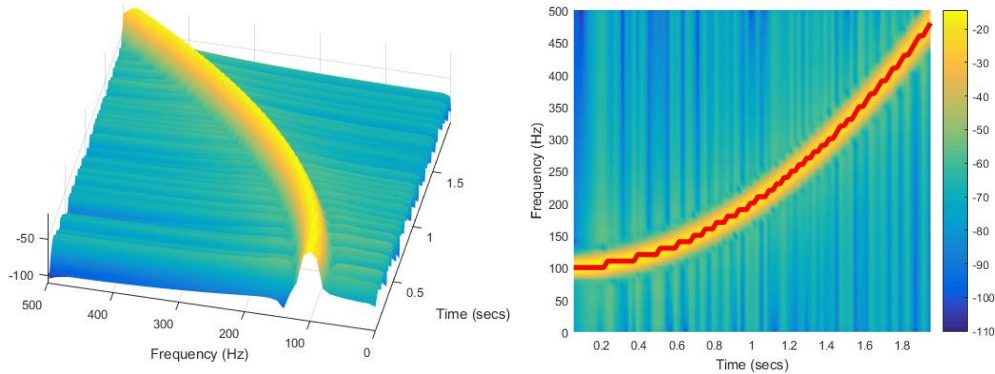
Rys. 9. Widmo oktaowe, tercjowe i z dyskretnego przekształcenia Fouriera (w kolejności od lewej) [ACO]

Wyniki z analizy oktaowej (i innych 1/n oktawy) są przedstawiane na wykresie, w którym częstotliwość jest w skali logarytmicznej a z FFT liniowej. Wpływ zastosowania skali liniowej i logarytmicznej przedstawiony jest na rys. 10.



Rys. 10. Wpływ zastosowanej skali osi częstotliwości na szerokość pasm w analizie: a) Fouriera [Head] i b,c) tercjowej [Dirac]

Przedstawione metody analizy częstotliwościowej są właściwe dla dźwięków o małej zmienności amplitudy i częstotliwości w czasie, czyli sygnałów stacjonarnych. Zastosowanie ich dla sygnałów losowych powoduje utratę informacji o momencie wystąpienia danej częstotliwości a amplitudy są uśrednione. Dla tego typu sygnału stosuje się wykresy 2 lub 3-wymiarowe, które pokazują zmianę amplitud poszczególnych częstotliwości w czasie zwane **spektrogramem** (rys. 11).



Rys. 11. Spektrogram [Matlab]

Bardzo popularną metodą uzyskiwania tego rodzaju wykresu jest krótkoczasowa transformata Fouriera (STFT). W uproszczeniu to przekształcenie można określić jako obliczenie FFT dla poszczególnych segmentów sygnału. Dzięki takiemu zabiegowi nie jest tracona informacja o czasie wystąpienia danej częstotliwości czy zmianie amplitudy. Dzielenie sygnału na mniejszą ilość segmentów sygnału (segmenty o większej liczbie próbek), uzyskuje się większą rozdzielczość częstotliwościową a mniejszą rozdzielczość czasową.

W przypadku występowania kilku źródeł dźwięku może zachodzić potrzeba sumowania lub odejmowania ich emisji. Działania dodawania i odejmowania, dla ciśnienia akustycznego p wyrażonego w paskalach, wykonywane są jak dla liczb rzeczywistych:

$$p = p_1 + p_2 \text{ [Pa]} \quad (9)$$

Dla poziomu ciśnienia akustycznego L_p [dB] można skorzystać z odpowiednich wykresów lub wzorów wyprowadzonych z uwzględnieniem właściwości logarytmów. Dodawanie przeprowadzane jest zgodnie z zależnością:

$$L_p = 10 \log \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \text{ [dB]} \quad (10)$$

Rezultatem emisji dźwięku z dwóch źródeł o takim samym poziomie ciśnienia akustycznego jest wzrost o 3 dB np. $L_{p1} = 80$ db, $L_{p2} = 80$ db; $L_p = 10 \log \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} \right) = 83$ db.

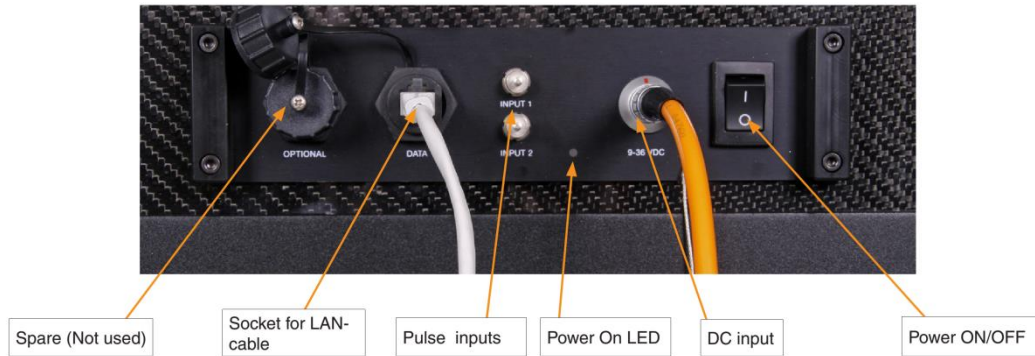
W przypadku odejmowania np. tła akustycznego⁹ od poziomu ciśnienia akustycznego stosowany jest wzór:

$$L_p = 10 \log \left(10^{\frac{L_{p1}}{10}} - 10^{\frac{L_{p2}}{10}} - \dots - 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right) \text{ [dB]} \quad (11)$$

⁹ Tło akustyczne – dźwięki regularnie występujące podczas pomiaru z niepożądanych źródeł.

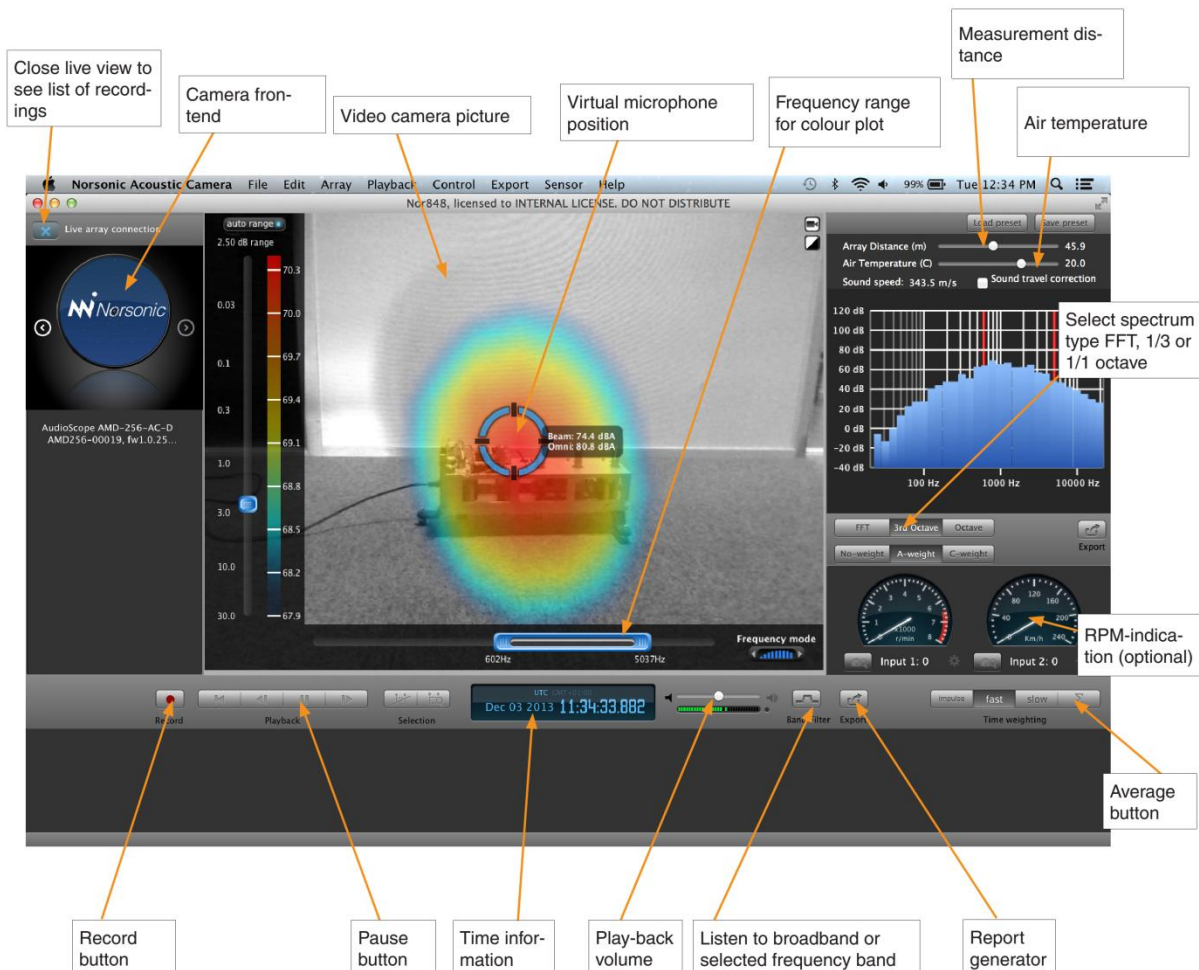
3. Obsługa kamery akustycznej

Zestawienie sprzętu i wykonanie pomiarów jest stosunkowo proste i szybkie. Po zamontowaniu kamery na statywie należy podłączyć kabel LAN między kamerą a MacBookiem, zapewnić zasilanie kamery (rys. 12) i notebooka oraz uruchomić program do rejestracji i analizy wyników *Norsonic Acoustic Camera*.



Rys. 12. Panel przyłączeniowy kamery akustycznej [Norsonic]

Okno programu z zaznaczonymi opcjami przedstawione jest na rys. 13.



Rys. 13. Okno programu kamery akustycznej [Norsonic]

Kamera akustyczna zaopatrzona jest w mikrofony pomiarowe. Na podstawie oceny opóźnienia odbioru dźwięku przez poszczególne przetworniki elektroakustyczne wyznaczany jest kierunek i głośność dźwięku.

3.1. Specyfikacja kamery Nor848A-10

Odległość od źródła dźwięku	0,5 m ÷ 200 m.
Maksymalny poziom ciśnienia akustycznego	110 dB.
Częstotliwość dźwięku	125 Hz ÷ 15 kHz.
Częstotliwość próbkowania	44.1 kHz.
Ilość mikrofonów	256.
Temperatura	-10°C ÷ +40 °C.
Wilgotność	do 90%.

4. Przebieg laboratorium nr 1

- I. Przygotowanie kamery akustycznej do pomiarów, ustalenie odległości od obiektu i temperatury powietrza.
- II. Ustalenie głównych źródeł hałasu maszyny.
- III. Wybór pojedynczego źródła i pomiar hałasu dla różnych parametrów eksploatacyjnych (obciążenia i prędkości obrotowej) bez krzywej korekcyjnej i z krzywą korekcyjną (wybór na podstawie wartości poziomu ciśnienia akustycznego).
- IV. Wykonanie analizy częstotliwościowej (FFT, widmo tercjowe i oktawowo).

4.1. Sprawozdanie

- I. Cel i zakres laboratorium.
- II. Opis stanowiska.
- III. Zestawienie wyników badań w formie tabel i wykresów.
- IV. Analiza danych.
Treści obowiązkowe:
 - interpretacja źródeł hałasu wykrytych przez kamerę,
 - wyjaśnienie przyczyn zmian poziomu/struktury widmowej hałasu przy zmianie parametrów eksploatacyjnych,
 - wpływ krzywej korekcyjnej na poziom ciśnienia akustycznego.
- V. Podsumowanie.

5. Przebieg laboratorium nr 2

- I. Wybrać prostopadłościenną powierzchnię pomiarową i ustalić odległość pomiarową d tak, aby były spełnione warunki ($l_1 \leq d$, $l_2 \leq d$, $l_3 \leq 2d$).
- II. Przy pracującym obiekcie badań (ST) wykonać trzy pomiary poziomu ciśnienia akustycznego¹⁰ z krzywą korekcyjną A dla każdego punktu pomiarowego i uśrednić wyniki (średnia arytmetyczna) $L_{pA(ST)}^m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{pA(ST)}^{m,n}$, m – numer pozycji mikrofonu ($m = 1, \dots, M$), n – numer pomiaru w tym samym punkcie pomiarowym ($n = 1, \dots, N$).
- III. Przeprowadzić pomiary zgodnie z punktem II z wyłączonym obiektem badań (B) w celu określenia tła akustycznego $L_{pA(B)}^m = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N L_{pA(B)}^{m,n}$, m – numer pozycji mikrofonu, n – numer pomiaru w tym samym punkcie pomiarowym.

¹⁰ Zgodnie z EN ISO 3746:2010 powinien być wykonany pomiar uśrednionego w czasie poziomu ciśnienia akustycznego z charakterystyką częstotliwościową A (równoważnego poziomu dźwięku z krzywą A)

5.1. Sprawozdanie

I. Cel i zakres laboratorium.

II. Opis stanowiska z rysunkiem prostopadłościanu odniesienia, powierzchni pomiarowej i punktów pomiarowych z zaznaczonymi wymiarami i sprawdzeniem warunków ($l_1 \leq d$, $l_2 \leq d$, $l_3 \leq 2d$).

III. Zestawienie wyników badań w formie tabeli.

IV. Analiza danych.

1. Wyznaczyć średni poziom ciśnienia akustycznego dla wszystkich punktów pomiarowych z pracującym obiektem badań $L_{pA(ST)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M L_{pA(ST)}^m$ i z wyłączonym obiektem badań

$$L_{pA(B)} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M L_{pA(B)}^m \text{ (średnia arytmetyczna).}$$

2. Obliczyć współczynnik uwzględniający tło akustyczne K_1 :

$$K_1 = -10 \log(1 - 10^{-0,1\Delta L_{pA}}) \text{ [dB]}, \quad \Delta L_{pA} = L_{pA(ST)} - L_{pA(B)}.$$

Jeśli $\Delta L_p > 10 \text{ dB} \Rightarrow K_1 = 0$,

jeśli $\Delta L_p < 3 \text{ dB}$ poziom tła akustycznego zbyt wysoki.

3. Wyznaczyć poprawkę uwzględniającą wpływ dźwięków odbitych K_2 :

$$K_2 = 10 \log\left(1 + 4 \frac{S}{A}\right) \text{ [dB]}$$

gdzie:

$S = 4(ab + bc + ca)$ – pole powierzchni pomiarowej w m^2 (bez płaszczyzny odbijającej dźwięk),

$A = \alpha S_v$ – chłonność akustyczna pomieszczenia w m^2 ,

α – średni współczynnik pochłaniania dźwięku (przyjąć $\alpha = 0,07$),

S_v – pole powierzchni pomieszczenia badawczego w m^2 (ściany, sufit i podłoga).

4. Obliczyć uśredniony poziom ciśnienia akustycznego na powierzchni pomiarowej z uwzględnieniem współczynników środowiskowych:

$$L_{pA} = L_{pA(ST)} - K_1 - K_2$$

5. Określić poziom mocy akustycznej:

$$L_{WA} = L_{pA} + 10 \log \frac{S}{S_0} \text{ [dB]}$$

gdzie:

S_0 – pole powierzchni odniesienia równe $1 m^2$.

6. Wyznaczyć moc akustyczną z zależności (3).

V. Podsumowanie.

6. Podstawowe wymagania BHP

1. Zabrania się włączania, wyłączania, podłączania, odłączania, manipulowania przy stanowisku pomiarowym i obiekcie badań bez wyraźnego polecenia prowadzącego zajęcia.

2. Należy zachować szczególną ostrożność przy urządzeniach elektrycznych i z częściami wirującymi.

3. Wszelkie wypadki, niesprawności, uszkodzenia i awarie należy niezwłocznie zgłaszać do prowadzącego zajęcia.

4. Przebywanie w okryciu wierzchnim, spożywanie jedzenia i picia oraz wykonywanie innych czynności niezwiązanych z zajęciami jest zabronione.

7. Literatura

1. ACO. Producent sprzętu pomiarowego do akustyki. Dostępny w Internecie: http://www.aco-japan.co.jp/eng/type6238L_eng/index.html.
2. Bruel & Kjaer. Measuring sound. 1984. Dostępny w Internecie: <http://www.bksv.com/>.
3. Bruel & Kjaer. Noise control. 1986. Dostępny w Internecie: <http://www.bksv.com/>.
4. Bruel & Kjaer. Sound intensity. 1993. Dostępny w Internecie: <http://www.bksv.com/>.
5. DiracDelta. Encyklopedia dla naukowców i inżynierów. Dostępny w Internecie: <http://www.diracdelta.co.uk>.
6. EN ISO 3746:2010. Akustyka – Wyznaczanie poziomów mocy akustycznej i poziomów energii akustycznej źródeł hałasu na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego – Metoda orientacyjna z zastosowaniem otaczającej powierzchni pomiarowej nad płaszczyzną odbijającą dźwięk.
7. Hansen C. H. Fundamentals of acoustics. World Health Organization. Dostępny w Internecie: http://www.who.int/occupational_health/publications/noise1.pdf.
8. Head Acoustics. Dostawca rozwiązań z zakresu akustyki i drgań. Dostępny w Internecie: https://www.head-acoustics.de/downloads/eng/application_notes/FFT_Wavelet_nthOctave_e.pdf.
9. Mathworks. Producent oprogramowania. Dostępny w Internecie: <http://www.mathworks.com/help/signal/ref/spectrogram.html>.
10. Norsonic. Producent oprogramowania i sprzętu z zakresu akustyki i drgań. Dostępny w Internecie: <http://www.norsonic.com/en/>.
11. Occupational Safety and Health Administration. OSHA Technical Manual. Noise. Dostępny w Internecie: https://www.osha.gov/dts/osta/otm/new_noise/chapters_all.pdf.
12. Wikipedia. Dostępny w Internecie: <https://pl.wikipedia.org>, <https://en.wikipedia.org>.

8. Pytania kontrolne

1. Co oznacza poziom ciśnienia akustycznego równy 0 dB dla częstotliwości 1000 Hz?
2. Jak należy interpretować ujemne wartości poziomu ciśnienia akustycznego pierwszej izofony na rys. 3?
3. Dlaczego poziom ciśnienia akustycznego (albo ciśnienie akustyczne) może nie być jednoznaczną miarą oceny hałasu urządzeń?
4. W jakim celu się stosuje krzywe korekcyjne (charakterystyki częstotliwościowe)?
5. Podaj powody wyznaczania prostopadłością odniesienia.
6. Wyjaśnij cel stosowania stałych czasowych.
7. Dlaczego stosuje się analizy częstotliwościowe FFT, STFT, analizy oktafowe i tercjowe. Uzasadnij wybór poszczególnych metod.
8. Wyjaśnij pojęcia: komora bezchowa, komora pogłosowa, pole swobodne, odległość pomiarowa, płaszczyzna odbijająca dźwięk, powierzchnia pomiarowa.