

# Laboratorium

## Wibroakustyczne Diagnozowanie Maszyn i Urządzeń

Instrukcja do ćwiczenia nr 1

JEDNOSTKI AKUSTYCZNE, BUDOWA APARATURY  
KONTROLNO-POMIAROWEJ STOSOWANEJ W BADANIACH  
AKUSTYCZNYCH, POMIARY PODSTAWOWYCH WIELKOŚCI  
AKUSTYCZNYCH, BUDOWA SONOMETRU, BUDOWA  
MIKROFONÓW

Opracowanie: P. Osiński, K. Leszczyński

Procesy wibroakustyczne to ogół zjawisk dynamicznych, mechanoakustycznych, jakie mają miejsce w maszynach, urządzeniach i specjalnych konstrukcjach (np. taśmociąg, zwałowarka). Zjawiska te to drgania, hałas, dźwięk powietrzny i materiałowy oraz pulsacje medium w przestrzeniach, roboczych maszyn. Zachodzą one w szerokim zakresie częstotliwości, od bardzo niskich, prawie zerowych, do bardzo wysokich, rzędu megaherców [1]. Typowym przykładem zastosowań wibroakustyki jest dziedzina techniki zwana diagnostyką maszyn, polegająca na określeniu stanu sprawności maszyny lub urządzenia na podstawie pomiaru wibracji ruchowych elementów i towarzyszącego hałasu. Mierzy się zwykle rozkłady natężeń i widma mocy sygnałów drgań oraz hałasu. Wibroakustyka zajmuje się metodami obniżania poziomu wibracji i hałasu maszyn i urządzeń.

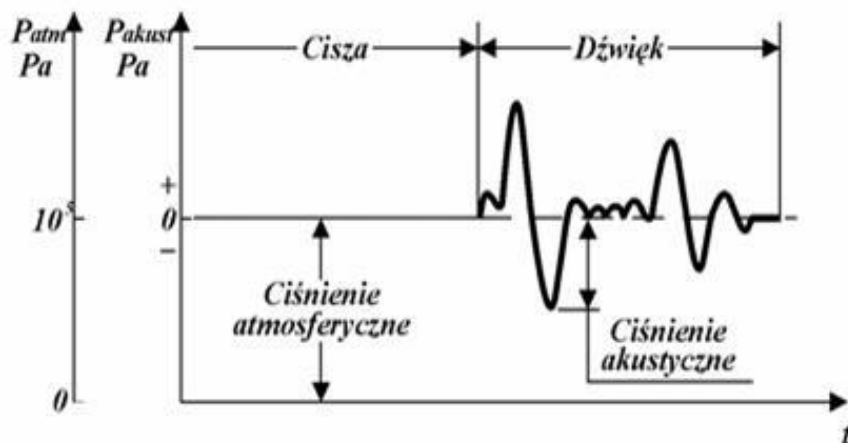
## Fala dźwiękowa

Jest to forma transmisji energii przez ośrodek sprężysty. W powietrzu falę dźwiękową stanowi fala podłużna (tzn. zaburzenia stanu występują wzdłuż kierunku propagacji) zmian ciśnienia atmosferycznego (rys. 1).



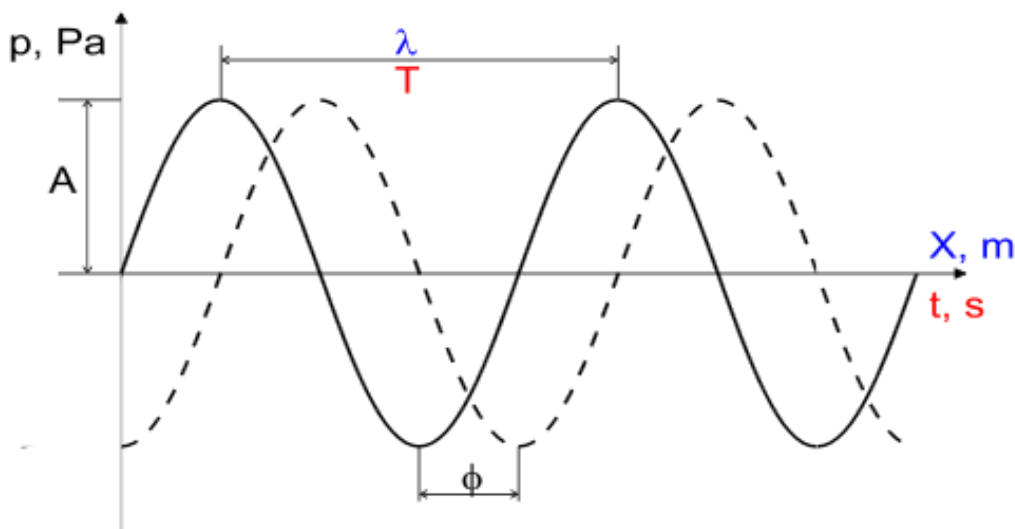
Rys. 1. Rozchodzenie się fali dźwiękowej [2]

Dźwięk to wrażenie słuchowe wywołane drganiami akustycznymi lub drgania akustyczne zdolne wytworzyć wrażenie słuchowe (rys. 2). Natomiast hałas to dźwięk niepożądany w danym miejscu i czasie, przez daną osobę.



Rys. 2. Dźwięk, a cisza [3]

Fala jest opisana następującymi wielkościami (rys. 3):



Rys. 3. Opis fali akustycznej [2]

- prędkość rozchodzenia się fali (prędkość dźwięku)  $c$  - prędkość rozchodzenia się zaburzenia ośrodka (sygnału):
  - w powietrzu (ok. 20°C) 340m/s (ok. 1220km/h = 1 Mach)
  - w wodzie (ok.10°C) 1450m/s
  - w betonie 3800 m/s
  - w stali ok. 6000m/s
- faza drgania  $\phi$  - wielkość wyznaczająca odchylenie w danym punkcie i w danym czasie od średniego położenia, albo: różnica w czasie lub w przestrzeni pomiędzy takim samym odchyleniem od średniego położenia,
- amplituda  $A$  - maksymalne odchylenie od położenia równowagi,
- okres drgań  $T$  - jest to najmniejszy przedział czasu, po którym powtarza się ten sam stan obserwowanego zjawiska (drgania lub zaburzenia),
- długość fali  $\lambda$  - odległość pomiędzy dwoma kolejnymi punktami wzdłuż kierunku propagacji zaburzenia, w których drgania mają tę samą fazę:

$$\lambda = c \cdot T$$

- częstotliwość  $f$  - liczba okresów drgań w jednostce czasu – dla 1s wyrażana w Hz:

$$f = \frac{1}{T} \quad \lambda \cdot f = c$$

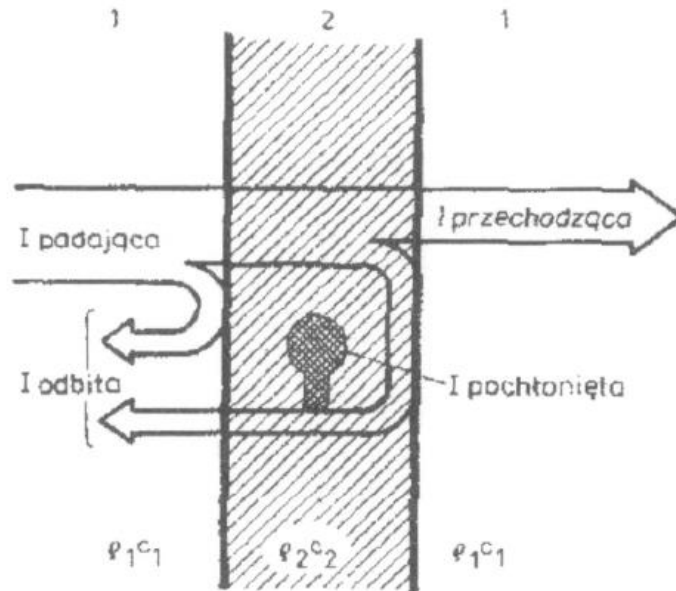
- częstość  $\omega$  - inaczej pulsacja, jest wielkością ściśle powiązaną z częstotliwością, wyrażana jest w rad/s i określana wzorem:

$$\omega = 2\pi f$$

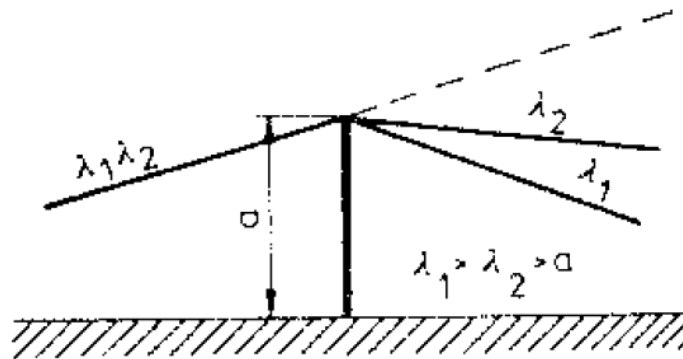
W obliczeniach akustycznych zwykle rozważa się tzw. swobodne pole akustyczne, w którym występuje pojedyncze źródło dźwięku przy jednoczesnym braku jakichkolwiek przeszkód na drodze emitowanej przez nie fali dźwiękowej. Jest to idealna sytuacja, która nie występuje w warunkach rzeczywistych. Fala akustyczna rozchodząca się w środowisku sprężystym po napotkaniu przeszkody podlega następującym zjawiskom fizycznym (rys. 4):

- odbicie fali (refleksja) – zmiana kierunku rozchodzenia się fali, kąt padania mierzony względem normalnej do przeszkody równa się kątowi odbicia;
- pochłanianie fali (tłumienie) – każdy ośrodek sprężysty posiada własność tłumienia (rozpraszania energii na ciepło) fal akustycznych w nim się rozchodzących;

- ugięcie fali (dyfrakcja) – na krawędzi przeszkody fala zmienia kształt swojego frontu i rozchodzi się we wszystkich kierunkach (z różnym natężeniem) wokół tej krawędzi. Ugięcie fali jest tym łatwiejsze im większa jest długość fali (rys. 5).
- przenikanie fali (transmisja) – dla przegrody o skończonej grubości zachodzi proces wielokrotnego padania i odbicia fali na jej powierzchniach brzegowych. W wyniku zachowania energii i pędu część energii fali padającej z zewnątrz na przegrodę przenika przez nią w postaci fali przechodzącej.



Rys. 4. Zachowanie fali dźwiękowej przy napotkaniu przeszkody [3]



Rys. 5. Ugięcie fali dźwiękowej na przeszkodzie [3]

W zależności od odległości od źródła dźwięku pole akustyczne zmienia swoje właściwości. Wyróżnia się następujące podstawowe typy pól:

- pole bliskie – w przybliżeniu zawarte w przedziale  $r < \Lambda = c/f$ . Ciśnienie akustyczne nie jest w fazie z prędkością cząsteczkową.
- pole dalekie – zachodzi dla  $r > \Lambda$ , o ile nie istnieją przeszkody odbijające lub pochłaniające dźwięk to natężenie dźwięku maleje odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości (-6 dB na każde podwojenie odległości).

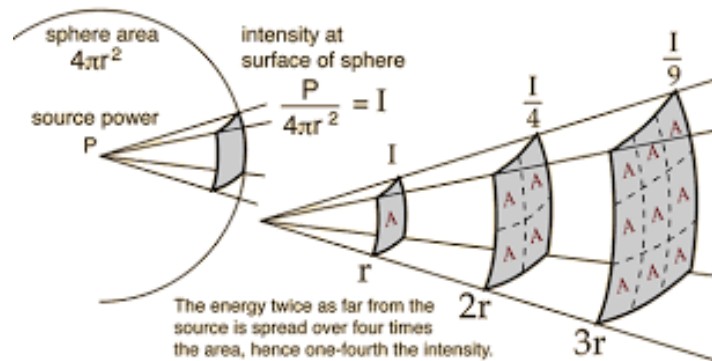
W rzeczywistości zawsze występują dodatkowe obiekty odbijające i pochłaniające dźwięk, jak również zauważa się wpływ innych źródeł dźwięku (tzw. tło akustyczne). Wprowadzono więc pojęcia:

- pole swobodne – obszar, w którym nie zauważa się wpływu fal odbitych;
- pole dyfuzyjne – obszar, w którym krzyżuje się wiele fal odbitych lub pochodzących z innych źródeł. Poziom dźwięku jest stały w tym obszarze.

## Jednostki akustyczne

Podstawowe jednostki akustyczne to:

- ciśnienie akustyczne  $p$  – zmienne w czasie odchylenie od średniej wartości ciśnienia atmosferycznego panującego w ośrodku, występujące podczas rozchodzenia się w nim fali akustycznej (rys. 2);
- natężenie dźwięku  $I$  podaje ile energii przenoszonej przez fale akustyczne w czasie przepływa przez pole powierzchni prostopadłe do kierunku rozchodzenia się dźwięku (rys. 6);

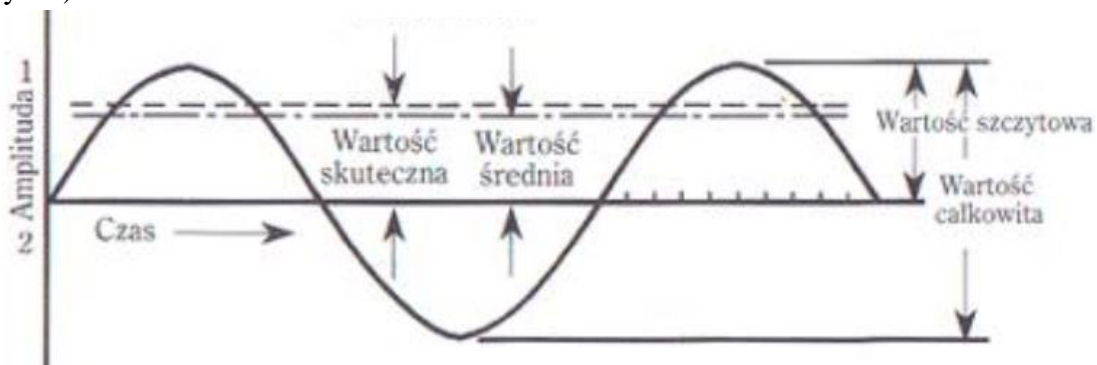


Rys. 6. Natężenie dźwięku [4]

- moc akustyczna  $N$  – całkowita moc fali akustycznej emitowanej przez źródło. Jest to jego unikalna charakterystyczna własność, która nie jest zależna od otaczającego środowiska;
- wartość skuteczna (RMS) – średnia kwadratowa amplitudy ciśnienia z czasu obserwacji, tzn. pierwiastek ze średniego kwadratu amplitudy ciśnienia z czasu obserwacji (rys. 7). Wartość skuteczna jest proporcjonalna do pierwiastka kwadratowego z ilości energii przenoszonej przez falę:

$$A_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p^2 dt}$$

- wartość szczytowa (PEAK) – maksymalna wartość amplitudy sygnału w czasie obserwacji (rys. 7).



Rys. 7. Wartość skuteczna i szczytowa fali akustycznej [5]

Ponieważ zakres zmian ciśnień fal akustycznych odbieranych przez ucho ludzkie mieści się w przedziale 20  $\mu\text{Pa}$  – 1 hPa co obejmuje 8 rzędów wielkości, to praktycznym sposobem na wyrażenie tych wielkości jest skala logarytmiczna.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe wielkości wibroakustyczne w dB. Decybel nie jest jednostką fizyczną, służy on do wyrażania wielkości odniesionej do zdefiniowanego poziomu odniesienia.

Tabela 1. Poziomy wielkości akustycznych

Nazwa	Definicja	Poziom odniesienia
Poziom ciśnienia akustycznego (gazy)	$L_p = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right)$ dB	$p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa
Poziom ciśnienia akustycznego (ciecze)	$L_p = 10 \log \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right)$ dB	$p_0 = 10^{-6}$ Pa
Poziom mocy akustycznej	$L_p = 10 \log \left( \frac{N}{N_0} \right)$ dB	$N_0 = 10^{-12}$ W
Poziom natężenia dźwięku	$L_p = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right)$ dB	$I_0 = 10^{-12}$ W/m <sup>2</sup>

Poziomy ciśnienia akustycznego powinien być określony dla zakresu częstotliwości np. zakres od 20 Hz do 20 kHz, albo dla oktawy lub tercji:

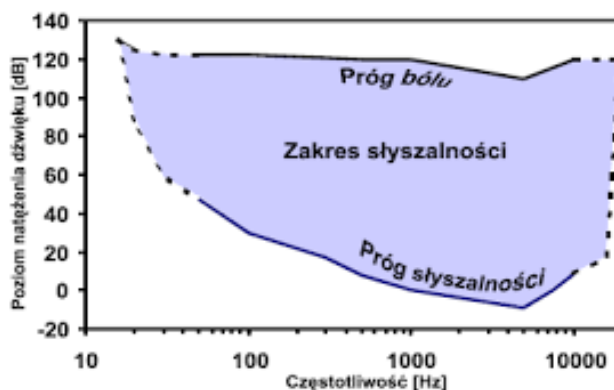
- oktawa – pasmo częstotliwości pomiędzy częstotliwościami, których stosunek równa się 2. Oktawy są charakteryzowane przez tzw. częstotliwości środkowe -31,5Hz, 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 4kHz, 8kHz, 16kHz. Granice pasm oktawy są określone jako  $\pm\sqrt{2}$  względem częstotliwości środkowej (tabela 2);

Tabela 2. Oktawy

Nr oktawy	$f_d$	$f_o$	$f_g$
1	11,3 Hz	16 Hz	22,6 Hz
2	22,3 Hz	31,5 Hz	44,5 Hz
3	44,5 Hz	63 Hz	89,1 Hz
4	88,4 Hz	125 Hz	177 Hz
5	177 Hz	250 Hz	354 Hz
6	354 Hz	500 Hz	707 Hz
7	707 Hz	1000 Hz	1414 Hz
8	1414 Hz	2000 Hz	2828 Hz
9	2828 Hz	4000 Hz	5657 Hz
10	5657 Hz	8000 Hz	11314 Hz
11	11314 Hz	16000 Hz	22627 Hz

- tercja – pasmo częstotliwości pomiędzy częstotliwościami, których stosunek równa się  $\sqrt[3]{2}$ . Trzy kolejne tercje stanowią oktawę.

Ludzki narząd słuchu nie słyszy wszystkich częstotliwości tak samo. Najlepiej słyszalne są dla nas częstotliwości środkowe, a niskie oraz wysokie częstotliwości rejestrujemy dopiero od wyższych wartości poziomu ciśnienia akustycznego (rys. 8).



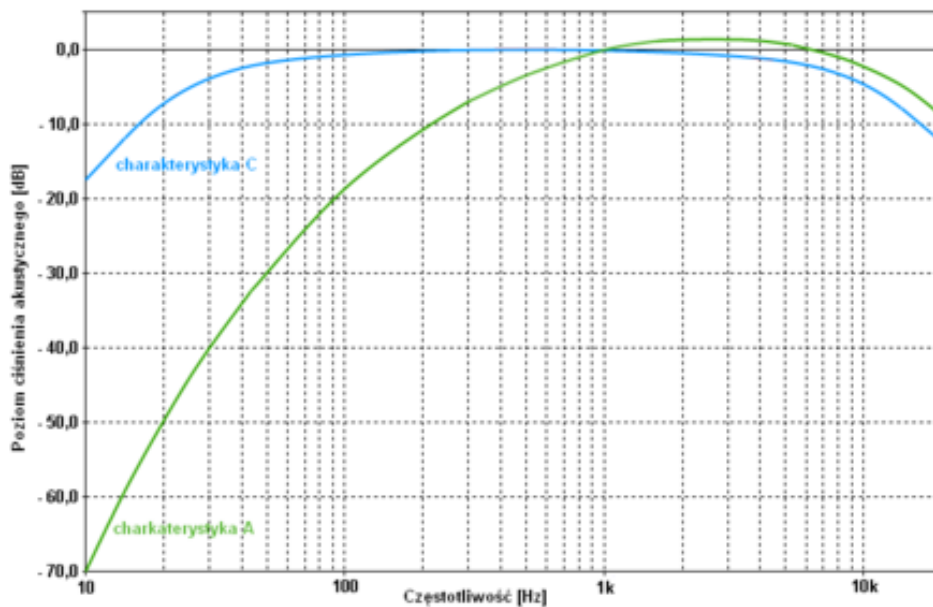
Rys. 8. Zakres słyszalności [6]

Z tego powodu, aby uwzględnić ludzki sposób percepcji, przy podawaniu poziomów wielkości akustycznych wykorzystuje się krzywe korekcyjne (rys. 9). Korygują one wielkości

zmierzone i przybliżają je do rzeczywistego wrażenia słuchowego odbieranego przez człowieka. Najczęściej wykorzystywane krzywe korekcyjne to:

- korekcja częstotliwościowa A – odpowiada charakterystyce krzywej progu słyszenia człowieka, tj. odzwierciedla małą wrażliwość na niskie częstotliwości – zaprojektowana do pomiaru niskich poziomów dźwięku.
- korekcja częstotliwościowa C – odpowiada charakterystyce słyszenia człowieka dla wyższych poziomów dźwięku (>80dB).

Pomiar bez żadnej korekcji to pomiar w pełnym paśmie akustycznym (LIN lub Z).



Rys. 9. Krzywe korekcyjne [7]

## Budowa mikrofonów

Mikrofon to przetwornik elektroakustyczny służący do przetwarzania fal dźwiękowych na impulsy elektryczne. W tradycyjnych mikrofonach dynamicznych fale dźwiękowe powodują drgania cienkiej elastycznej membrany wraz z cewką, która jest do niej umocowana. Drgania cewki, która umieszczona jest między biegunami magnesu, wzbudzają w niej przemienny prąd elektryczny o częstotliwości odpowiadającej częstości drgań fal dźwiękowych. W wyniku przetwarzania otrzymuje się z mikrofonu przebieg elektryczny – sygnał foniczny w postaci siły elektromotorycznej  $E$ , napięcia wyjściowego  $U$  oraz prądu  $I$  odpowiadającego przebiegowi akustycznemu.

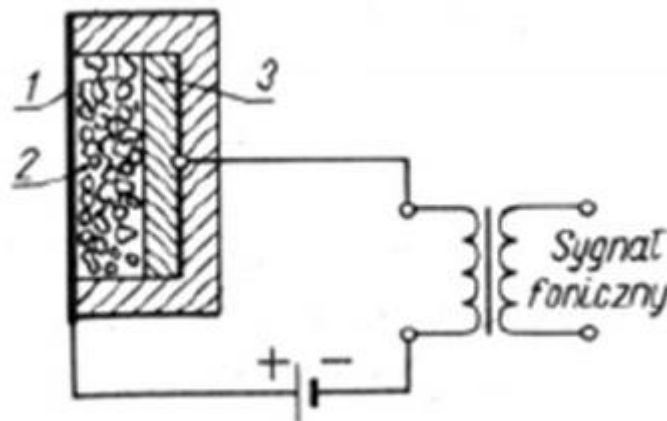
Ze względu na zastosowany typ przetwornika, mikrofony dzielimy na następujące grupy:

- stykowe (węglowe),
- piezoelektryczne,
- dynamiczne (magnetoelektryczne) – cewkowe, wstęgowe,
- pojemnościowe (elektrostatyczne) – pojemnościowe elektretowe,
- laserowe.

### Mikrofony stykowe (węglowe)

Mikrofon węglowy został opracowany przez Edisona i powstał jako rozwinięcie mikrofonu kwasowego, w którym kwas zastąpiono granulkami węgla, zmieniającymi swą rezystancję pod wpływem ciśnienia wywieranego przez membranę (rys. 10). Ich zakres przetwarzania jest wąski, węższy niż widmo mowy ludzkiej, a zniekształcenia są duże w porównaniu z innymi mikrofonami, jednak w tego typu rozwiązaniach wady te nie mają większego znaczenia.

Mikrofony stykowe mają również wiele zalet: ich konstrukcja jest bardzo prosta (przez co są praktycznie bezawaryjne), posiadają dużą skuteczność, są trwałe i tanie. Przepływ prądu jest tu modulowany poprzez zmianę rezystancji elektrycznej spowodowanej poruszaniem się części mechanicznych mikrofonu. Jest to mikrofon typu podłużnego, w którym komorę tworzy płaska nieruchoma elektroda węglowa, odizolowana od ścianki pudełka, pierścień filcowy oraz membrana węglowa oparta na krawędzi pudełka i dociśnięta do niego przykrywką z otworami. Pierścień filcowy służy do tłumienia drgań własnych membrany. Wkładka jest umieszczona w obsadzie zwanej mikrotelefonem i przykryta tzw. mównikiem, którego zadaniem jest skierowanie energii akustycznej na membranę mikrofonu. Prąd elektryczny jest doprowadzony do wkładki za pośrednictwem sprężyn stykowych w mikrotelefonie i płynie przez pudełko, membranę i proszek do elektrody nieruchomej. Zmiany rezystancji wkładki są proporcjonalne do zmiany zgniotu proszku, czyli do wychylania się membrany – przez to dla zachowania stałej skuteczności mikrofonu wychylenia membrany muszą być jednakowe w całym zakresie przetwarzania. Skuteczność mikrofonu zmienia się w bardzo szerokich granicach – znacznie wzrasta przy częstotliwościach drgań własnych membrany.



Rys. 10. Schemat budowy mikrofonu węglowego  
1 – membrana, 2 – proszek węglowy, 3 – elektroda stała [8]

### Mikrofony piezoelektryczne

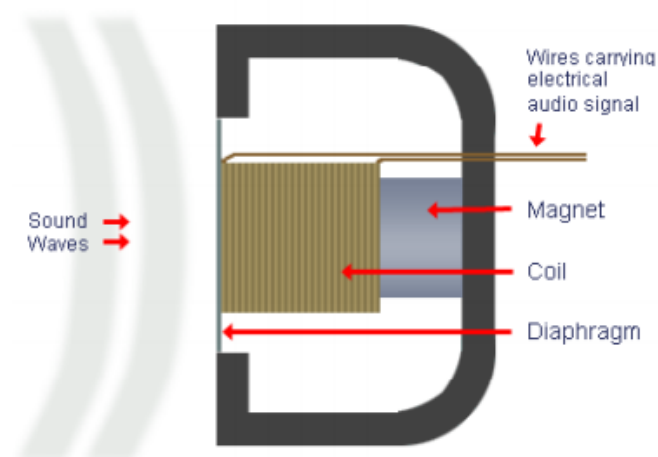
Mikrofony piezoelektryczne pod względem elektrycznym są kondensatorami, przetwarzają sygnał akustyczny w sygnał napięciowy, mają dużą wrażliwość na wilgoć i zmiany temperatury. Zbyt duża temperatura powoduje trwałe zmiany w ich działaniu. Ponadto wykazują bardzo dużą impedancję wewnętrzną o charakterze pojemnościowym, co utrudnia łączenie ich długimi przewodami i obciążenie małymi impedancjami. Szeroko natomiast stosowane są jako mikrofony, a ściślej rzecz biorąc – przetworniki, w instrumentach akustycznych. Szczególnie wiernie odtwarzają wysokie tony i są również stosowane jako czujniki ultradźwięków.

### Mikrofony dynamiczne (magnetoelektryczne)

Wynalazcami mikrofonu dynamicznego są W. C. Wenete i A. C. Thuras z firmy Bell Labs, którzy opatentowali swój pomysł w 1931 roku. Wewnątrz mikrofonu magnetoelektrycznego, pomiędzy biegunami magnesu stałego, znajduje się cewka przymocowana do membrany. Fale dźwiękowe, wprawiając membranę w drgania, powodują poruszanie się cewki w polu magnesu i indukują w niej prąd. Działają one dzięki indukowaniu się siły elektromotorycznej pod wpływem względnego ruchu źródła pola magnetycznego i przewodu. Dochodzi do tego zjawiska, gdy przewód będzie się poruszał w stałym polu magnetycznym. Takie mikrofony nazywa się cewkowymi (rys. 11) lub wstęgowymi.



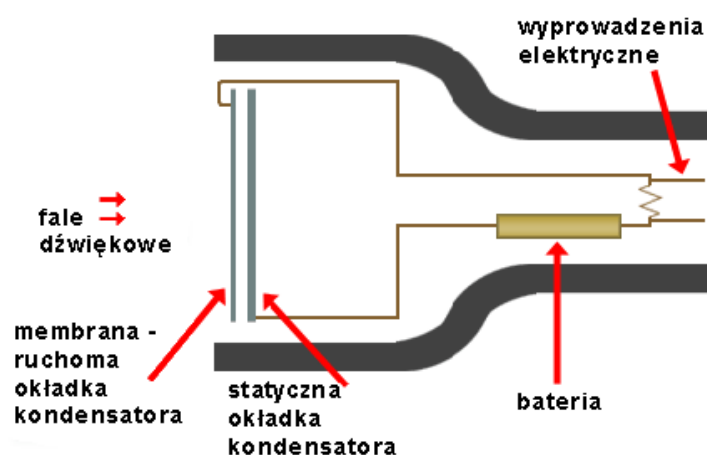
### Cross-Section of Dynamic Microphone



Rys. 11. Schemat budowy mikrofonu dynamicznego cewkowego [9]

### Mikrofony pojemnościowe (elektrostatyczne)

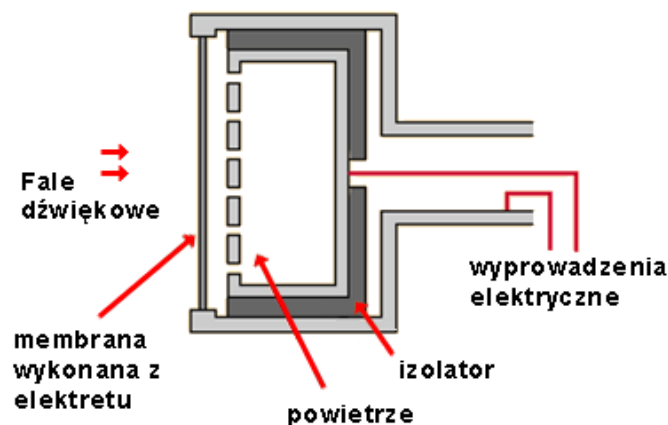
Mikrofon pojemnościowy jest wykorzystywany głównie w celach profesjonalnych. Składa się on z dwóch elektrod podłączonych do źródła napięcia stałego – zwykle 48V (tak duża wartość napięcia jest niezbędna do zapewnienia dużej czułości). Jedna elektroda jest nieruchoma, natomiast druga wystawiona jest na działanie fal dźwiękowych, które zderzając się z ruchomą elektrodą powodują jej drgania. Ponieważ elektrody mikrofonu pełnią rolę okładek kondensatora, to zmiana odległości pomiędzy elektrodami powoduje zmianę pojemności takiego "kondensatora", co z kolei powoduje powstanie składowej zmiennej w stałym napięciu zasilającym kondensator. Jej częstotliwość jest równa częstotliwości padającej fali dźwiękowej. Z uwagi na wysoką impedancję mikrofon musi być podłączony do odbiornika sygnału przy pomocy specjalnego przedwzmacniacza umieszczonego bardzo blisko wkładki mikrofonowej.



Rys. 12. Schemat budowy mikrofonu pojemnościowego [10]

### Mikrofony elektretowe

Jest to odmiana mikrofonu pojemnościowego, którego membrana wykonana jest z elektretu – dielektryka o trwałej polaryzacji elektrycznej. Tanie w produkcji małomembranowe mikrofony elektretowe stosuje się w telefonach, włącznikach akustycznych, interkomach, domofonach i innych urządzeniach, gdzie jakość dźwięku nie ma wielkiego znaczenia.



Rys. 13. Schemat budowy mikrofonu pojemnościowego elektretowego [10]

### Mikrofony laserowe

Mikrofon laserowy to przetwornik optoelektroniczny służący w skrócie do przetwarzania fal dźwiękowych w postaci światła na sygnał elektryczny. Najczęściej znacznie różni się co do wielkości od reszty tradycyjnych mikrofonów (np. dynamicznych i pojemnościowych), ponieważ nie zawiera się w żadnej obudowie i może działać na dosyć duże odległości ze względu na nietypową konstrukcję. Z tego też powodu bardziej powinno się go rozpatrywać jako układ, który jest tym większy, im większa jest odległość emitera promieniowania i detektora od źródła rejestrowanego dźwięku.

### Parametry mikrofonów

Każdy mikrofon ma pewne cechy, od których jest uzależniona artystyczna i techniczna strona nagrania. Są to takie parametry jak:

#### Impedancja wyjściowa mikrofonu (impedancja wewnętrzna)

Wartość impedancji zmienia się w zakresie ok. 20-30% w zależności od częstotliwości. W dokumentacji podaje się najczęściej wartość znamionową modułu impedancji przy pobudzeniu o częstotliwości 1 kHz.

#### Najmniejsza wartość impedancji obciążenia mikrofonu

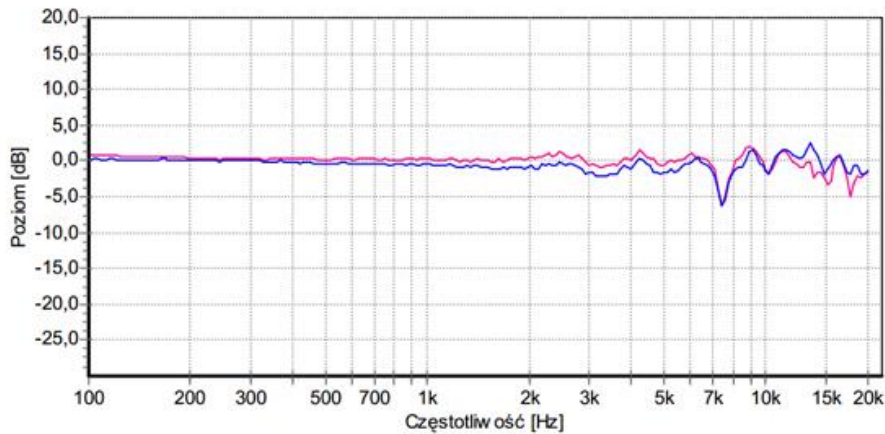
Parametr ten określa minimalną impedancję wejścia wzmacniacza, do którego ma być podłączony mikrofon, przy której zachowane są prawidłowe warunki jego pracy. Jeśli impedancja ta nie jest podana w dokumentacji, można przyjąć, że powinna być co najmniej 5-krotnie większa od znamionowej impedancji wyjściowej mikrofonu.

#### Skuteczność mikrofonu

Jest to stosunek napięcia na nieobciążonym wyjściu mikrofonu do wartości ciśnienia akustycznego działającego na membranę. Skuteczność mikrofonu mierzy się w polu dalekim i wyraża w mV/Pa. Skuteczność mikrofonów dynamicznych wynosi 1-3 mV/Pa. W przypadku mikrofonów pojemnościowych skuteczność jest wyższa i wynosi 5-50 mV/Pa.

#### Charakterystyka częstotliwościowa

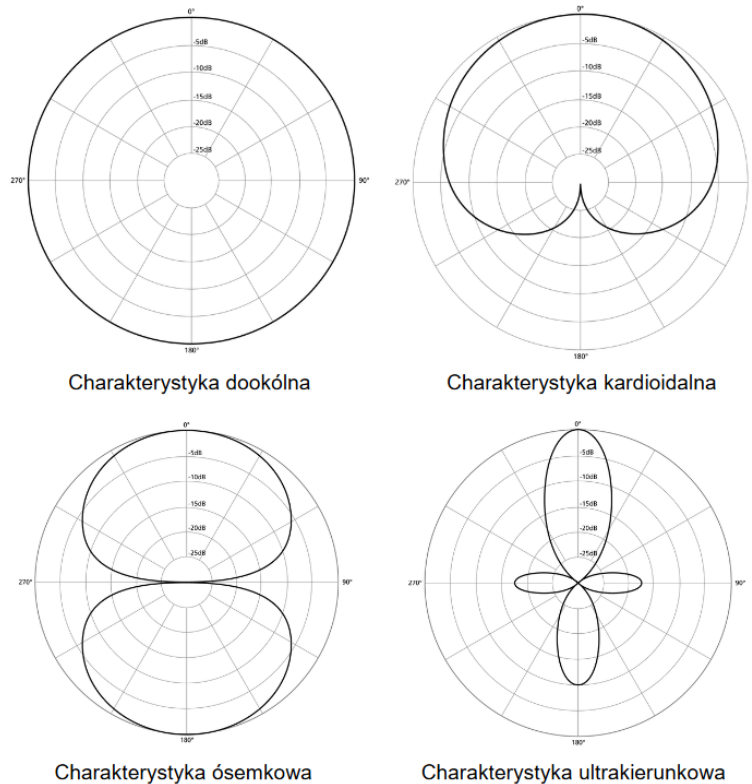
To wykres przebiegu zależności czułości mikrofonu (w dB) od częstotliwości (Hz) zwykle w zakresie 20Hz-20 kHz (rys. 14). Czasami zamiast wykresu podaje się tylko pasmo przenoszenia, czyli zakres częstotliwości akustycznych skutecznie przetwarzanych przez mikrofon. Zakres ten jest ograniczony spadkiem skuteczności mikrofonu, określonym przez odpowiednią normę lub wymagania techniczne.



Rys. 14. Charakterystyka częstotliwościowa mikrofonów MicW M215(różowy) i MicW M416 (niebieski) [11]

### Charakterystyka kierunkowości

Tak nazywany jest wykres w układzie współrzędnych biegunowych przedstawiający skuteczność mikrofonu przy danej częstotliwości i kącie padania dźwięku, unormowany względem maksymalnej skuteczności mikrofonu (rys. 15). Ze względu na kształt charakterystyki kierunkowej, mikrofony dzielą się na: wszechkierunkowe (dookólne, kołowe), dwukierunkowe (ósemkowe), jednokierunkowe (kardioidalne, nerkowe) i ultrakierunkowe. W przypadku mikrofonów o ukierunkowanej charakterystyce występuje zjawisko zwane efektem zbliżeniowym. Polega on na eksponowaniu częstotliwości z przedziału 50-300 Hz w miarę zbliżania mikrofonu do źródła dźwięku i zmniejszaniu ich poziomu przy oddalaniu. Zjawisko to nie występuje w mikrofonach wszechkierunkowych.



Rys. 15. Charakterystyki kierunkowości mikrofonów [12]

## Czułość

To parametr przedstawiający zależność między ciśnieniem akustycznym wywieranym na membranie mikrofonu, a napięciem wyjściowym ( $\text{mV/Pa/1kHz} \approx 1\text{dB}$ ).

## Maksymalna wartość ciśnienia akustycznego

Parametr ten charakteryzuje maksymalną wartość ciśnienia jaką może przenieść mikrofon dla podanej wartości zniekształceń.

## Napięcie szumów mikrofonu

Jest to napięcie na wyjściu mikrofonu zmierzone w warunkach zupełnej ciszy. Może być wyrażone w decybelach, zakładając, że jest równoważne napięciu wyjściowemu mikrofonu wytworzonymu sygnałem akustycznym o określonym poziomie ciśnienia, przyjmując poziom  $20\mu\text{Pa}=0\text{dB}$ . Dla mikrofonów pojemnościowych wartość tego parametru wynosi 14-34 dB.

## Odstęp sygnału od szumu

Określa on odstęp użytecznego sygnału fonicznego od szumu. Jest to wyrażona w decybelach różnica między napięciem na wyjściu mikrofonu przy ciśnieniu akustycznym równym 1 Pa (co odpowiada poziomowi ciśnienia 94 dB), a napięciem szumów mikrofonu. Wartość tego parametru w wypadku mikrofonów pojemnościowych wynosi 60-80 dB.

## Zakres dynamiczny

To parametr określający przedział między wartością minimalną, a maksymalną przeniesionego ciśnienia akustycznego.

## Wrażliwość mikrofonu na magnetyczne pola zakłócające

Charakteryzuje stosunek napięcia na wyjściu mikrofonu do zmiennego natężenia pola magnetycznego ( $\text{mV/mA}$ ), bądź stosunek napięcia do zmiennej indukcji magnetycznej ( $\text{uV/5uT}$ ). Typowa wartość dla dobrych mikrofonów dynamicznych wynosi  $5\text{uV/5uT}$  przy częstotliwości 50 Hz.

## Wrażliwość mikrofonu na elektryczne pola zakłócające

Jest wyrażana w  $\text{mV/V}$ . Typowa wartość dla dobrego mikrofonu pojemnościowego wynosi  $0,4\text{uV/V}$ .

Orientacyjne wartości najważniejszych parametrów dla różnych typów mikrofonów zostały przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Orientacyjne wartości najważniejszych parametrów mikrofonów

Rodzaj mikrofonu	Czułość [ $\text{mV}/\mu\text{bar}$ ]	Zakres częstotliwości [Hz]	Impedancja wewnętrzna [ $\Omega$ ]	Nierównomierność charakterystyki
Węglowe	1-50	200-3000	20-1000	duża
Pojemnościowe	0,5-10	15-15000	ok. $10^8$	Ok. 3 dB
Elektretowe	0,5-10	15-15000	ok. $10^9$	Ok 3 dB
Piezoelektryczne	0,2-2	tony wysokie	ok. $10^9$	-
Dynamiczne	0,05-1	30-10000	mała	8-20 dB

## Polaryzacja (napięcie polaryzacji)

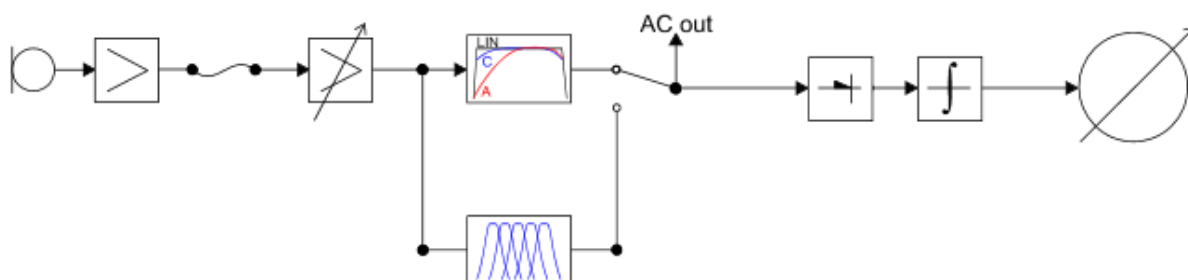
To parametr określający różnicę napięcia na okładzinie nieruchomej oraz ruchomej (membranie) mikrofonu. Ma wpływ na czułość mikrofonu. Jej maksymalna wartość jest ograniczona dopuszczalną wartością pola elektrycznego między okładzinami, nie powodującą wyładowań iskrowych.

## Budowa sonometru

Każdy miernik poziomu dźwięku (sonometr) składa się z następujących elementów:

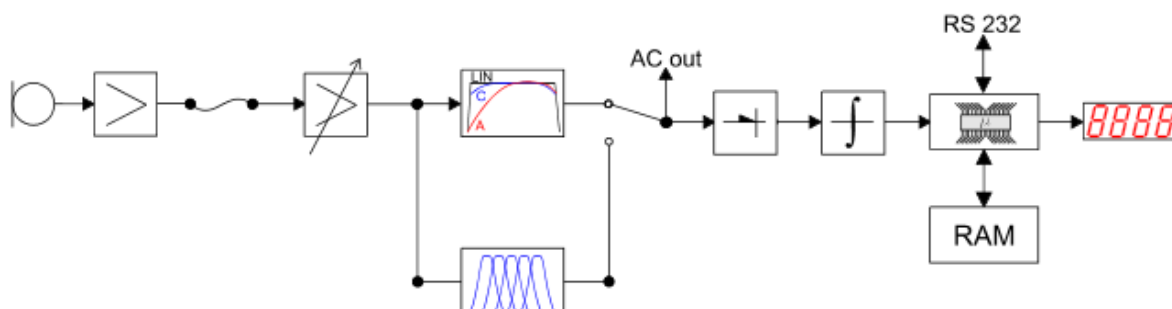
- mikrofon – przetwornik akustyczno-mechaniczny,
- przedwzmacniacz -dopasowujący charakterystykę elektryczną mikrofonu do układu miernika,
- zestaw filtrów korekcyjnych,
- detektor wartości skutecznej i szczytowej
- układ stałych czasowych,
- układ logarytmiczny.

Budowę miernika analogowego (np. Sonopan I-01, Brüel&Kjær 2209) przedstawiono na rysunku 16. Posiada on wskaźnik wskazówkowy.



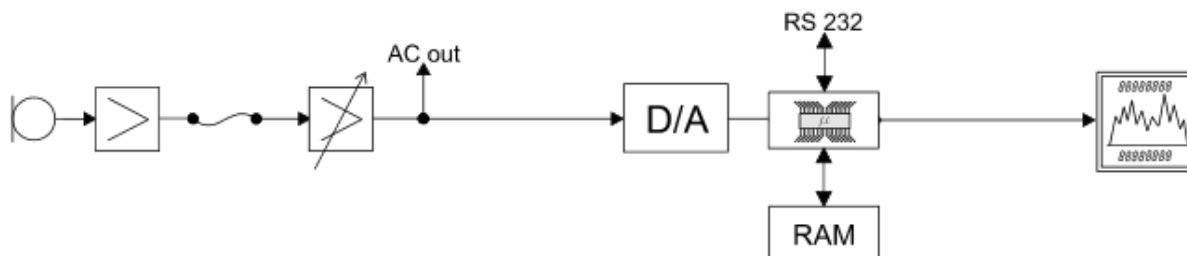
Rys. 16. Budowa analogowego miernika poziomu dźwięku [2]

Na rysunku 17 pokazano schemat budowy miernika analogowo-cyfrowego z wyświetlaczem cyfrowym (np. Brüel&Kjær 2231).



Rys. 17. Budowa analogowo-cyfrowego miernika poziomu dźwięku [2]

Najbardziej zaawansowany miernik cyfrowy posiada wyświetlacz graficzny, a jego budowę pokazuje rysunek 18 (np. SVAN 945).



Rys. 18. Budowa cyfrowego miernika poziomu dźwięku [2]

Opisywane wyżej stałe czasowe SLOW, FAST, IMPULS opisują szybkość reakcji miernika na zmianę poziomu dźwięku (wzrost lub spadek). Stała czasowa SLOW = 1s, FAST = 125ms, Impuls = narastanie 35ms / spadek 1,5s.

Stała czasowa SLOW uwypukla udział dźwięków o amplitudzie wolnozmienniej w czasie, pozwalając np. wyeliminować krótkotrwałe zakłócenia akustyczne niebędące przedmiotem

badania. Natomiast zastosowanie stałej czasowej FAST do pomiaru sygnału o amplitudzie szybkozmiennej w czasie ( $\ll 1s$ ) spowoduje uzyskanie wyniku pomiaru mniejszego niż uzyskiwany dla stałej czasowej SLOW. Stała czasowa IMPULS odpowiada reakcji ucha na dźwięki impulsowe i uderzeniowe, obecnie wartości poziomów dla tej stałej czasowej nie są normowane.

## Obsługa sonometru

Sonometr wykorzystywany na zajęciach to analogowo cyfrowy miernik poziomu dźwięku firmy Brüel&Kjær typu 2231 pokazany na rysunku 19.



Rys. 19. Miernik poziomu dźwięku Brüel&Kjær 2231

## Zasilanie

Jeśli baterie nie są włożone należy umieścić je w szufladce znajdującej się po prawej stronie sonometru.

## Montaż mikrofonu

Przed zamontowaniem mikrofonu należy upewnić się, że przełącznik Pol. Voltage jest ustawiony w pozycji 0V, w innym przypadku istnieje ryzyko uszkodzenia membrany mikrofonu. Następnym etapem jest włożenie przedwzmacniacza mikrofonowego ZC0020 do gniazda (rys. 20) i przykręcenie do urządzenia. Teraz można przystąpić do przyłączenia mikrofonu do sonometru. Należy ostrożnie wyciągnąć mikrofon typu 4155 z pudełka i bez dotykania membrany przykręcić do przedwzmacniacza mikrofonowego ZC0020.



Rys. 20. Gniazdo na przedwzmacniacz mikrofonowy ZC0020

## Ustawianie współczynnika korekcji K-Factor

Aby sprawdzić nastawę tego parametru, przy włączonym urządzeniu i przełączniku Load/Run w pozycji Run, należy wcisnąć przycisk K-Factor. W celu zmiany współczynnika należy przełączyć przełącznik Load/Run w pozycję Load i nacisnąć przycisk K-Factor. Do ustawienia wartości użyć przycisków od 0 do 9 oraz +/- (np. żeby ustawić wartość 0,6 należy nacisnąć kolejno 0 i 6). Na koniec przełączyć przełącznik Load/Run na Run.

## Stałe czasowe

Do sprawdzenia, która stała czasowa SLOW, FAST, czy IMPULS jest aktualnie wybrana należy nacisnąć przycisk Time Weightning. Aby zmienić tę nastawę należy przytrzymując przycisk Time Weightning wciskać Selector▲ lub Selector▼, aż do uzyskania odpowiedniej nastawy.

## Korekcje częstotliwościowe

Urządzenie posiada 4 filtry korekcyjne:

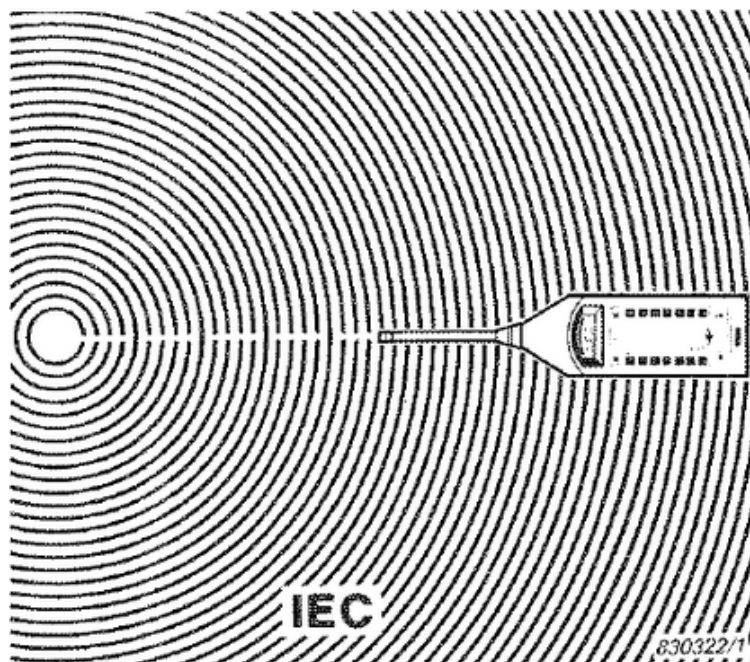
- A – korekcja A,
- C – korekcja C,
- L<sup>Γ</sup> – liniowa ograniczona <10Hz; 20kHz>,
- L<sup>Γ</sup> – liniowa szerokopasmowa <1Hz; 70kHz>.

Aktualnie wybraną korekcję sprawdza się naciskając przycisk Frequency Weighting, a zmienia przytrzymując przycisk Frequency Weighting oraz naciskając Selector▲ lub Selector▼, aż do uzyskania oczekiwanego filtra.

## Frontal/Random

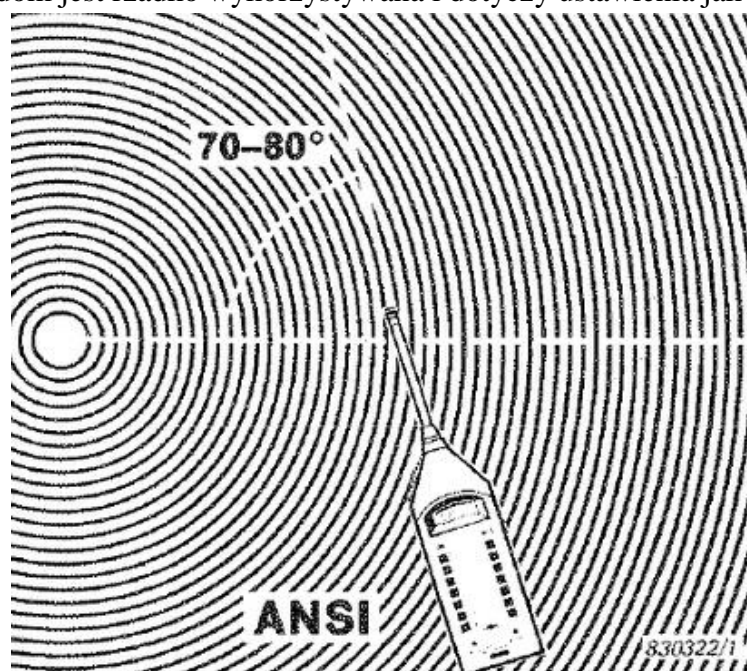
W zależności od położenia mikrofonu w stosunku do mierzonego źródła dźwięku należy ustawić parametr Frontal/Random.

Pozycja Frontal jest wykorzystywana w większości pomiarach i dotyczy ustawienia mikrofonu na wprost rozchodzącej się fali jak na rysunku 21.



Rys. 21. Pozycja Frontal [13]

Pozycja Random jest rzadko wykorzystywana i dotyczy ustawienia jak na rysunku 22.



Rys. 22. Pozycja Random [13]

Nastawę zmienia się przytrzymując przycisk Frontal/Random oraz naciskając Selector ▲ lub Selector ▼.

### Zakres

Do ustawienia zakresu pomiarowego używa się przycisku FSD (Full Scale Deflection). Aktualną nastawę sprawdza się poprzez naciśnięcie tego przycisku. Aby zmienić należy przytrzymać przycisk FSD oraz naciskać przyciski Selector ▲ lub Selector ▼ (wartości wskazywane przez urządzenie będą powiększone o współczynnik K-Factor. Dostępne zakresy znajdują się w tabeli 4.



Tabela 4. Zakresy pomiarowe [13]

120 dB FSD	60 – 130 dB
110 dB FSD	50 – 120 dB
100 dB FSD	40 – 110 dB
90 dB FSD	30 – 100 dB
80 dB FSD	20 – 90 dB
70 dB FSD	10 – 80 dB
60 dB FSD	0 – 70 dB

### Wyświetlany parametr

Sonometr typu 2231 może pokazać 11 parametrów:

- SPL – (Sound Pressure Level) pomiar wartości RMS ciśnienia akustycznego co 1 s,
- LEQ – (Equivalent Continuous Sound Level) pomiar ekwiwalentnego poziomu ciśnienia akustycznego ciągłego sygnału,
- SEL – (Sound Exposure Level) pomiar poziomu ekspozycji dźwięku w przedziale czasowym 1 s,
- INST – (Instantaneous) pomiar chwilowy, bieżący poziomu wartości RMS poziomu ciśnienia akustycznego w przedziale 1 s,
- MINL – (Minimum RMS Level) pomiar minimalnej wartości poziomu RMS ciśnienia akustycznego od chwili rozpoczęcia pomiaru,
- MAXL – (Maximum RMS Level) pomiar maksymalnej wartości poziomu RMS ciśnienia akustycznego od chwili rozpoczęcia pomiaru,
- MAXP – (Maximum Peak Level) pomiar wartości szczytowej (peak) poziomu ciśnienia akustycznego od chwili rozpoczęcia pomiaru,
- PEAK – pomiar wartości szczytowej (peak) poziomu ciśnienia akustycznego w przedziałach 1 s,
- UNR – (Under Range) pomiar procentowej zawartości poziomu ciśnienia akustycznego poniżej przedziału pomiarowego w okresie pomiaru,
- OVR – (Over Range) pomiar procentowej zawartości poziomu ciśnienia akustycznego powyżej przedziału pomiarowego w okresie pomiaru,
- OVL – (Level Over Range) pomiar procentowej zawartości impulsów sygnału przesterowujących urządzenie w okresie pomiarów.

Do sprawdzania ustawionego parametru służy przycisk Displayed Parameter. Aby wybrać parametr, który ma być wyświetlany na wyświetlaczu należy przytrzymać przycisk Displayed Parameter i naciskać przycisk Selector▲ lub Selector▼, aż do uzyskania oczekiwanego parametru.

### Czas pomiaru

Sonometr może automatycznie zatrzymać pomiar po upływie ustawionego czasu. Przy pomocy funkcji Preset Time można ustawić czas pomiaru od 1 s do 99 godz. 59 min i 59 s.

Czas pomiaru można ustawić po przełączeniu przełącznika Load/Run w pozycję Load. Następnie należy nacisnąć przycisk Preset Time oraz wpisać zadany czas przyciskami 0 do 9 w formacie hh:mm. Aby ustawić sekundy należy przytrzymać przycisk s i wpisać czas za pomocą przycisków 0 do 9 w formacie ss. Po zadaniu czasu należy przesunąć przełącznik Load/Run w pozycję Run.

Żeby zobaczyć ile czasu upłynęło od rozpoczęcia pomiaru należy nacisnąć przycisk Elapsed Time, na wyświetlaczu ukaże się czas w formacie hh:mm. Przytrzymując przycisk Elapsed Time i naciskając przycisk s można zobaczyć również sekundy.

## **Resetowanie pomiaru**

Do skasowania aktualnego pomiaru i rozpoczęcia nowego służy funkcja Reset All. Aby jej użyć należy jednocześnie nacisnąć przyciski 8 i 9.

Funkcja Reset All nie resetuje parametrów: K-Factor, Special Function, Preset Time, Time Weighting, Frequency Weighting, Frontam/Random, FSD.

## **Resetowanie Max/Min**

Funkcja Reset Max/Min służy do zresetowania wartości MINL, MAXL i MAXP bez resetowania pozostałych parametrów. Należy nacisnąć przycisk Reset Max/Min.

## **Pauza**

Po naciśnięciu przycisku Pause pomiar zostanie wstrzymany, aż do powtórnego naciśnięcia przycisku Pause lub do zresetowania pomiaru.

## **Funkcje specjalne – zapisywanie pomiaru**

Sonometr pozwala zapisać do 99 pomiarów w pamięci wewnętrznej. W celu zapisania pomiaru należy przywołać odpowiednią funkcję specjalną. Można to zrobić (w położeniu Run przełącznika Load/Run) przytrzymując przycisk Special Function oraz naciskając przyciski Selector▲ lub Selector▼, aż do pojawienia się funkcji S (np. S.0:00). Następnie należy przełączyć Load/Run na pozycję Load, nacisnąć przycisk Special Function i przyciskami 0 do 9 wpisać numer pod jakim pomiar ma być zapisany. Po przełączeniu przełącznika Load/Run z powrotem w pozycję Run, sonometr jest gotowy do zapisania pomiaru pod wybranym numerem. Następne pomiary zostaną zapisane pod kolejnymi numerami. Ostatni zapisany pomiar można sprawdzić pod przyciskiem Special Function.

## **Funkcje specjalne – wczytywanie zapisanych pomiarów**

Do wczytania zapisanego pomiaru służy funkcja Recall to Display. W celu jej przywołania należy, w położeniu Run przełącznika Load/Run, przytrzymać przycisk Special Function oraz naciskać przyciski Selector▲ lub Selector▼, aż do uzyskania komendy RE (np. RE:00). W położeniu Load przełącznika Load/Run nacisnąć przycisk Special Function i wybrać przyciskami 0 do 9 pomiar do wczytania. Po przełączeniu przełącznika Load/Run w pozycję Run na ekranie pojawi się komunikat RE##, gdzie ## to przywołany numer. Po naciśnięciu przyciski Displayed Parameter oraz przycisków Selector▲ lub Selector▼ można przełączać pomiędzy skrótami możliwych do odczytania parametrów. Aby zobaczyć wartość wybranego parametru należy puścić wszystkie przyciski.

Parametry jakie można odczytać przy pomocy tej funkcji:

- R No – numer rekordu (np. RE01),
- ELT – czas trwania pomiaru w godzinach i minutach (np. 02:30), po naciśnięciu przycisku s również w sekundach,
- TIME – czas, o której pomiar został rozpoczęty (np. 10:00), po naciśnięciu przycisku s również sekundy,
- LEQ – pomiar ekwiwalentnego poziomu ciśnienia akustycznego ciągłego sygnału (np. 46.8),
- SEL – pomiar poziomu ekspozycji dźwięku (np. 56.8),
- UNR – pomiar procentowej zawartości poziomu ciśnienia akustycznego poniżej przedziału pomiarowego w okresie pomiaru (np. 00.00),
- OVR – pomiar procentowej zawartości poziomu ciśnienia akustycznego powyżej przedziału pomiarowego w okresie pomiaru (np. 00.00),
- OVL – pomiar procentowej zawartości impulsów sygnału przesterowujących urządzenie w okresie pomiarów (np. 00.31),
- MINL – pomiar minimalnej wartości poziomu RMS ciśnienia akustycznego (np. 40.5),
- MAXL – pomiar maksymalnej wartości poziomu RMS ciśnienia akustycznego (np. 58.5),

- MAXP – pomiar wartości szczytowej (peak) poziomu ciśnienia akustycznego (np. 81.5),
- S-U – kod konfiguracji (np. FFA, czyli F – Fast, F – Frontal, A – korekcja A).

Ważne, aby przed wyłączeniem urządzenia nacisnąć przycisk Exit Recall, aby wyjść z funkcji Recall to Display. W przeciwnym razie zaistnieje potrzeba ponownego wgrania oprogramowania do sonometru.

### Funkcje specjalne – kasowanie pomiarów

Do kasowania zapisanych pomiarów służy funkcja Erase Store. Można ją przywołać w pozycji Run przełącznika Load/Run po przytrzymaniu przycisku Special Function i naciskaniu przycisków Selector▲ lub Selector▼, aż do uzyskania funkcji E. Żeby skasować zapisane pomiary należy przejść w pozycję Load przełącznika Load/Run i wcisnąć przycisk Special Function, następnie wybrać przyciskami 0 do 9 pomiar, który ma być skasowany i przełączyć się w pozycję Run. Do skasowania wszystkich pomiarów służy kod 999, należy go wpisać zamiast numeru pomiaru.

### Pistofon

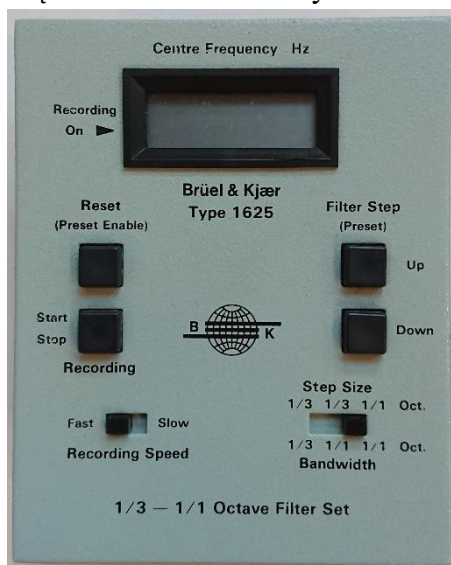
Jest to urządzenie wytwarzające w sposób mechaniczny ton o stałym poziomie dźwięku, a dokładniej ciśnienia akustycznego. Służy do kalibracji mierników poziomu dźwięku. Pistofon (rys. 23) składa się z wężki mieszczącej wzorcowany odbiornik dźwiękowy i tłok, który wykonuje drgania sinusoidalne powodując okresowe zagęszczenia i rozrzedzenia powietrza we wnęce; przemieszczenie tłoka mierzy się zwykle za pomocą mikroskopu.



Rys. 23. Pistofon [14]

### Moduł filtrów

Sonometr Brüel&Kjær typu 2231 ma możliwość przyłączenia modułu z zestawem filtrów oktaowych i tercjowych. Moduł wykorzystywany na zajęciach to typ 1625 wyświetlaczem cyfrowym (rys. 24). Po uruchomieniu modułu sonometr będzie wyświetlał wartości wybranych na nim parametrów tylko dla częstotliwości ustawionych na module filtrów.



Rys. 24. Moduł filtrów Brüel&Kjær typ 1625

Przed przystąpieniem do pomiarów należy podłączyć moduł do sonometru i zapewnić mu osobne zasilanie przy pomocy baterii wkładanych do szufladki po prawej stronie modułu.

Po podłączeniu modułu, na sonometrze należy przełączyć przełącznik Ext. Filter na pozycję In. Uruchomi to moduł. Przełącznik Recording Speed należy ustawić zgodnie z wybranym Time Weighting na sonometrze.

Przełącznik Step Size/Bandwidth służy do zmiany pomiędzy filtrami oktawowymi i tercjowymi. Ważne, aby przełączać go tylko w momencie, kiedy na wyświetlaczu modułu jest wyświetlona wartość Lin.

Przyciski Filter Step służą do zmiany wybranych oktaw lub tercji. Na wyświetlaczu pokazane są częstotliwości środkowe oktaw lub tercji. Przyciskiem Up można przechodzić na wyższe oktawy lub tercje, a przyciskiem Down na niższe.

## **Procedura pomiaru dla przyrządu B&K typ 2231**

1. Wyciągnij sonometr z walizki i włóż baterie do szufladki na baterie.
2. Ustaw przełącznik Load/Run w pozycję Run, przełącznik Pol. Voltage na pozycję 0V oraz Ext. Filter na Out.
3. Podłącz przedwzmacniacz mikrofonowy ZC0020 oraz ostrożnie przykręć do niego mikrofon typu 4155.
4. Włącz urządzenie przełącznikiem Power.
5. Ustaw zakres przyciskiem FSD na 120.0.
6. Ustaw korekcję częstotliwościową przyciskiem Frequency Weighting na L<sup>r</sup> – liniowa szerokopasmowa.
7. Ustaw wyświetlany parametr przyciskiem Displayed Parameter na SPL.
8. Wyciągnij pistofon z pudełka i zamontuj odpowiednią końcówkę pasującą do mikrofonu zamontowanego na sonometrze.
9. Wsuń mikrofon do otworu w końcówce pistofon, włącz pistofon.
10. Wskazania sonometru powinny wskazywać wartość podaną na karcie katalogowej pistofon skorygowaną o poprawkę z barometru, wyłącz pistofon.
11. Jeśli tak nie jest ustaw współczynnik K-Factor w pozycji Load, tak aby po zsumowaniu wyświetlonej przez sonometr wartości oraz współczynnika K-Factor i poprawki z barometru wartość ta była równa tej z karty katalogowej pistofon.
12. Schowaj pistofon.
13. W pozycji Run wybierz zakres odpowiedni do oczekiwanych wyników pomiaru przy pomocy przyciski FSD.
14. Przy pomocy przycisku Frequency Weighting wybierz odpowiednią korekcję.
15. Przy pomocy przyciski Displayed Parameter można wybrać parametr jaki ma być wyświetlany,
16. Przy pomocy przycisku Special Function wybrać funkcję zapisu S.
17. Przejść na pozycję Load przełącznika Load/Run, nacisnąć przycisk Special Function i wpisać numer, pod jakim ma być zapisany pierwszy pomiar. Przełączyć na Run.
18. Nacisnąć przycisk Pause.
19. Sprawdzić przy pomocy przycisku Preset Time oraz przycisku s jaki czas pomiaru jest ustawiony.
20. Jeśli różni się od oczekiwanego przejść w pozycję Load, nacisnąć Preset Time (i przycisk s) i ustawić odpowiedni czas. Przejść w pozycję Run.
21. Użyć funkcji Reset All.
22. Do sprawdzenia ustawionego czasu można użyć przycisku Preset Time (i przycisku s).
23. Do sprawdzenia ile czasu minęło od rozpoczęcia pomiaru służy przycisk Elapsed Time (i przycisk s).
24. Po zakończeniu pomiarów nacisnąć przycisk Pause.

25. Po naciśnięciu przycisku Special Function wyświetli się numer, pod którym został zapisany ostatni pomiar.
26. Do odczytywania zapisanych parametrów, w pozycji Run przełącznika Load/Run, wcisnąć przycisk Special Function i wybrać funkcję RE. Następnie przełączyć na pozycję Load, wcisnąć przycisk Special Function i wpisać numer pomiaru do wczytania. Przełączyć na Run.
27. Po naciśnięciu Przycisku Displayed Parameter i wybraniu parametru do wyświetlenia, puścić przyciski. Wartość wybranego parametru zostanie wyświetlona.
28. Po zakończeniu wczytywania zapisanych pomiarów wcisnąć przycisk Exit Recall.
29. Teraz można wyłączyć sonometr ustawiając przełącznik Power na pozycję Off.

## **Źródła**

- [1] Cempel C., *Wibroakustyka stosowana*, PWN, 1978.
- [2] Kirpluk M., *Podstawy akustyki*, NTL-M. Kirpluk, 2014.
- [3] <https://www.tremolo.pl/Artykuly/Akustyka/Dobor,materialow,na,wygluszenia.html>
- [4] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Acoustic/invsqs.html>
- [5] [http://www.ftb.pl/podstawowe-informacje-o-dzwieku\\_news\\_45939.htm](http://www.ftb.pl/podstawowe-informacje-o-dzwieku_news_45939.htm)
- [6] <https://asystentbhp.pl/haas-w-srodowisku-pracy-klasyfikacja-warto-804/>
- [7] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Decybel>
- [8] <https://rokostageman.wordpress.com/2010/04/20/mikrofony-rodzaje-i-budowa/>
- [9] <https://www.mediacollege.com/audio/microphones/dynamic.html>
- [10] <https://only4music.com/czytelnia/18-musictech/704-mikrofony-czyli-jak-nagrac-swoj-glos>
- [11] <https://realizator.pl/Testy/MicW-M416-i-MicW-M215.html>
- [12] <https://zakamarkiaudio.pl/2012/07/mikrofony-cz-2-charakterystyka-kierunkowa.html>
- [13] Instrukcja obsługi sonometru Brüel&Kjær typu 2231 (po angielsku).
- [14] <https://www.bksv.com/en/products/transducers/acoustic/calibrators/4228>