

Pomiary akustyczne

mikrofonów, głośników,
słuchawek i pomieszczeń

Pomiary akustyczne

Pomiary akustyczne – pomiary, w których występuje fala akustyczna.

- Pomiary przetworników elektroakustycznych
 - mikrofony, głośniki, słuchawki
- Pomiary pomieszczeń
 - czas pogłosu, zrozumiałość mowy, izolacyjności
- Specjalne pomiary, np. quasi-bezechowe.

Pomiary mikrofonów i głośników

- Pomiary wymagają pary przetworników – mierzonego i wzorcowego (pomiarowego).
- Mierzymy parametry jednego z przetworników.
- Drugi przetwornik – wzorcowy, o znanych parametrach. Obowiązuje zasada „wyższej klasy”.
- Pomiar powinien być przeprowadzany w pomieszczeniu, w którym wytłumione są odbicia fal dźwiękowych – chcemy mierzyć tylko falę bezpośrednią. Najlepiej: komora bezechowa.

Komora bezechowa

Przykład komory bezechowej – pomieszczenia wytłumionego w taki sposób, aby odbite fale dźwiękowe były możliwie najbardziej wytłumione.



Komora bezechowa

Istotne parametry komory bezechowej:

- rozmiar – decyduje o możliwości pomiaru na niskich częstotliwościach (istotne wszystkie wymiary, również wysokość)
- ustroje tłumiące (kliny, siatka na podłodze)
 - rodzaj materiału (właściwości tłumiące)
 - kształt i rozmiar,
 - ułożenie (zapewnienie, że fale odbite nie wydostaną się na zewnątrz)
- izolacja drgań (profesjonalne komory są „pływające”)
- izolacja od zakłóceń zewnętrznych
- brak wewnętrznych zakłóceń (wentylatory, oświetlenie)

POMIARY MIKROFONÓW

- Pomiar parametrów mikrofonów dokonuje się przy użyciu **wzorcowego źródła dźwięku** („głośnik pomiarowy”).
- Źródło dźwięku i badany mikrofon ustawiane są:
 - na osi, zwrócone do siebie (odległość: zwykle 1 m),
 - na jednakowej wysokości (zwykle 1 m).
- Sygnał **testowy: akustyczny**, emitowany przez źródło dźwięku.
- Sygnał **analizowany: elektryczny**, mierzony na wyjściu mikrofonu.

Kalibracja mikrofonów pomiarowych

- Mikrofon pomiarowy wymaga kalibracji – określenia napięcia na wyjściu, powstającego przy określonym poziomie fali akustycznej na membranie.
- Do określenia tego poziomu służy **kalibrator akustyczny**, montowany na mikrofonie.
- Kalibrator wytwarza sinusa 1 kHz.
- Dwa najczęściej stosowane poziomy kalibracyjne:
 - **94 dB SPL** – typowo, odpowiada ciśnieniu 1 Pa
 - 114 dB SPL („+20 dB”) – stosowany przy dużym zaszumieniu



Czułość mikrofonu

Czułość mikrofonu (*sensitivity*): stosunek otrzymanego efektu elektrycznego do wartości ciśnienia akustycznego, które ten efekt wytworzyło.

- Pomiar napięcia powstającego na wyjściu mikrofonu przy ciśnieniu akustycznym na membranie równym **1 Pa**
= dźwięk o poziomie **94 dB SPL**
- Wynik w skali liniowej: np. 1,6 mV/Pa
- Wynik w skali decybelowej: względem napięcia 1 V,
np. $20 \log_{10}(0,0016) = -56 \text{ dBV/Pa}$

Przypomnienie: $1 \text{ Pa} \equiv 20 \log_{10} (1 / (2 \cdot 10^{-5})) = 94 \text{ dB SPL}$

Kalibracja mikrofonów pomiarowych

- Montujemy kalibrator na mikrofonie.
- Wysyłamy z kalibratora sygnał akustyczny 94 dB.
- Mierzymy napięcie na wyjściu mikrofonu.
- Uzyskujemy wartość **czułości** mikrofonu pomiarowego.

Zapamiętajmy: powinniśmy zawsze wykonać kalibrację dla każdego mikrofonu wzorcowego, który jest używany w pomiarach, zanim zaczniemy właściwe pomiary!

Pomiar czułości metodą porównawczą

Metoda porównawcza pomiaru czułości:

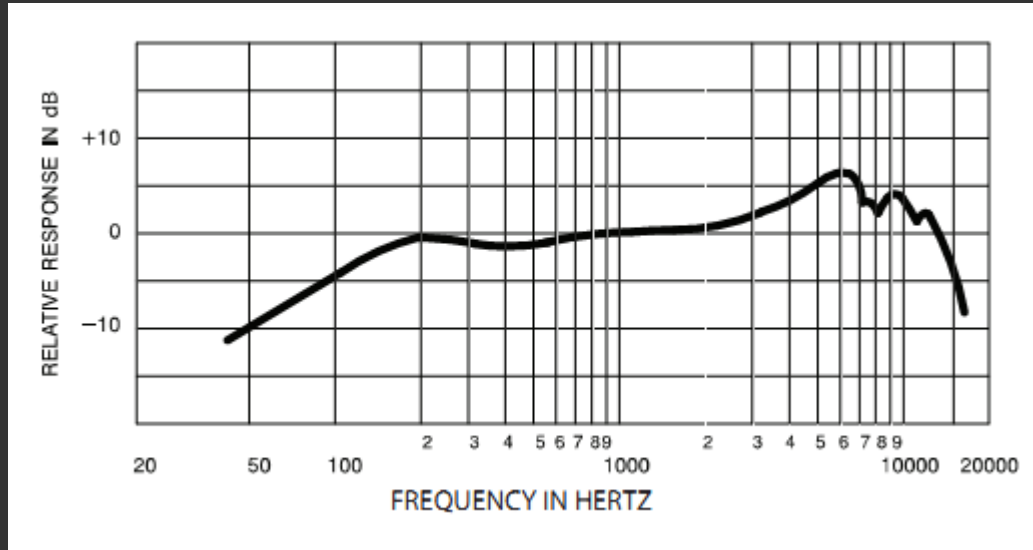
- mikrofon **wzorcowy** ustawiamy w odległości 1 m od wzorcowego źródła dźwięku,
- kalibrujemy mikrofon wzorcowy – mierzymy czułość,
- ustawiamy poziom sygnału na generatorze tak, aby uzyskać na wyjściu mikrofonu wzorcowego napięcie równe jego czułości – na membranie mamy 94 dB SPL,
- stawiamy **mierzony** mikrofon w miejscu wzorcowego,
- mierzymy napięcie na badanym mikrofonie – mamy jego czułość.

Charakterystyka częstotliwościowa

- Charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu: czułość mierzona w funkcji częstotliwości.
- Ustalenie poziomu sygnału testowego dla 1 kHz, tak jak poprzednio.
- Mierzymy czułość badanego mikrofonu dla różnych częstotliwości z pasma akustycznego.
- Wyniki są zwykle przeliczane na względną skalę decybelową, czułość dla 1 kHz = 0 dBr.

Charakterystyka częstotliwościowa

Przykładowa charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu:



Opis tekstowy charakterystyki częstotliwościowej:

Frequency response: 40 to 15 000 Hz, ± 10 dB

musi być podana odchyłka (zwykle 3 dB lub 10 dB)

Charakterystyka kierunkowa

Pomiar charakterystyki **kierunkowej** mikrofonu: pomiar czułości w zależności od kąta padania fali akustycznej.

Sposób dokonywania pomiarów:

- czułość mierzymy tak, jak poprzednio,
- badany mikrofon jest obracany, np. znajduje się na stole obrotowym,
- pomiary powtarza się dla kilku częstotliwości, zwykle 6-8 wartości.

Jest to charakterystyka kierunkowa dla kątów poziomych, można też mierzyć dla różnych kątów pionowych.

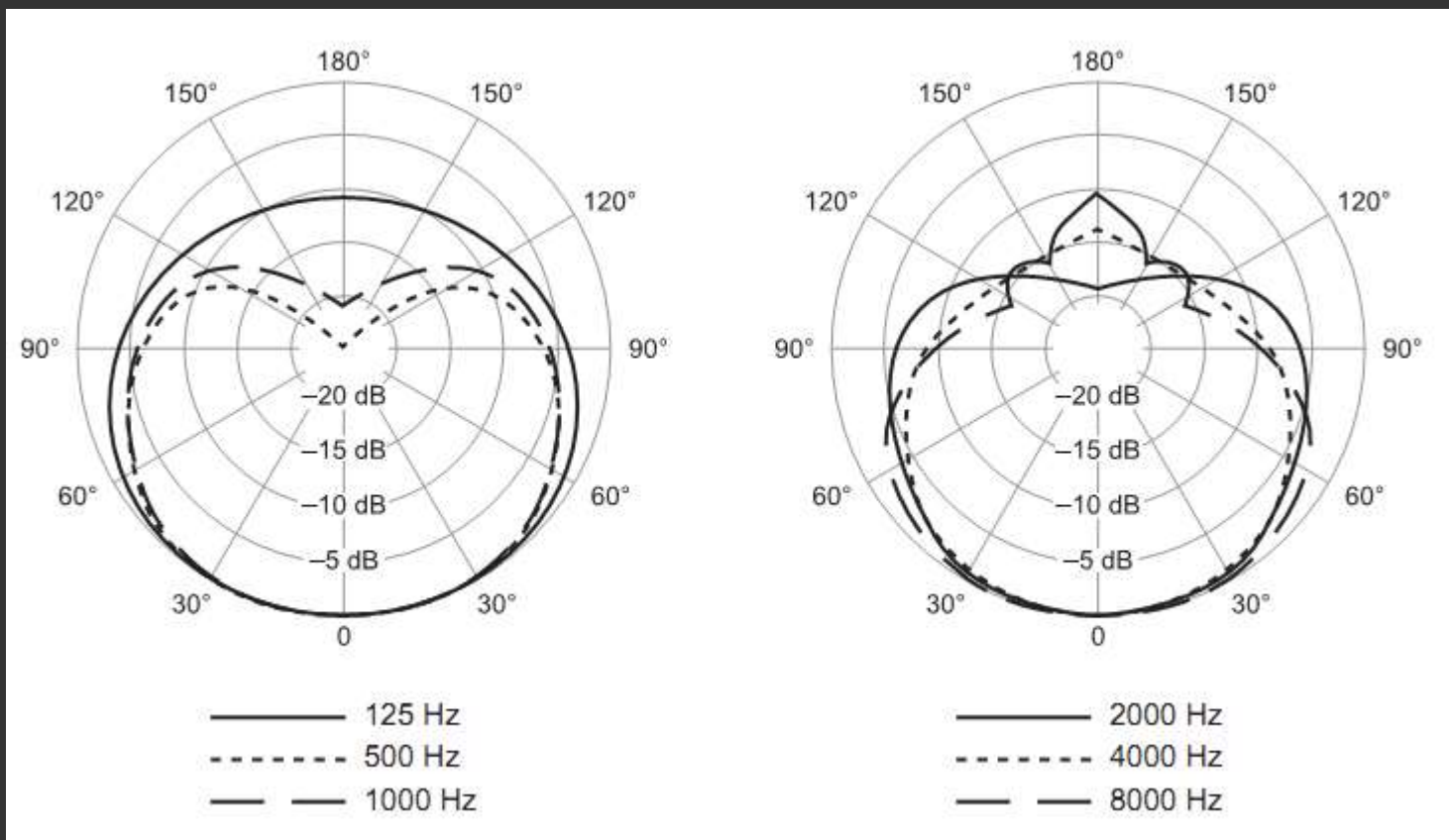
Charakterystyka kierunkowa

Zasada tworzenia wykresów:

- wyniki są wyrażane w decybelach względnych, normalizacja dla każdej częstotliwości osobno: wynik dla kąta 0 stopni = 0 dBr,
- wyniki przedstawia się we współrzędnych biegunowych (kąt vs. czułość),
- kąt 0 zwykle na dole wykresu,
- na jednym wykresie maksymalnie 4 charakterystyki, jeśli jest ich więcej: dzielimy na osobne wykresy,
- wykresy powinny być czytelne w wersji „czarno-białej”.

Charakterystyka kierunkowa

Przykładowe wykresy charakterystyki kierunkowej mikrofonu



Inne parametry mikrofonów

- **Maksymalny poziom wyjściowy (*Max SPL*):**
maksymalny poziom sygnału, w którym zniekształcenia THD+N nie przekraczają ustalonej wartości, np. 1%.
- **Poziom szumu (*self noise*):**
zmierzony przy braku zewnętrznego pobudzenia (szum indukowany w mikrofonie), wymaga dobrej izolacji mikrofonu od zewnętrznych zakłóceń.
- **Dynamika mikrofonu (*dynamic range*):**
różnica wartości maksymalnego poziomu wyjściowego i poziomu szumu.

Czułość cyfrowych mikrofonów

Dla mikrofonów wykonanych w technologii cyfrowej (np. dla cyfrowych mikrofonów MEMS):

- czułość jest podawana w jednostkach **dBFS**
– względem pełnej cyfrowej skali;
- uwaga: jest to wartość **szczytowa** dla sinusa,
nie wartość skuteczna jak dla analogowych mikrofonów;
- typowa wartość: **-26 dBFS** (= 120 – 94);
- wtedy wartość skuteczna (rms) dla sinusa: **-29,01 dBFS**;
- poziom dźwięku 120 dB SPL powoduje pełne
wysterowanie mikrofonu (0 dBFS).

POMIARY GŁOŚNIKÓW

Sposób mocowania mierzonych głośników:

- w obudowie przeznaczonej dla badanego głośnika,
- w standardowej (znormalizowanej) obudowie,
- na standardowej odgradzie (płyta),
- bez obudowy lub odgrody.

Pomiary wykonuje się przy użyciu **mikrofonu pomiarowego**, ustawionego na osi z głośnikiem, zazwyczaj w odległości 1 m od siebie, na wysokości 1 m.

Pamiętajmy o kalibracji mikrofonu pomiarowego!

Czułość głośnika

Pomiar **czułości** (*sensitivity*) głośnika:

- badany głośnik pobudzany jest szumem wąskopasmowym lub sinusem, o mocy 1 W,
- mierzony jest sygnał elektryczny na wyjściu mikrofonu pomiarowego (wzorcowego),
- znając czułość mikrofonu pomiarowego, można obliczyć ciśnienie akustyczne na membranie mikrofonu,
- wynik jest wyrażany jako poziom ciśnienia dźwięku względem mocy 1 W, przy odległości 1 m,
- jeżeli odległość jest inna, konieczna jest korekta.

Czułość głośnika

Przykład pomiaru czułości głośnika:

- ustawiamy głośnik na osi w odległości 1 m od mikrofonu pomiarowego,
- doprowadzamy do głośnika moc elektryczną 1 W, czyli np. dla głośnika o impedancji 8Ω :
napięcie $U = 2,83 V_{\text{rms}}$
- mierzymy sygnał elektryczny na wyjściu mikrofonu,
- przeliczamy na SPL na membranie mikrofonu,
- mamy wynik pomiaru czułości głośnika, np:
czułość = 105 dB SPL / 1 W @ 1 m

Czułość głośnika

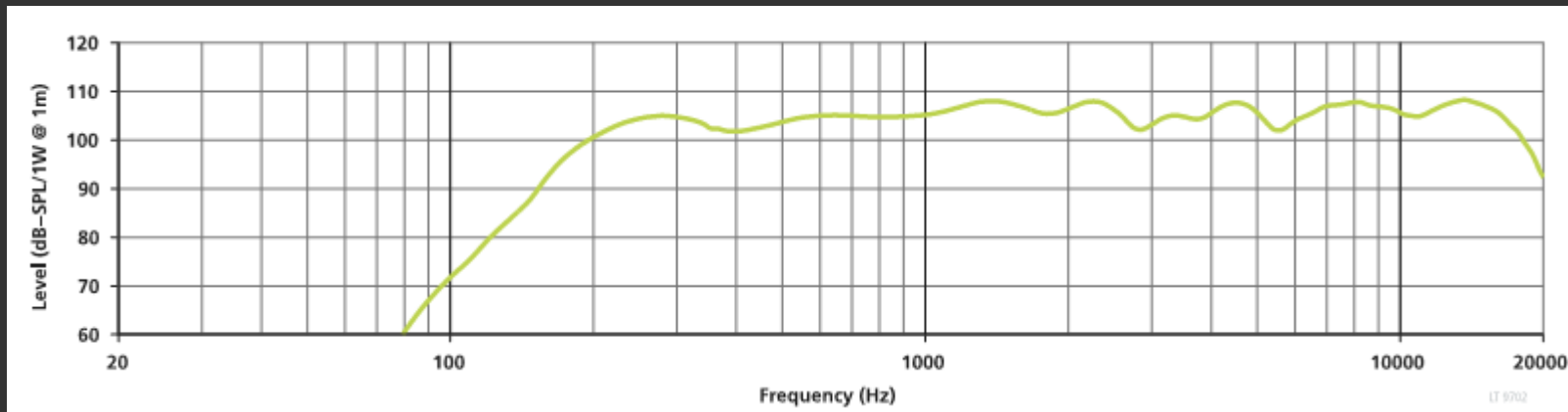
Przykład przeliczania napięcia z mikrofonu na SPL.

- Czułość mikrofonu: $-46 \text{ dBV/Pa} = 5,01 \text{ mV/Pa}$.
- Zmierzone napięcie: np. $2,5 \text{ V}$.
- Wzmocnienie względem czułości:
 $20 \log_{10}(2,5 / 0,00501) = 53,96 \text{ dB}$.
- Wzmocnienie względem SPL:
 $-46 + 53,96 = 7,96 \text{ dB}$
- Zmierzony poziom SPL:
 $94 + 7,96 = 101,96 \text{ dB SPL}$

Oprogramowanie przelicza to automatycznie.

Charakterystyki czułości głośnika

Charakterystyka częstotliwościowa czułości głośnika:
pomiar wykonany dla różnych częstotliwości
(tutaj zwykle nie ma normowania poziomu):



Opis tekstowy – np:

Frequency Response (± 3 dB): 220 Hz – 16 kHz

Charakterystyki skuteczności głośnika

Na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego można obliczyć charakterystyki skuteczności (czułości) głośnika:

- **charakterystyka skuteczności napięciowej**
stosunek zmierzonego ciśnienia akustycznego do napięcia zasilającego głośnik pomiarowy
- **charakterystyka skuteczności prądowej**
stosunek zmierzonego ciśnienia akustycznego do natężenia prądu zasilającego głośnik pomiarowy
- **charakterystyka skuteczności mocowej**
pierwiastek z iloczynu skuteczności napięciowej i mocowej, stosunek ciśnienia akustycznego do mocy elektrycznej doprowadzonej do głośnika

Charakterystyka kierunkowa głośnika

Pomiar charakterystyki kierunkowej głośnika jest dokonywany podobnie jak w przypadku mikrofonów.

- Głośnik umieszczany jest na obrotowym stole.
- Mikrofon pomiarowy rejestruje pomiar dla poszczególnych wartości kąta ustawienia głośnika.
- Pomiar dla kilku częstotliwości.
- Wyniki prezentowane są we współrzędnych biegunowych.
- Czasami wykonuje się pomiary osobno dla kątów poziomych i pionowych.

Indeks kierunkowości

Indeks kierunkowości głośnika (*Directivity Index, DI*)

określa jaka część energii promieniowanej przez głośnik jest skupiona w obszarze wyznaczonym przez oś głośnika.

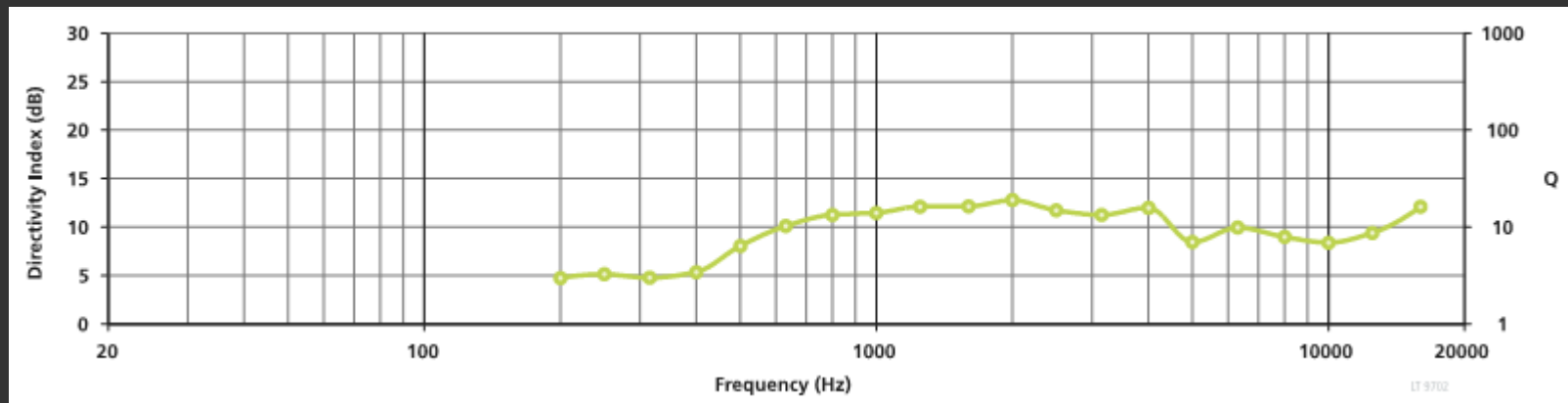
- Pomiar na osi w odległości 1 m jest odnoszony do źródła idealnie wszechkierunkowego, emitującego taką samą moc jak mierzony głośnik.
- W praktyce: pomiar na osi w stosunku do uśrednionego wyniku z wszystkich kierunków
- $DI = 0$ oznacza, że głośnik jest idealnie wszechkierunkowy (brak różnic z głośnikiem odniesienia).
- Większy DI oznacza, że więcej energii fali jest skupione na osi głośnika – jest on bardziej kierunkowy.

Indeks kierunkowości

Wyznaczenie indeksu kierunkowości jest skomplikowane, wymaga pomiarzenia dokładnych charakterystyk kierunkowych w dwóch wymiarach (kąty poziome i pionowe) dla kilku częstotliwości. Pomiar taki wykonuje się w sposób zautomatyzowany.

Wynik pomiaru – charakterystyka w funkcji częstotl.:

- Q – liniowy współczynnik kierunkowości,
- DI – wskaźnik w decybelach ($DI = 10 \log_{10} Q$)



Sprawność głośnika

Sprawność głośnika (*efficiency*): stosunek mocy akustycznej wypromieniowanej przez głośnik do wielkości elektrycznej (np. mocy) sygnału pobudzającego głośnik.

Metoda pomiaru:

- pomiar ciśnienia akustycznego w odległości r od głośnika, dla różnych kątów,
- pomiar charakterystyki kierunkowej głośnika,
- obliczenie **akustycznej mocy promieniowanej** na podstawie wzoru,
- obliczenie sprawności (stosunek akustycznej mocy promieniowanej do mocy elektrycznej).

Sprawność głośnika

Praktyczne obliczenie sprawności: pomiar czułości, następnie przeliczenie:

$$\text{sprawność} = 10^{(\text{czułość} - 112)/10}$$

- Poziom odniesienia 0 dB SPL = 10^{-12} W
- 1 W to 120 dB
- w odległości 1 m poziom dźwięku zmniejszy się o 8 dB
- zatem zmierzona czułość $120 - 8 = 112$ dB SPL oznacza, że głośnik wyemitował 120 dB, czyli 1 W, zatem sprawność = 100% (1 w skali liniowej)
- wynik będzie nieprawidłowy jeżeli głośnik jest kierunkowy – trzeba wtedy uwzględnić DI.

Inne pomiary głośników

- **Pomiar obciążalności głośnika (*max SPL*)**
maksymalna moc, jaką może przetwarzać głośnik bez ryzyka jego uszkodzenia i przy zachowaniu zniekształceń nieliniowych poniżej zadanej wartości THD+N, np. 1%.
- **Pomiar zniekształceń nieliniowych**
pomiar zniekształceń harmoniczných THD+N, dokonywany podobnie jak w torze fonicznym.
- **Pomiar zniekształceń transjentowych (TIM)**
zachowanie się głośnika w stanach nieustalonych.
- **Testy subiektywne** – ocena jakości dźwięku przez słuchaczy – ekspertów.

POMIARY SŁUCHAWEK

- Pomiar słuchawek powinien być dokonywany w warunkach możliwie najbardziej zbliżonych do tych, w których słuchawki będą użytkowane. Przewód słuchowy tworzy komorę rezonansową.
- Typowe metody pomiaru słuchawek:
 - przy użyciu sztucznego ucha – znormalizowane warunki akustyczne,
 - przy użyciu manekina HATS.
- Komora bezechowa nie jest niezbędna, ale pomieszczenie powinno być wyciszone.

Sztuczne ucho

Sztuczne ucho (*artificial ear*) – urządzenie symulujące pod względem geometrycznym i akustycznym ucho zewnętrzne i środkowe człowieka.

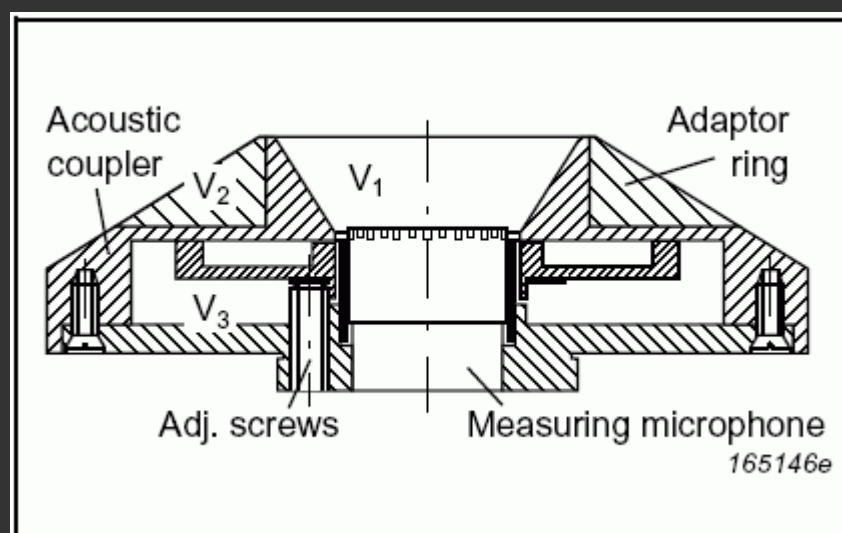
- Akustyczna impedancja wejściowa układu jest taka jak impedancja ucha.
- Słuchawka przyłożona do sztucznego ucha jest tak samo obciążona jak przy przyłożeniu do ucha naturalnego.
- Ciśnienia akustyczne wytworzone wewnątrz sztucznego ucha i w kanale usznym są takie same.

W rzeczywistości sztuczne ucho jedynie przybliża warunki akustyczne panujące w rzeczywistym uchu. Zapewnia jednak stałe i porównywalne warunki pomiaru.

Sztuczne ucho

Zasadniczym elementem sztucznego ucha jest **sprzęgacz** (łącznik, ang. *coupler*) – komora akustyczna symulująca przewód słuchowy. Stosowane są sprzęgacze:

- o pojemności 6 cm^3 – pomiar słuchawek nausznych
- o pojemności 2 cm^3 – pomiar słuchawek dousznych



Pomiar charakterystyk słuchawek

- Pomiaru **czułości** słuchawki (jak i innych pomiarów) dokonuje się przy pomocy sztucznego ucha:
 - na słuchawkę podawane są z generatora sygnały testowe o różnych częstotliwościach
 - wytworzona fala akustyczna jest zamieniana na napięcie przez mikrofon w sztucznym uchu.
- Na podstawie zmierzonej charakterystyki ciśnienia akustycznego można wyznaczyć **charakterystyki czułości** słuchawki w podobny sposób jak przy pomiarach głośników.
- Pomiaru zniekształceń nieliniowych – klasycznie.

Pomiar czułości słuchawek

Metoda pomiaru czułości słuchawek:

- podajemy na słuchawki moc 1 mW, np. przy impedancji słuchawek 32Ω oznacza to napięcie $179 \text{ mV}_{\text{rms}}$
- mierzymy napięcie na skalibrowanym mikrofonie pomiarowym, obliczamy poziom dźwięku SPL,
- charakterystyka częstotliwościowa: pomiar dla różnych częstotliwości przy tym samym poziomie wejściowym, wynik z normowaniem poziomu lub bez,
- charakterystyka mierzona osobno dla każdego kanału, oba kanały zwykle na tym samym wykresie.

Izolacyjność słuchawek

Izolacyjność – zdolność do tłumienia zakłóceń zewnętrznych, pomiar na sztucznym uchu:

- źródło zakłócenia o stabilnym poziomie,
- pomiar na „odkrytym” uchu – poziom zakłóceń,
- pomiar przy założonych słuchawkach, ale bez podanego sygnału,
- różnica wyników daje informacje o współczynniku tłumienności,
- pomiar może być wykonany dla różnych częstotliwości,
- parametr szczególnie istotny dla słuchawek aktywnie tłumiących dźwięk (*noise canceller*).

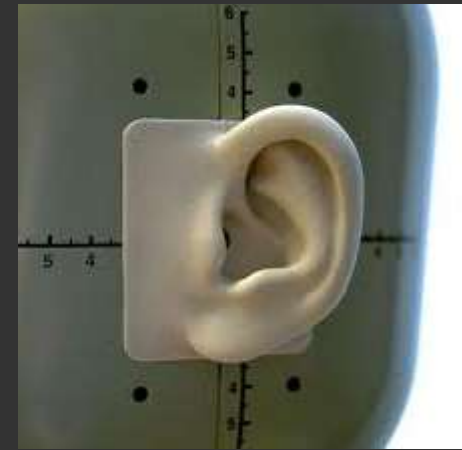
Symulator głowy i torsu

HATS – *Head and Torso Simulator*

Manekin (głowa i tors), zawierający wmontowane mikrofony (w uszach) i głośnik (w ustach). Pomiar:

- poziomu dźwięku odbieranego przez słuchacza, z uwzględnieniem filtracji wprowadzanej przez ciało,
- słuchawek (zamiast sztucznego ucha),
- zrozumiałości mowy od „mówcy”,
- telefonów (mocowanych na manekinie),
- aparatów słuchowych,
- środków ochrony słuchu,
- i wielu innych.

Symulator głowy i torsu (HATS)



POMIARY QUASI-BEZECHOWE

- Przy pomiarach akustycznych (pomiarzy głośników, mikrofonów, pomieszczeń, itp.) powinniśmy mierzyć tylko **bezpośrednią falę dźwiękową**, docierającą najkrótszą drogą od źródła dźwięku do punktu pomiarowego.
- W przypadku pomiarów przeprowadzanych w zwykłych pomieszczeniach, oprócz fali bezpośredniej mierzymy również **fale odbite** (od ścian pomieszczenia, sufitu, podłogi, itp.). Powoduje to zniekształcenie wyników pomiaru.

Pomiary quasi-bezechowe

Zasada pomiarów quasi-bezechowych:

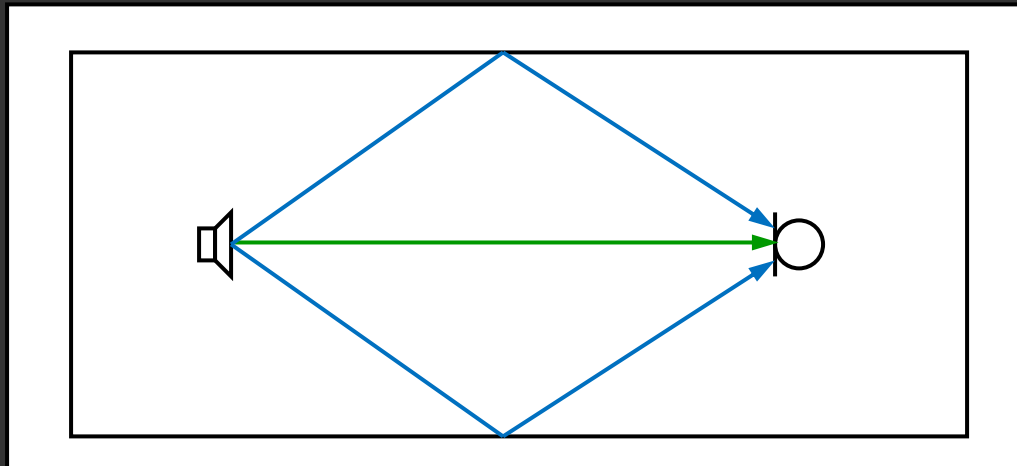
- wytłumiamy odbicia w pomieszczeniu tak jak to możliwe,
- wysyłamy sygnały testowe ze źródła dźwięku,
- analizujemy sygnał odebrany przez mikrofon,
- próbujemy wyodrębnić z niego część odpowiadającą bezpośrednio dźwiękowi – eliminacja odbitych fal dźwiękowych na etapie analizy.

Metody te są znacznie mniej dokładne niż pomiary w komorze bezechowej.

Pomiary impulsowe

Najprostsza metoda quasi-bezechowa to metoda impulsowa. Opiera się ona na następującej obserwacji:

- fala bezpośrednia dociera najszybciej do punktu pomiarowego (po najkrótszej drodze),
- pierwsza fala odbita dociera do punktu pomiarowego z pewnym opóźnieniem Δt względem fali bezpośredniej.



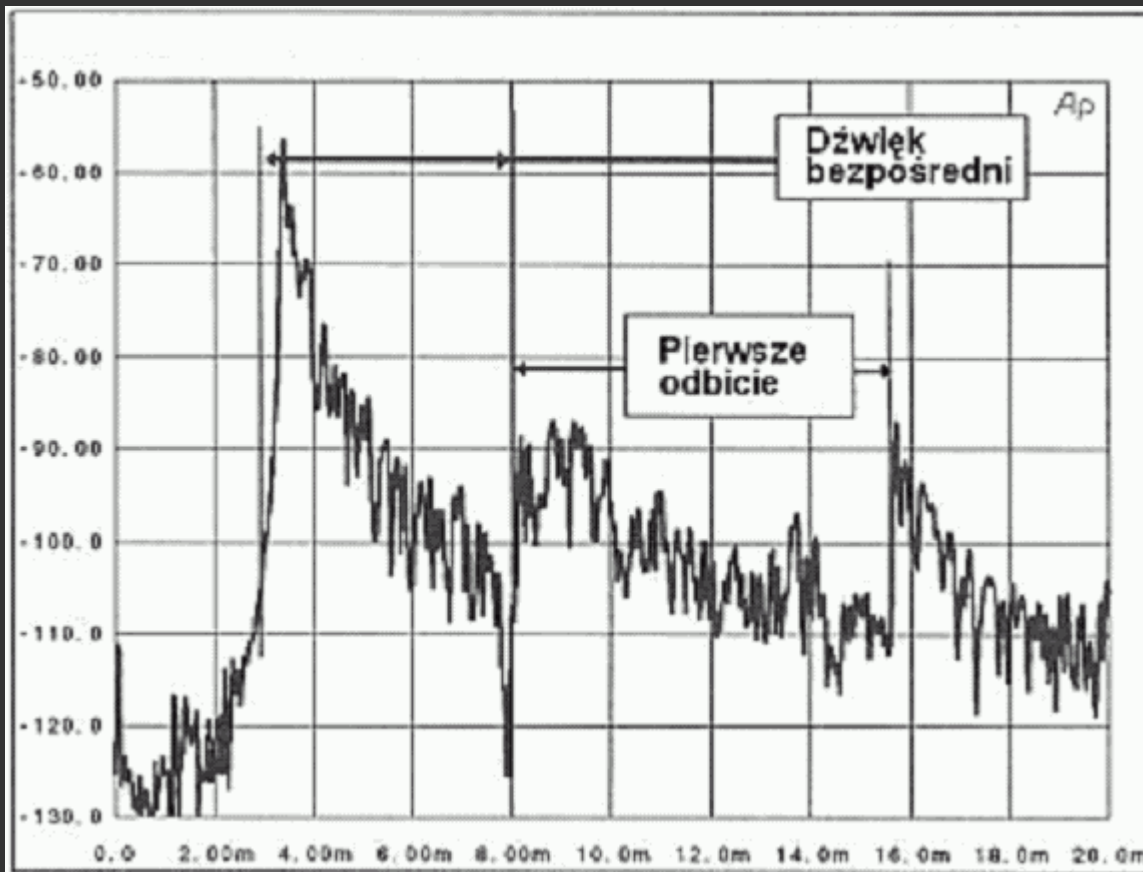
Pomiary impulsowe

Metoda pomiaru impulsowego:

- źródło dźwięku wysyła impuls (np. szumu białego) o bardzo dużej amplitudzie i krótkim czasie trwania,
- sygnał z wyjścia mikrofonu jest rejestrowany,
- początek analizy w chwili, gdy impuls dociera do punktu pomiarowego,
- koniec analizy w chwili, gdy pierwsza fala odbita dociera do punktu pomiarowego – można to wykryć analizując amplitudę sygnału.

Pomiary impulsowe

Analizowana jest tylko część sygnału odpowiadająca fali bezpośredniej, czyli tak, jak gdyby nie było fal odbitych.



Pomiary impulsowe

Wady metody impulsowej:

- krótki czas trwania „części bezpośredniej” pogarsza dokładność analizy,
- krótki czas trwania impulsu (mała energia sygnału) powoduje słaby stosunek sygnału do szumu; trzeba wielokrotnie powtarzać pomiar i uśredniać wyniki,
- trudność w wyznaczaniu „części bezpośredniej” odebranego sygnału,
- ograniczenie dla niskich częstotliwości: dla „części bezpośredniej” trwającej t sekund, minimalna częstotliwość wynosi $(1/t)$.

TDS - Time Delay Spectrometry

Time Delay Spectrometry (TDS)

Sygnałem testowym jest sygnał sinusoidalny o liniowo przestrajanej częstotliwości (*swept sinewave*). Częstotliwość przestrajania jest mała (rzędu 10 Hz/ms).

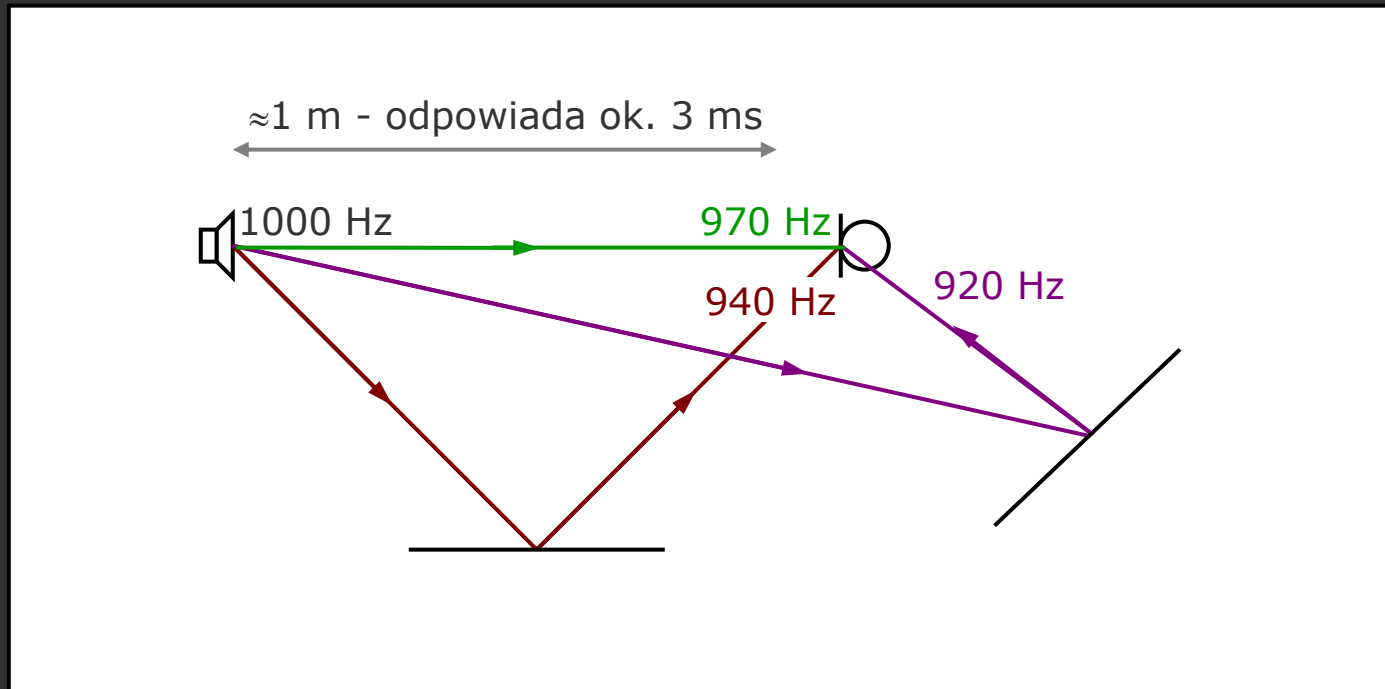
W danej chwili t :

- częstotliwość sygnału z generatora = f_G
- częstotliwość fali bezpośrednio odbieranej przez mikrofon: $f_B = f_G - \Delta f$ (Δf jest stała)
- fale odbite przebywają dłuższą drogę, więc częstotliwości fal odbitych odbieranych przez mikrofon: $f_O < f_B$

TDS - Time Delay Spectrometry

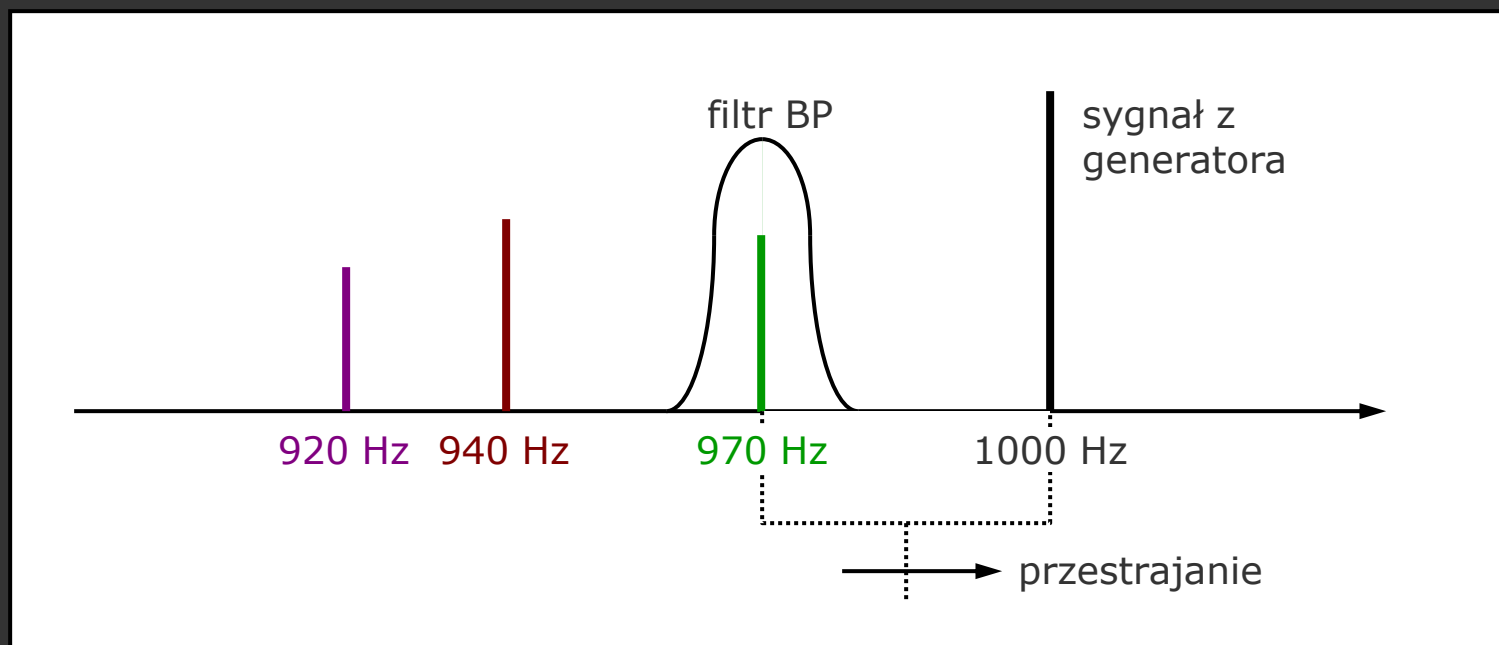
Ilustracja metody TDS

prędkość przestrajania generatora = 10 Hz/ms



TDS - Time Delay Spectrometry

Częstotliwość fali bezpośrednio odbieranej przez mikrofon jest opóźniona względem częstotliwości z generatora o stałą wartość. Zatem wystarczy użyć **filtru pasmowo-przepustowego**, który usunie składowe nie odpowiadające fali bezpośrednio.



TSR - Time Selective Response

Dla zachowania dokładności pomiaru, prędkość przestrajania częstotliwości w metodzie TDS nie może być zbyt duża.

Time Selective Response (TSR) – modyfikacja metody TDS, eliminuje ograniczenie szybkości przestrajania częstotliwości, skraca przez to czas pomiaru, zachowując dokładność.

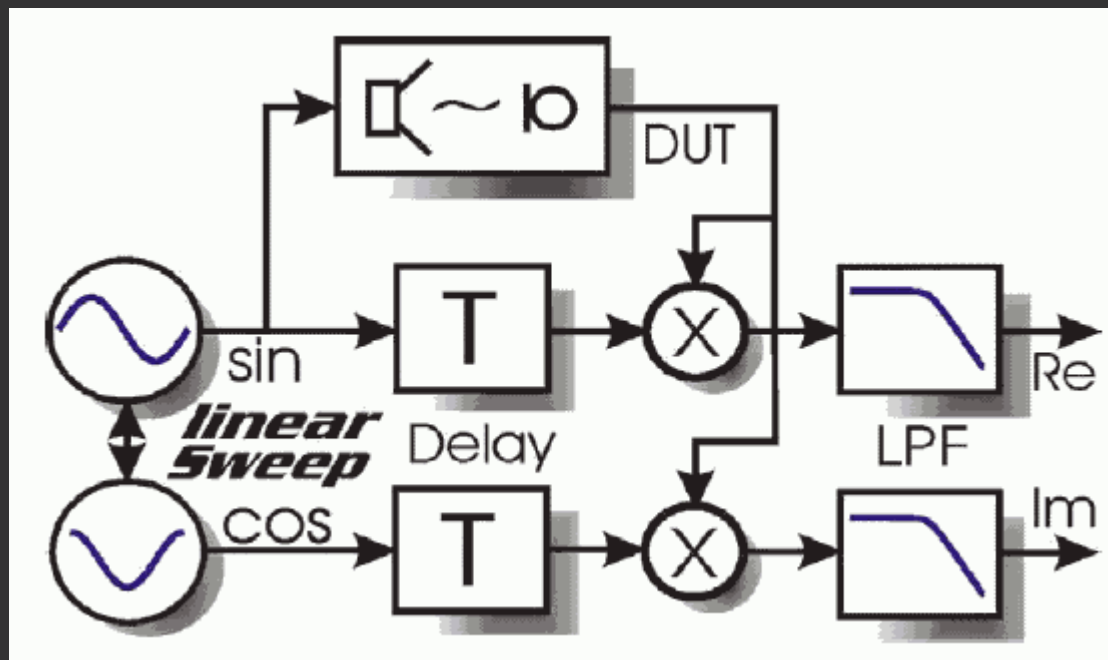
W metodzie TSR sygnałem z generatora jest przestrajany sygnał sinusoidalny **zespólny**.

W praktyce generowane są dwa sygnały: sinusoidalny i cosinusoidalny, o tej samej częstotliwości.

TSR - Time Selective Response

Ilustracja metody TSR

Sygnałem wyjściowym jest zespolona odpowiedź impulsowa badanego urządzenia.

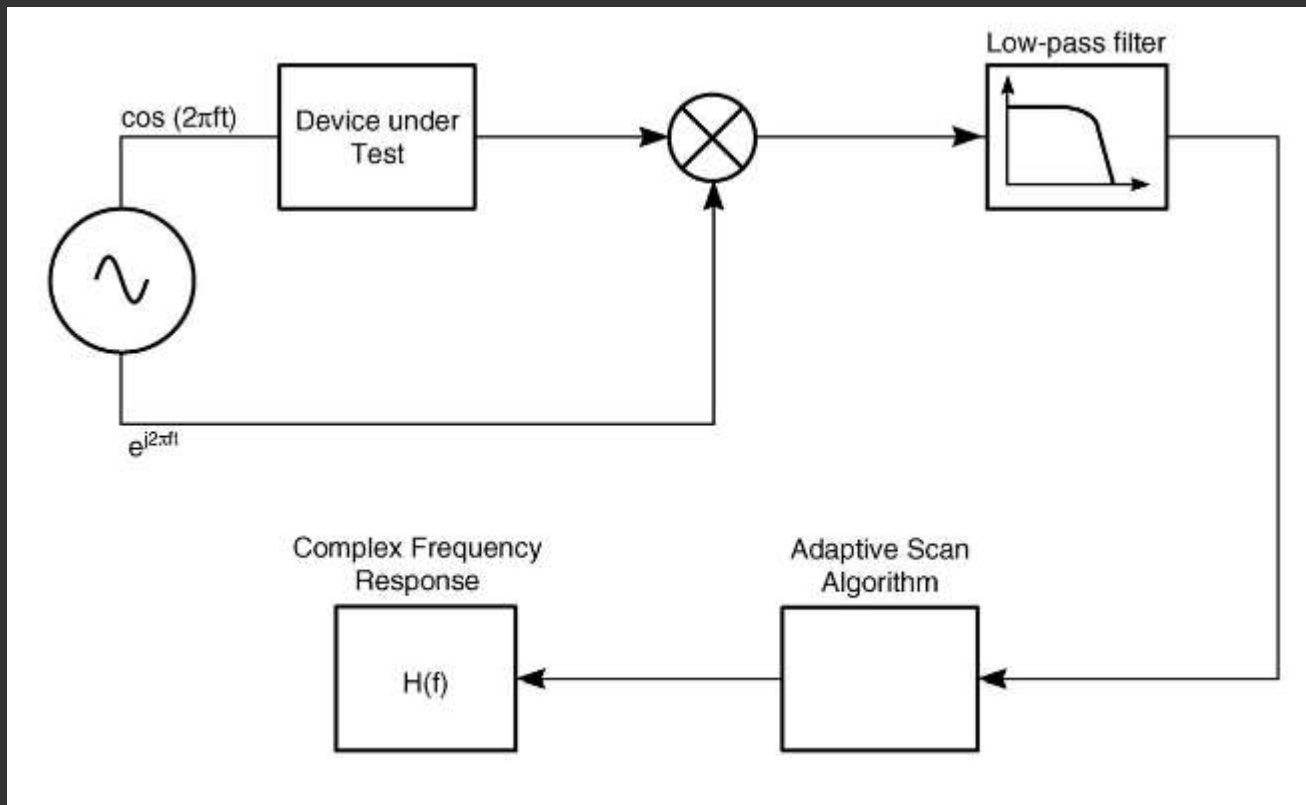


SSR - Steady State Response

- Metoda SSR stosuje sygnał sinusoidalny o krokowo zmienianej częstotliwości. Pomiar jest dokonywany dla każdej częstotliwości sygnału.
- Zmiana częstotliwości powoduje powstanie **transjentu** – stanu nieustalonego.
- Stan nieustalony jest odrzucany z analizy – obliczane jest odchylenie standardowe wyniku.
- Do pomiaru wykorzystywany jest fragment będący **stanem ustalonym** (*steady state*).
- Następnie system przechodzi do kolejnej częstotliwości.
- Tak samo można wykonać test dla zmiennego poziomu.

SSR - Steady State Response

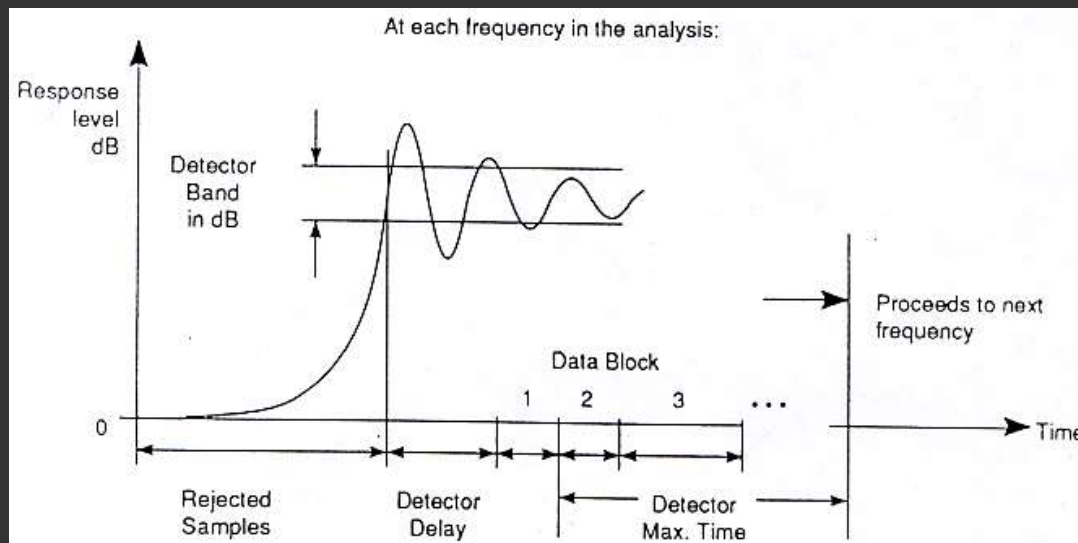
Schemat analizy SSR:



SSR - Steady State Response

Analiza SSR dla każdej wartości sygnału z generatora:

- początkowy blok wyników jest odrzucany (stan nieustalony),
- dla kolejnych bloków liczona jest wartość średnia i odchylenie standardowe,
- jeżeli odchylenie standardowe nie przekracza założonej wartości progowej, mamy pomiar dla stanu ustalonego,
- definiowany jest maksymalny czas analizy.



MLS - Maximum Length Sequence

Maximum Length Sequence (MLS) – binarny sygnał pseudoprzypadkowy.

- Sekwencja MLS N-tego rzędu powtarza się z okresem ($2^N - 1$).
- Widmo MLS jest płaskie.
- Długość okresu MLS użytego do pomiarów nie może być mniejsza niż długość badanej odp. impulsowej
- Metoda ma zastosowanie do badania systemów **LTI** (liniowych, o niezmiennej w czasie odp. impulsowej)
- Metodę MLS stosuje się do badania odpowiedzi impulsowej mikrofonów i głośników oraz samych pomieszczeń.

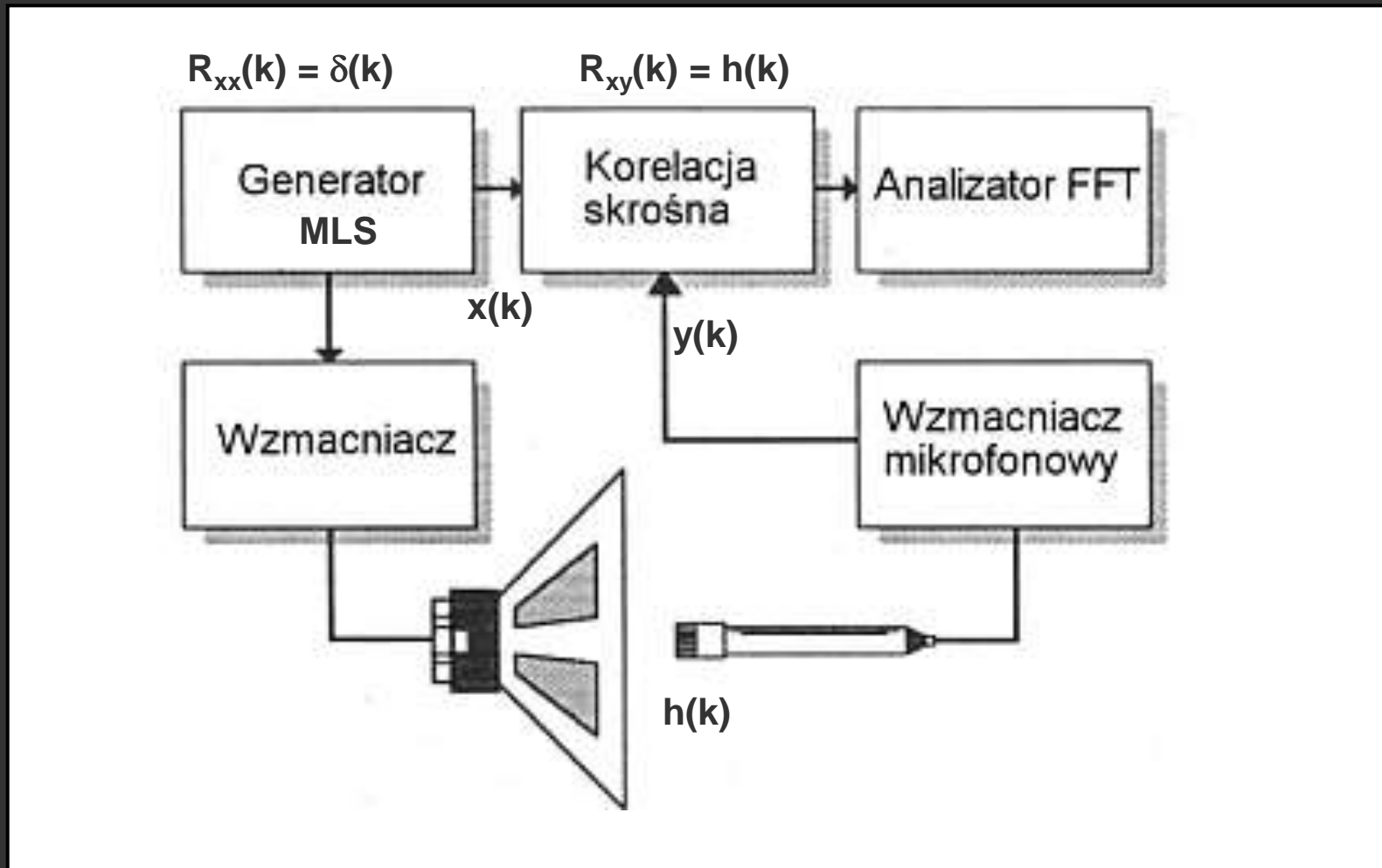
MLS - Maximum Length Sequence

Pomiary quasi-bezechowe metodą MLS:

- generator wytwarza sekwencję MLS i przesyła ją do głośnika
- liczona jest **korelacja wzajemna** sygnału odebranego przez mikrofon z sygnałem z generatora
- wynik tej operacji jest odpowiedzią impulsową
- z odpowiedzi impulsowej należy wydzielić część odpowiadającą fali bezpośredniej
- FFT odpowiedzi impulsowej jest charakterystyką częstotliwościową układu.

MLS - Maximum Length Sequence

Ilustracja metody MLS



MLS - Maximum Length Sequence

Jak działa metoda MLS?

- z teorii systemów liniowych (LTI):

$$R_{xy}(k) = R_{xx}(k) * h(k)$$

$R_{xy}(k)$ – korelacja wzajemna sygnałów z generatora x i mikrofonu y

$R_{xx}(k)$ – autokorelacja sygnału z generatora (MLS)

$h(k)$ – szukana odpowiedź impulsowa

- z właściwości sygnału MLS:

$$R_{xx}(k) = \delta(k)$$

- podstawiając otrzymujemy:

$$R_{xy}(k) = \delta(k) * h(k) = h(k)$$

POMIARY ODPOWIEDZI IMPULSOWEJ

W jaki sposób możemy uzyskać odpowiedź impulsową układu akustycznego: źródło dźwięku – pomieszczenie – mikrofon?

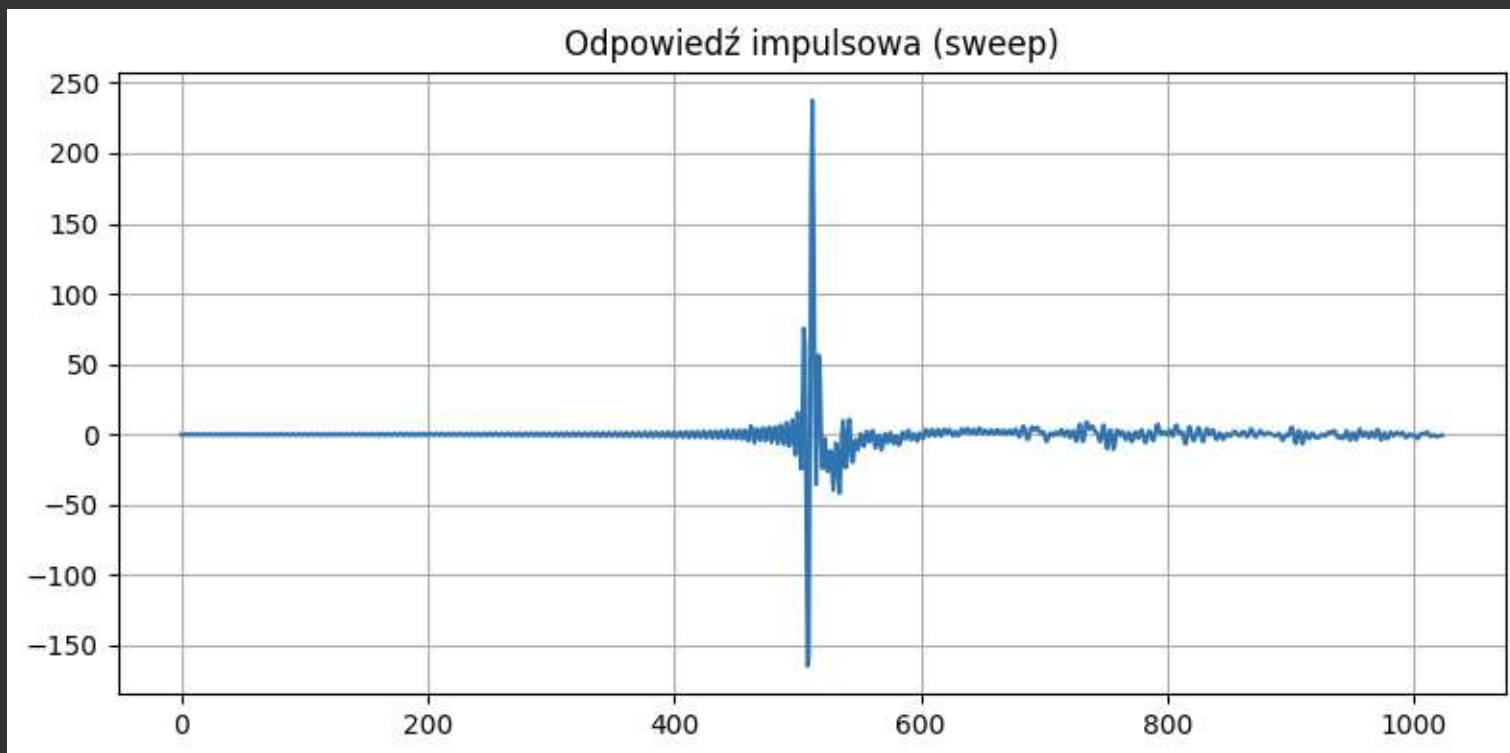
- Stosujemy sygnał pobudzający, którego funkcja autokorelacji jest równa δ :
 - *sweep* – sinus przestrajany liniowo lub logarytmicznie,
 - *MLS* – długość okresu nie może być mniejsza niż spodziewana długość odpowiedzi impulsowej.
- Źródło dźwięku emituje sygnał testowy.
- Mikrofon rejestruje odpowiedź układu.

Obliczenie odpowiedzi impulsowej

- Odpowiedź impulsową możemy uzyskać obliczając **funkcję korelacji wzajemnej** (*cross correlation*) sygnału odebranego przez mikrofon z pobudzeniem.
- Odpowiada to obliczeniu splotu liniowego sygnału odebranego przez mikrofon z pobudzeniem odwróconym w czasie.
- W dziedzinie częstotliwości: mnożenie widma odebranego sygnału przez sprzężone widmo pobudzenia.
- Obliczoną odpowiedź impulsową trzeba przyciąć do żądanej długości względem maksimum korelacji.

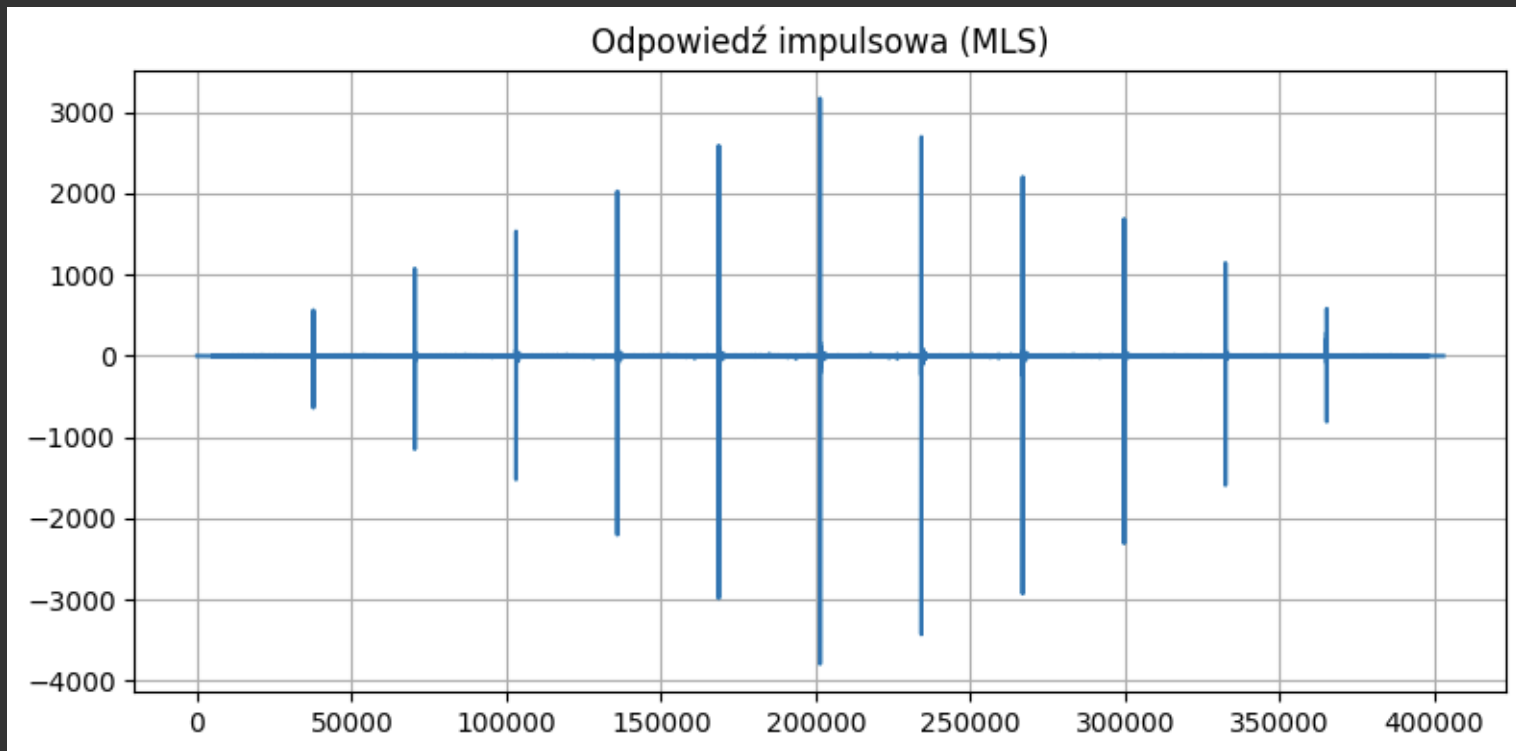
Obliczenie odpowiedzi impulsowej

Wynik obliczeń dla sygnału *sweep*, po przycięciu.



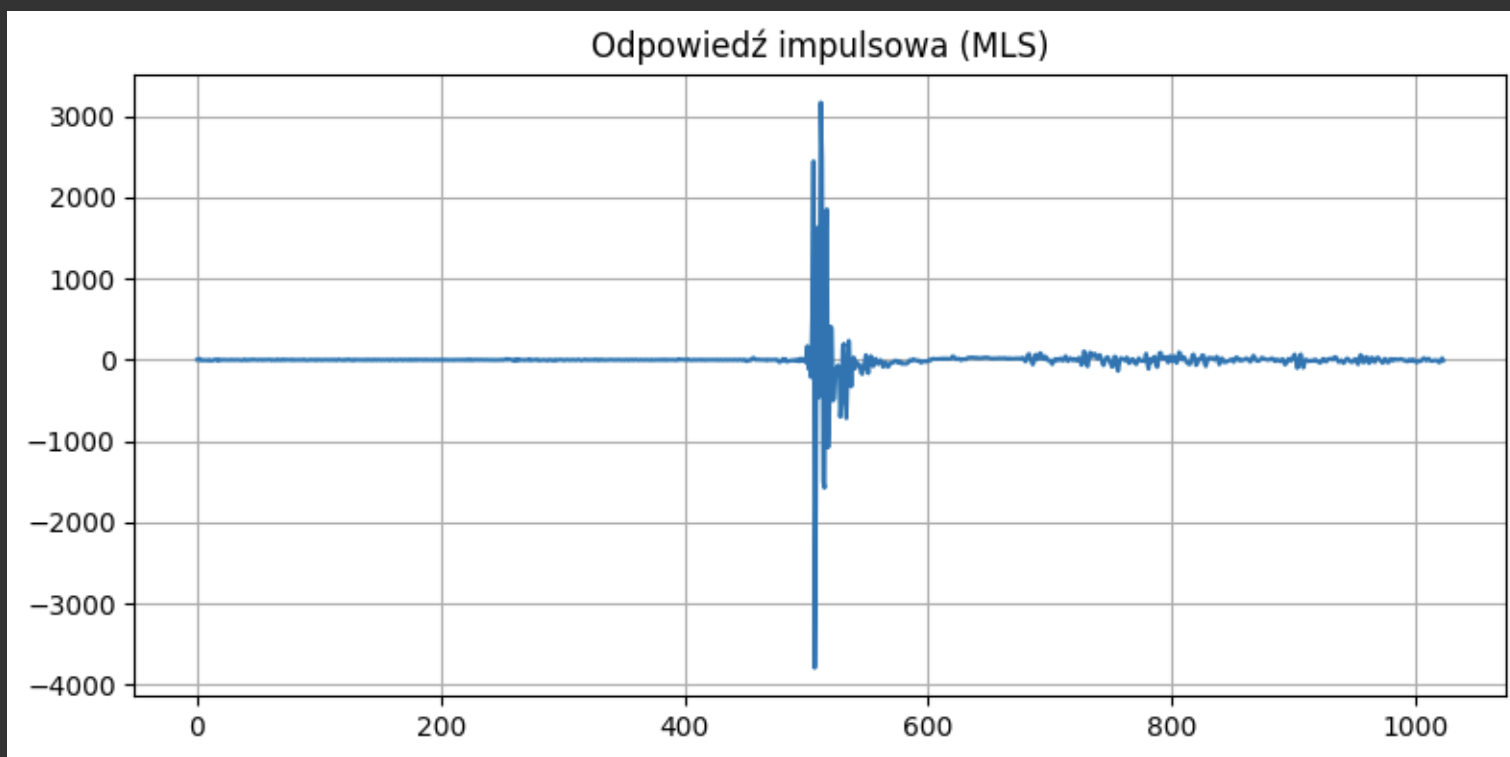
Obliczenie odpowiedzi impulsowej

Pełny wynik obliczeń dla sygnału MLS – funkcja korelacji jest okresowa. Dlatego trzeba zadbać o dostatecznie duży okres MLS, aby kopie nie nakładały się na siebie.



Obliczenie odpowiedzi impulsowej

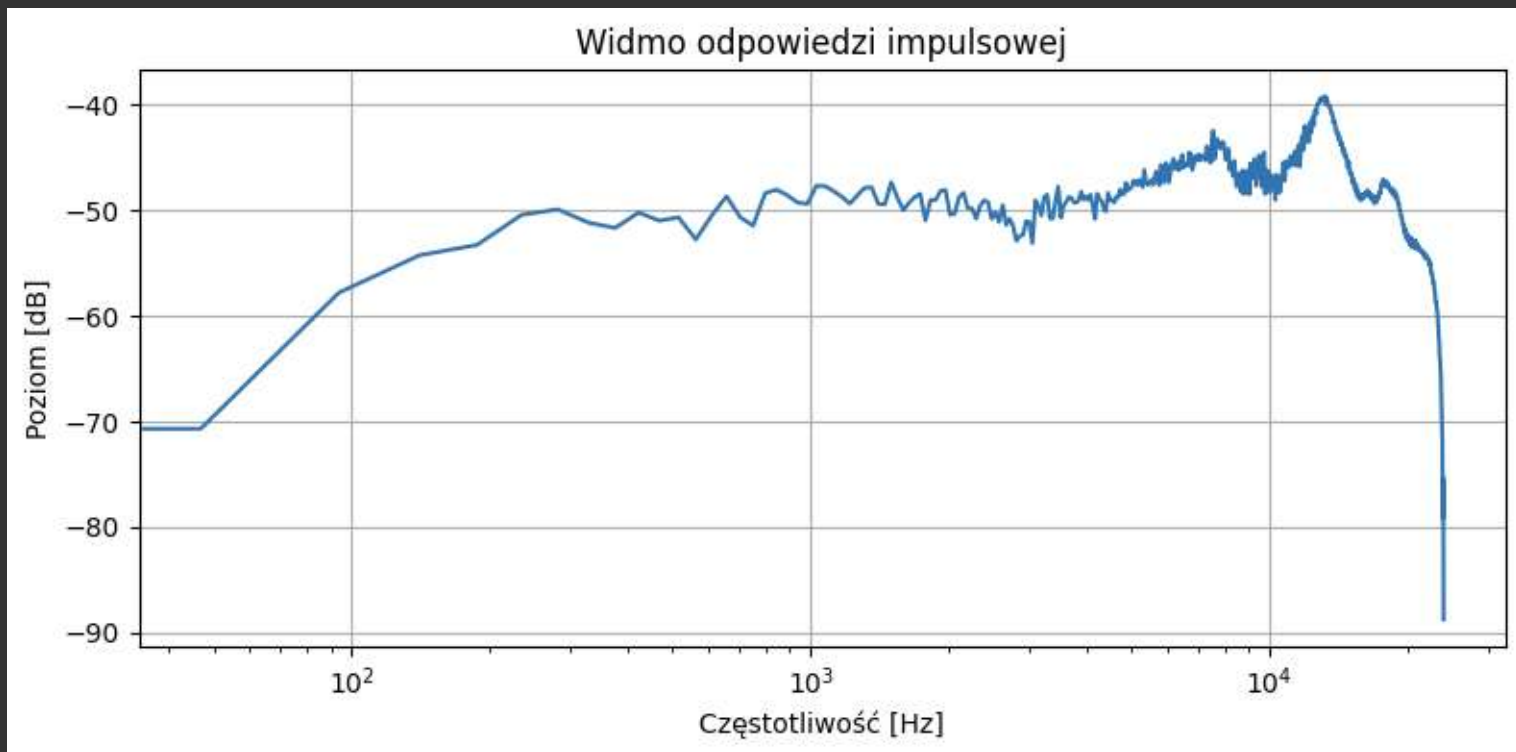
Wynik obliczeń dla sygnału MLS, po przycięciu względem maksimum funkcji korelacji.



Obliczenie charakterystyki częstotliwościowej

Transformata Fouriera obliczonej odpowiedzi impulsowej daje nam **charakterystykę częstotliwościową** układu.

Warto powtórzyć pomiar kilka razy i uśrednić wyniki.



POMIARY POMIESZCZEŃ

Wybrane pomiary dotyczące akustyki pomieszczeń,
np. studia nagraniowego:

- pomiar **czasu pogłosu**
 - informacja o tłumienności fal odbitych wewnątrz pomieszczenia
- pomiar **poziomu tła akustycznego**
 - informacja o poziomie zakłóceń (np. wentylacja)
- pomiar **izolacyjności akustycznej**
 - informacja o stopniu tłumienia zewnętrznych zakłóceń
- pomiar **rozumiałości mowy**
 - informacja o wyrazistości mowy wewnątrz pomieszczenia

Czas pogłosu

Czas pogłosu (*reverberation time*)

- miara trwałości dźwięku w pomieszczeniu po wyłączeniu źródła dźwięku, w wyniku istnienia pogłosu
- definiowany jako czas potrzebny na to, aby poziom dźwięku zmaleł do wartości o **60 dB** mniejszej niż poziom źródła dźwięku – parametr **RT₆₀**
- nie zawsze pomiar jest możliwy, wtedy mierzy się zmiany poziomu dźwięku w mniejszym zakresie:
 - **RT₂₀** : od -5 dB do -25 dB
 - **RT₃₀** : od -5 dB do -35 dB
- teoretyczny czas pogłosu może być obliczony na podstawie parametrów pomieszczenia (wzór Sabine'a)

Pomiar czasu pogłosu - metoda klasyczna

- Metody wytworzenia pobudzenia dźwiękowego:
 - sygnał hukowy, np. z pistoletu startowego,
 - impuls wysłany z głośnika,
 - szum z głośnika (biały lub różowy), o dużym poziomie, przerywany w chwili pomiaru (*interrupted response*).
- Rejestracja poziomu dźwięku w pomieszczeniu.
- Pomiar czasu, po którym poziom zmaleje o 60 dB.
- Nie zawsze jest to możliwe (np. za niski poziom pobudzenia, zbyt duży poziom szumu), wtedy mierzy się czas spadku o 20 dB lub 30 dB i dokonuje ekstrapolacji.
- Mierniki czasu pogłosu dokonują tych operacji w sposób automatyczny.

Pomiar czasu pogłosu - metoda automatyczna

Zautomatyzowana procedura, wg ISO3382:

- źródło: szum różowy,
- pomiar sygnału w pasmach oktawowych,
- najpierw pomiar poziomu tła akustycznego, wyznaczenie minimalnego poziomu sygnału,
- włączenie szumu z głośnika, na niskim poziomie,
- zwiększanie poziomu, aż przekroczy minimalny poziom w każdym paśmie,
- wyłączenie źródła dźwięku,
- miernik sam wykrywa wyłączenie źródła, mierzy poziom w każdym paśmie i wyznacza czas pogłosu dla każdego pasma oktawowego (uwaga: spadek poziomu o 60 dB dla całego sygnału, nie dla pojedynczego pasma).

Pomiar czasu pogłosu - metoda automatyczna

Wyniki pomiaru:

- **czas pogłosu w danym paśmie**, dla poj. pomiaru
- **czas uśredniony** za większą liczbę pomiarów
- **współczynnik korelacji** (*correlation factor*) – określa jak bardzo liniowy jest spadek poziomu dźwięku, 100% oznacza idealnie liniowy spadek;
 - dla wiarygodnego pomiaru: co najmniej **80%**
- **współczynnik niepewności** (*uncertainty factor*), określony przy dokonaniu kilku pomiarów (min. 3), wyznacza jak bardzo powtarzalne są wyniki,
 - dla wiarygodnego pomiaru: wartość poniżej **15%**

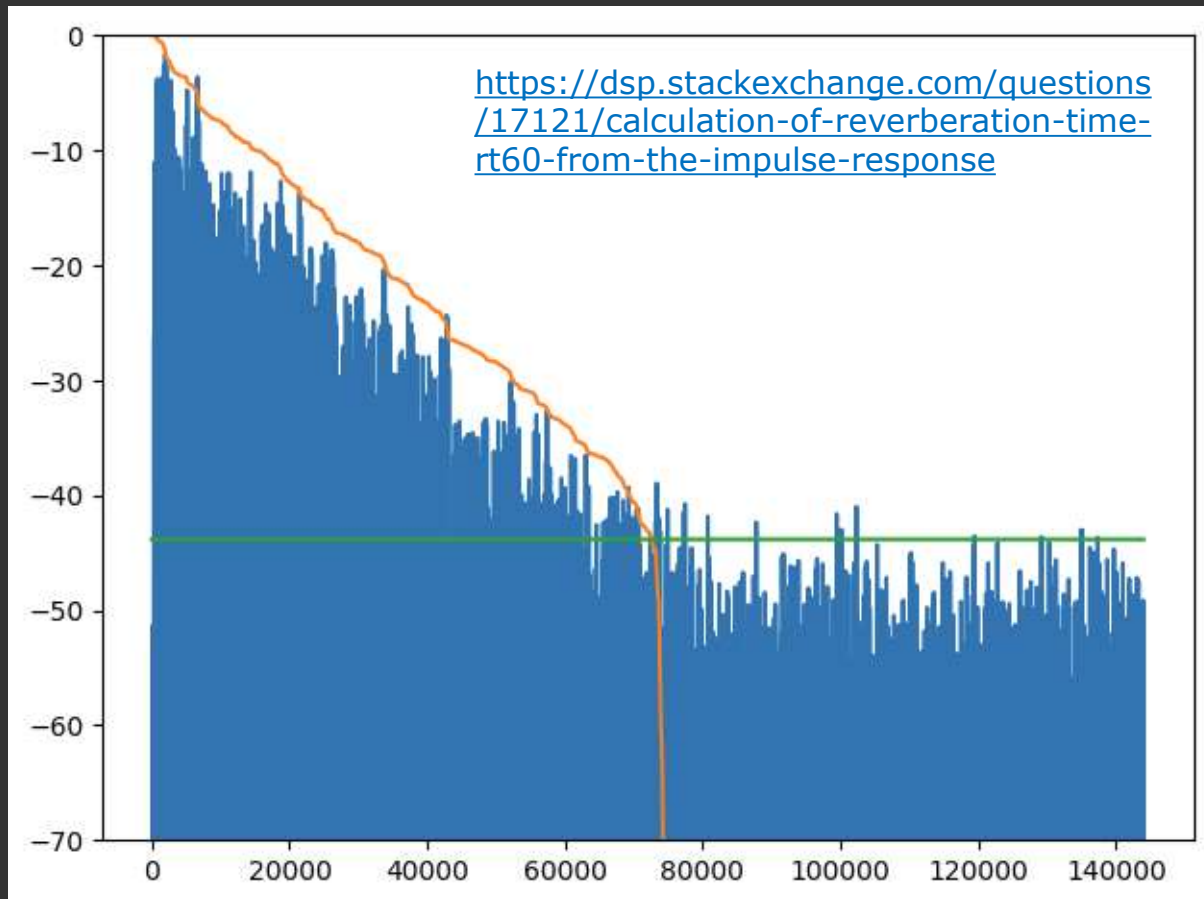
Pomiar czasu pogłosu - metoda pośrednia

Pomiar z użyciem odpowiedzi impulsowej:

- pobudzeniem jest sygnał MLS (długość okresu nie może być mniejsza niż spodziewany czas pogłosu) lub *sweep*,
- oblicza się odpowiedź impulsową pomieszczenia metodą korelacji sygnału zarejestrowanego przez mikrofon z sygnałem pobudzającym,
- z uzyskanej odpowiedzi impulsowej można obliczyć czas pogłosu (w praktyce tylko T_{20} i T_{30}) i inne parametry pomieszczenia,
- pomiar powinien być powtórzony, a wyniki uśrednione.

Pomiar czasu pogłosu - metoda pośrednia

- Metoda Schroedera – całkowanie kwadratu odpowiedzi impulsowej.
- Czas pogłosu = nachylenie dopasowanej linii.



Pomiar izolacyjności pomieszczenia

- Źródło dźwięku o wysokim poziomie L_1 na zewnątrz badanego pomieszczenia.
- Pomiar poziomu L_2 wewnątrz pomieszczenia.
- Izolacyjność jest miarą stłumionej energii:
$$D = L_1 - L_2 \text{ [dB]}$$
- Pomiaru dokonuje się dla różnych częstotliwości, np. w pasmach tercjowych (pobudzeniem jest szum różowy).
- Pomiar powtarza się w różnych miejscach pomieszczenia.
- W miarę możliwości: źródło z różnych stron badanego pomieszczenia (ściany, sufit, podłoga), w różnych warunkach (np. drzwi zamknięte, otwarte).

Pomiar zrozumiałości mowy

Zrozumiałość mowy (*speech intelligibility*) jest typowo badana w pomieszczeniach użytkowych oraz dla systemów zapowiadających (np. alarmowych).

Klasyczna metoda pomiaru:

- wyszkolony mówca czyta sygnały (wyrazy, sylaby, logatomy),
- słuchacze w różnych miejscach pomieszczenia notują treść usłyszanych sygnałów,
- wyniki poddawane są analizie statystycznej.

Długotrwały i kłopotliwy pomiar.

Pomiar zrozumiałości mowy

Zautomatyzowany pomiar współczynników zrozumiałości mowy za pomocą przyrządów:

- sygnały testowe – syntetyczne sygnały odtwarzane z generatora lub komputera, głośnik powinien „symulować” mówcę (*talk box*),
- poziom sygnału testowego – min. 60 dB SPL,
- brak impulsowych zakłóceń w czasie pomiaru,
- sygnał jest rejestrowany przez mikrofon w danym miejscu pomieszczenia, obliczana jest miara zrozumiałości,
- pomiary są powtarzane w różnych punktach pomieszczenia (różna lokalizacja słuchaczy).

Pomiar zrozumiałości mowy

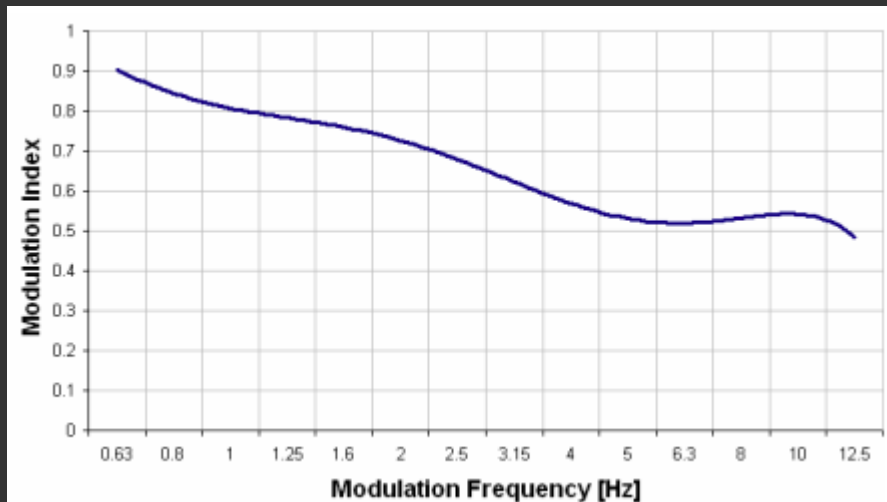
- Sygnały testowe o różnych częstotliwościach, zwykle szумы w pasmach oktaowych.
- Do sygnałów wprowadza się modulację amplitudy ze zmienną częstotliwością modulacji.
- Analiza sygnału polega na określeniu, czy w odebranym sygnale mowy zachowane są modulacje sygnału (MTF – *modulation transfer function*).
- Pogłos, echo i hałas tła powodują zaburzenie modulacji, co wpłynie na pogorszenie zrozumiałości mowy.
- Na podstawie MTF obliczany jest współczynnik zrozumiałości mowy.

Pomiar zrozumiałości mowy

Ilustracja wpływu pogłosu na sygnał: indeks modulacji ulega zmniejszeniu.



Wykres funkcji modulacji MTF dla jednego pasma oktawowego:



Współczynniki zrozumiałości mowy

- *STI – Speech Transmission Index*
 - pełny pomiar: 7 pasm oktawowych x 14 częstotliwości modulacji (98 pomiarów),
 - długotrwały pomiar (kilkanaście minut).
- *STI-PA (STI for Public Address Systems)*
 - uproszczony: 14 pomiarów,
 - do pomiaru systemów głosowych, np. alarmowych.
- *RASTI – Room Acoustics Speech Transmission Index*
 - uproszczony: dwie częstotliwości, razem 9 punktów,
 - określa tylko zrozumiałość mowy pomiędzy dwoma punktami, mało dokładny, nie zalecany.

STI na podstawie odpowiedzi impulsowej

- Mając zmierzoną odpowiedź impulsową pomieszczenia, możliwe jest oszacowanie wartości współczynnika zrozumiałości mowy STI.
- Algorytm obliczania STI jest opisany w dokumencie: BS EN 60268-16:2011: *Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index*.
- Skrócony opis algorytmu:
Farrel Becker: A Do-it-Yourself Guide to Computing the Speech Transmission Index,
<https://www.prosoundtraining.com/2010/03/17/a-do-it-yourselfers-guide-to-computing-the-speech-transmission-index/>

Pomiar zrozumiałości mowy

Skala zrozumiałości mowy dla STI:

- **STI** (*speech transmission index*)
- **CIS** (*common intelligibility scale*), $CIS = 1 + \log STI$

Skala zrozumiałości (STI):

- 0 – 0,3: zła (*bad*), 0 – 67% zrozumiałości słów
- 0,3 – 0,45: słaba (*poor*), 67 – 78%
- 0,45 – 0,6: średnia (*fair*), 78 – 87%
- 0,6 – 0,75: dobra (*good*), 87 – 94%
- 0,75 – 1: doskonała (*excellent*), 94 – 96%



Bibliografia

- Z. Żyszkowski: *Miernictwo Akustyczne*. WNT 1987.
- J. Sereda: *Pomiary w elektroakustyce*. WKŁ 1981.
- M. Williams: *The interpretation of the microphone data sheets*.
<http://www.microphone-data.com/library/articles/>
- Tontechnik-Renher: *Sound Studio and Audio Calculations*.
<http://www.sengpielaudio.com/Calculations03.htm>
- *Bruel & Kjaer: PULSE Type 3560 Help File*.
- O.H. Bjor: *Maximum Length Sequence*. Norsonic AS.
http://www.gracey.com/downloads/nor_mls_theory.pdf
- NTI Audio: *Speech Intelligibility Measurement*
<https://www.nti-audio.com/Portals/0/data/en/NTi-Audio-AppNote-STIPA-Measurement.pdf>
- *Wikipedia*
- Materiały firmy *Bruel & Kjaer*, www.bk.com