

LABORATORIUM – POMIARY W AKUSTYCE

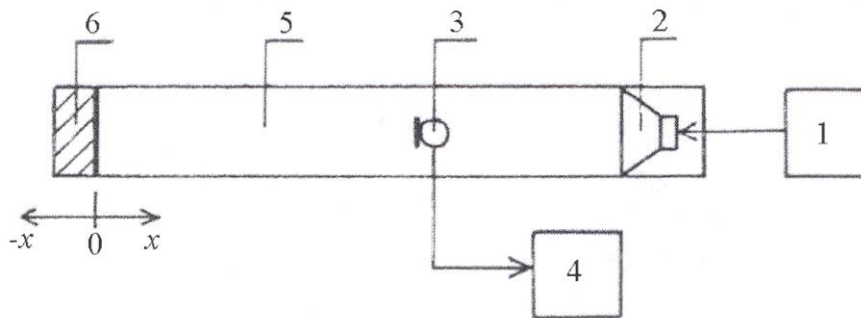
ĆWICZENIE NR 4

Pomiar współczynników pochłaniania i odbicia dźwięku oraz impedancji akustycznej metodą fali stojącej

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie metody pomiaru podstawowych parametrów akustycznych, które charakteryzują właściwości akustyczne materiałów i układów akustycznych, jak też poznanie charakterystyki pochłaniania typowych materiałów dźwiękochłonnych.

2. Układ pomiarowy



1 – generator akustyczny, 2 - źródło dźwięku, 3 - mikrofon pomiarowy z sondą,
4 - woltomierz, 5 - falowód akustyczny (rura Kundta), 6 – badana próbka materiału.

3. Zadania laboratoryjne

- 3.1. Wyznaczyć zakres częstotliwości pomiarowych $f_d < f < f_g$ i amplitudę sygnału podawanego na głośnik.
- 3.2. Zmierzyć rozkład maksimów i minimów ciśnienia akustycznego wzdłuż falowodu w funkcji częstotliwości dla różnych próbek materiału.
- 3.3. Wykreślić przebiegi współczynników pochłaniania dźwięku oraz impedancji akustycznej w funkcji częstotliwości dla badanych próbek materiałów.

4. Zagadnienia do przygotowania

- 4.1. Opis rozkładu ciśnienia akustycznego i prędkości akustycznej w falowodzie.
- 4.2. Natężenie akustyczne fali stojącej.
- 4.3. Straty energii akustycznej w falowodzie.

Literatura

- [1] Dobrucki A., Podstawy akustyki. Skrypt PWr., Wrocław 1987, rozdz. 4.2
- [2] Januszajtis A., Fizyka dla Politechnik, Tom III Fale, §5. PWN W-wa 1991, s.145, 225-228
- [3] Żyszkowski Z., Podstawy elektroakustyki, wyd.3. WNT W-wa 1984, rozdz. 22.2.5.
- [4] Żyszkowski Z., Miernictwo akustyczne, WNT, W-wa 1987, rozdz.4.3.1
- [5] Polska norma PN-EN ISO 10534-1:2004 – Akustyka. Określenie współczynnika pochłaniania dźwięku i impedancji akustycznej w rurach impedancyjnych. Część 1: Metoda wykorzystująca współczynnik fal stojących.

Tabela 1. Wyniki pomiarów

Rodzaj materiału	f [Hz]	$u_{max,1}$ [mV]	$u_{min,1}$ [mV]	$S = \frac{u_{max,1}}{u_{min,1}}$	$x_{min,1}$ [m]	ϕ [rad]

Tabela 2. Wyniki obliczeń

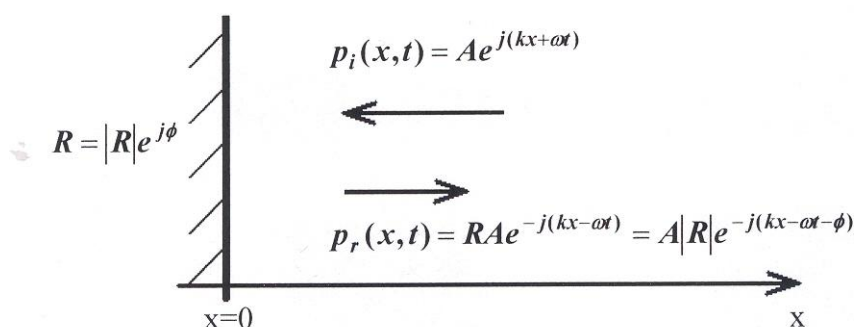
Rodzaj materiału	f [Hz]	R	α	$Re Z$ [kg/m ² s]	$Im Z$ [kg/m ² s]	Z [kg/m ² s]

Dodatek A

FALA STOJĄCA

Założenia:

1. Na powierzchnie odbijającą dźwięk pada prostopadle harmoniczna fala płaska o pulsacji ω , biegnąca przeciwnie do osi x .
2. Fala odbita jest również harmoniczną falą płaską o tej samej częstotliwości ω i rozchodzi się w kierunku dodatnim osi x .
3. Obie fale, padająca i odbita, propagują się w ośrodku bezstratnym, w którym prędkość dźwięku c jest stała, a liczba falowa k jest rzeczywista.



Rys.1

A - amplituda ciśnienia akustycznego fali padającej,

R - współczynnik odbicia,

k - liczba falowa, $k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ - długość fali, $\lambda = \frac{c}{f}$,

ω - pulsacja $\omega = 2\pi f$.

Podstawowe zależności

1. Współczynnik odbicia i pochłaniania

Fala stojąca jest superpozycją dwóch harmonicznych fal płaskich rozchodzących się w przeciwnych kierunkach. Ciśnienie akustyczne można zapisać w postaci zespolonej jako sumę:

$$p(x,t) = p_i(x,t) + p_r(x,t) = A(e^{jkx} + R e^{-j(kx-\omega t)})e^{j\omega t}$$

W dalszej analizie wektor jednostkowy $e^{j\omega t}$ (czynnik czasowy) pomijamy, zatem

$$p(x) = A \cos kx + R \cos(kx - \phi) + j(\sin kx - R \sin(kx - \phi)) \quad (1)$$

Moduł ciśnienia fali stojącej jest równy:

$$\begin{aligned}
p(x)^2 &= A^2 \cos^2(kx - \phi) + R^2 \cos^2(kx - \phi) + 2AR \cos(kx - \phi) \cos(kx - \phi) = \\
&= A^2 \cos^2(kx - \phi) + R^2 \cos^2(kx - \phi) + 2AR \cos^2(kx - \phi) = \\
&= A^2 (1 + R^2 + 2R \cos(2kx - 2\phi))
\end{aligned}$$

$$p(x)^2 = A^2(1 + R^2 + 2R \cos(2kx - 2\phi)) \quad (2)$$

Maksimum ciśnienia fali stojącej występuje wówczas, gdy

$$\begin{aligned}
\cos(2kx - 2\phi) &= 1 \\
2kx_{max} - 2\phi &= 2\pi m - 1, \quad m = 1, 2, \dots
\end{aligned}$$

Dla pierwszego maksimum ($m = 1$)

$$\phi = 4\pi \frac{x_{max,1}}{\lambda}$$

zatem

$$p^2_{max} = A^2(1 + R)^2 \quad (3)$$

Minimum ciśnienia fali stojącej występuje, gdy

$$\begin{aligned}
\cos(2kx - 2\phi) &= -1 \\
2kx_{min} - 2\phi &= \pi(2n - 1), \quad n = 1, 2, \dots
\end{aligned}$$

Dla pierwszego minimum ($n=1$)

$$\phi = \pi(4 \frac{x_{min,1}}{\lambda} - 1)$$

$$p^2_{min} = A^2(1 - R)^2 \quad (4)$$

Współczynnik fali stojącej dla $m = n = 1$ jest na podstawie (3) i (4) równy:

$$s = \frac{p_{max}}{p_{min}} = \frac{1+R}{1-R} \quad (5)$$

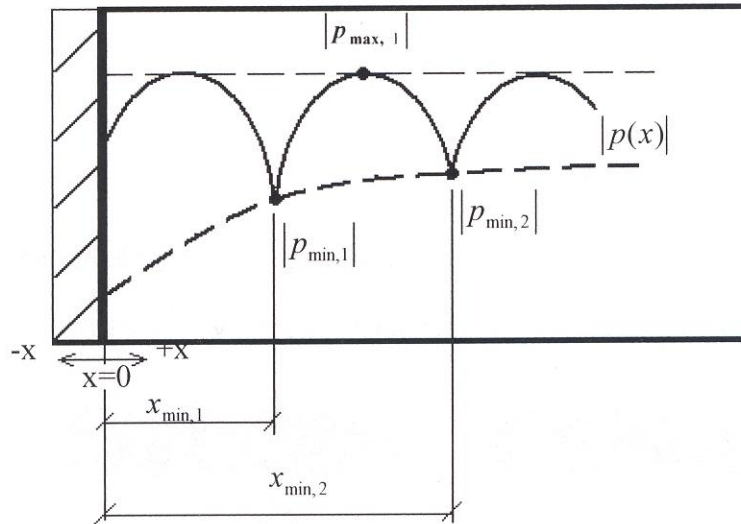
Stąd moduł współczynnika odbicia

$$R = \frac{s-1}{s+1} \quad (6)$$

Współczynnik pochłaniania dźwięku α dla prostopadłego padania fali płaskiej:

$$\alpha = 1 - R^2 \quad (7)$$

Uwaga 1: Pierwsze maksimum ciśnienia powinno być mierzone pomiędzy dwoma pierwszymi minimami (por. rys. 2).



Rys.2. Rozkład ciśnienia akustycznego fali stojącej w falowodzie akustycznym.

Tak więc mierząc rozkład maksimum i minimum ciśnienia akustycznego fali stojącej możemy ze wzorów (6) i (7) wyznaczyć wartość współczynników odbicia R i pochłaniania α .

2. Impedancja akustyczna w polu fali stojącej

Impedancja akustyczna jest zdefiniowana jako stosunek ciśnienia i prędkości akustycznej w danym punkcie pola:

$$Z(x) = \frac{p(x)}{v(x)}$$

Prędkości akustyczne $v(x)$, obliczane w kierunku osi x i $-x$, wynoszą odpowiednio:

$$v_i = \frac{1}{Z_0} p_i(x), \quad v_r = -\frac{1}{Z_0} p_r(x),$$

Zatem impedancja akustyczna w polu fali stojącej jest równa:

$$Z(x) = \frac{p_i(x) + p_r(x)}{v_i(x) + v_r(x)} = Z_0 \frac{p_i(x) + p_r(x)}{p_i(x) - p_r(x)}$$

gdzie: $Z_0 = \rho_0 c$ jest impedancją właściwą ośrodka, w którym rozchodzi się pojedyncza fala płaska (impedancja przypadająca na jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali akustycznej); $Z_0 = 415 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$;

ρ_0 – gęstość ośrodka (powietrza); $\rho_0 = 1,205 \text{ kg}/\text{m}^3$ ($t = 20^\circ \text{C}$);

c – prędkość dźwięku w ośrodku; w powietrzu $c = 343,37 \text{ m/s}$ ($t = 20^\circ \text{C}$)

W płaszczyźnie $x = 0$ (por. rys. 2) impedancja akustyczna jest równa:

$$Z = Z_0 = Z_0 \frac{1+R}{1-R}, \quad R = \frac{p_r(0)}{p_i(0)} \quad (8)$$

Stąd

$$R = \frac{\frac{Z}{Z_0} - 1}{\frac{Z}{Z_0} + 1} \quad (9)$$

Jeżeli płaszczyzna $x = 0$ jest powierzchnią płaskiej próbki, to te wielkości są odpowiednio impedancją powierzchniową (8) i współczynnikiem odbicia (9) badanej próbki dla prostopadłego padania fali płaskiej.

Zapisując współczynnik odbicia R jako

$$R = R e^{j\phi} = R \cos\phi + j R \sin\phi = R' + jR''$$

zależność (8) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} Z &= Z_0 \frac{1+R}{1-R} = Z_0 \frac{(1+R'+jR'')(1-R'+jR'')}{(1-R'-jR'')(1-R'+jR'')} = Z_0 \frac{1-(R'^2+R''^2)+j2R''}{(1-R')^2+R''^2} \\ &= Z_0 \frac{1-R^2+j2R''}{1+R^2-2R'} \end{aligned}$$

Stąd

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} Z &= Z_0 \frac{1-R^2}{1+R^2-2R'} = Z_0 \frac{1-R^2}{1+R^2-2R \cos\phi} \\ \operatorname{Im} Z &= Z_0 \frac{2R''}{1+R^2-2R'} = Z_0 \frac{2R \sin\phi}{1+R^2-2R \cos\phi} \end{aligned} \quad (10)$$

gdzie: $R = \frac{s-1}{s+1}$, $s = \frac{p_{\max,1}}{p_{\min,1}}$, $\phi = \pi(4 \frac{x_{\min,1}}{\lambda} - 1)$

Uwaga 2: Długość fali dla częstotliwości f sygnału pobudzającego można wyznaczyć eksperymentalnie z odległości między m -tym i n -tym, $n > \text{minimum}$ ciśnienia fali stojącej dla sztywnego zakończenia falowodu:

$$\lambda = \frac{2}{n-m} (x_{\min,n} - x_{\min,m})$$

Uwaga 3: Roboczy zakres częstotliwości $f_d < f < f_g$ falowodu cylindrycznego jest określony przez jego długość i średnicę przekroju poprzecznego d . Aby móc wykorzystać dwa minima ciśnienia akustycznego, długość obszaru roboczego falowodu powinna wynosić:

$$l > \frac{3}{4} \lambda \text{ dla dolnej częstotliwości pomiarowej } f_d$$

Głośnik oprócz fali płaskiej wytwarza fale wyższych rzędów, które powinny zanikać wraz z odległością od źródła równą $3d$. Badane próbki (np. rezonatory) mogą również generować składowe wyższych rzędów w fali odbitej. Uwzględniając obydwie czynniki, długość robocza (pomiarowa) falowodu powinna spełniać warunek:

$$l > \frac{3}{4} \lambda + 3d$$

a dolna częstotliwość pomiarowa

$$f_d > \frac{c}{4\left(\frac{l}{3} - d\right)}$$

Przybliżony pomiar w zakresie małych częstotliwości zakłada wykorzystanie tylko jednego minimum ciśnienia akustycznego i wówczas

$$f_d > c/(4l)$$

Aby w falowodzie nie propagowały się mody wyższych rzędów niż mod podstawowy (fala płaska), górna częstotliwość pomiarowa f_g powinna spełniać warunek:

$$f_g = \frac{1,84c}{\pi d} \approx \frac{200}{d} \text{ [Hz]}$$