

Nazwisko.....

Data.....·Nr na liście.....

Imię.....

Wydział.....

Dzień tyg.....

Godzina.....

Ćwiczenie 403

Wyznaczanie prędkości dźwięku w powietrzu metodą rezonansu akustycznego

Wyznaczanie długości fali dźwiękowej o częstotliwości $f = \dots\dots\dots$ Hz

Nr pomiaru	0	1	2	3	4	5	6
Położenie tłoka podczas rezonansu L_i , [m]							
Długość fali $\lambda_i = 2 \cdot \Delta L_i$, [m]							
Średnia długość fali: $\bar{\lambda} = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N}{N}$, [m]							

Uwaga: Pomiar „zerowy” oznacza odczyt podczas pierwszego rezonansu.

Obliczenie prędkość dźwięku w powietrzu

Temperatura powietrza	T	[K]	
Prędkość dźwięku w powietrzu	$v = \bar{\lambda} \cdot f$	[m/s]	
Teoretyczna wartość prędkości dźwięku	$v_t = v_0 \sqrt{T/T_0}$	[m/s]	
Błąd względny wzgl. wartości teoretycznej	$B_p = \frac{ v - v_t }{v_t} \cdot 100\%$	[%]	
Błąd średni kwadratowy	σ	[m]	
Błąd względny z rachunku błędów	$\frac{\Delta v}{v} \cdot 100\%$	[%]	

Ćwiczenie 403: Wyznaczanie prędkości dźwięku w powietrzu metodą rezonansu akustycznego

POTRZEBNE WYPOSAŻENIE	<ul style="list-style-type: none">• Termometr
<ul style="list-style-type: none">• Rura rezonansowa z generatorem	<ul style="list-style-type: none">• Miernik uniwersalny
	<ul style="list-style-type: none">• Dwa przewody elektryczne

CEL

Celem tego ćwiczenia jest wyznaczenie długości fali dźwiękowej. Do pomiaru wykorzystamy zjawisko rezonansu akustycznego w rurze, w której rozchodzi się fala o określonej częstotliwości. Uzyskane dane pozwalają obliczyć prędkość dźwięku w powietrzu.

TEORIA

Powstawanie fal mechanicznych

Jeżeli przemieścimy jakiś fragment ośrodka sprężystego z jego położenia równowagi, to będzie on wykonywał drgania wokół tego położenia. Te drgania, dzięki właściwościom sprężystym ośrodka, są przekazywane na kolejne cząsteczki ośrodka, które również zaczynają drgać. W ten sposób zaburzenie przechodzi przez cały ośrodek.

✓ *Ruchem falowym nazywamy rozchodzenie się zaburzenia w ośrodku.*

Fale powstające i rozchodzące się w ośrodkach sprężystych nazywamy *falami mechanicznymi*.

Fala dobiegająca do danego punktu ośrodka wprawia go w ruch drgający przekazując mu energię, która jest dostarczana przez źródło drgań. Energia fali to energia kinetyczna i potencjalna drgań cząstek ośrodka. Za pomocą fal można przekazywać energię na duże odległości. Przenoszenie energii bez przenoszenia substancji, czyli masy, nazywamy *transportem energii*.

Ze względu na kierunek drgań cząstek ośrodka względem kierunku rozchodzenia się fali rozróżniamy *fale poprzeczne* i *fale podłużne*.

Fala jest *poprzeczna*, gdy kierunek drgań cząstek ośrodka jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali i zarazem kierunku transportu energii. Przykładem mogą tu być drgania naprężonego sznura, którego końcem poruszamy cyklicznie w górę i w dół.

Fala jest *podłużna*, gdy kierunek drgań cząstek ośrodka jest równoległy do kierunku rozchodzenia się fali i zarazem kierunku transportu energii. Przykładem są tu fale dźwiękowe w powietrzu.

Falę charakteryzują następujące, podstawowe wielkości:

- ✓ *Amplituda fali A* jest równa bezwzględnej wartości maksymalnego przemieszczenia elementu ośrodka względem położenia równowagi;
- ✓ *Faza fali φ* określa wartość przemieszczenia w punkcie x w czasie t ;
- ✓ *Okres drgań T* cząsteczek ośrodka, przez, który przechodzi fala jest to czas, w którym cząsteczka wykona jest jedno pełne drganie.
- ✓ *Częstotliwość fali f* oznacza liczbę drgań elementu ośrodka w jednostce czasu.

Okres i częstotliwość związane są zależnością: $f = 1/T$. Jednostką częstotliwości jest herc (Hz).

Przy częstotliwości 1 Hz cząsteczka wykonuje 1 drganie w czasie 1 s.

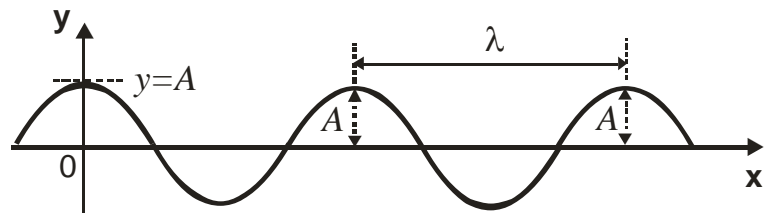
Drogę, jaką przebędzie fala w czasie jednego okresu drgań T nazywamy *długością fali λ* .

Prędkość fali jest, więc równa:

$$v = \lambda/T = \lambda \cdot f \quad (1)$$

Prędkość fali jest równa iloczynowi długości fali i częstotliwości drgań.

Gdy fala przejdzie drogę λ , to cząsteczka w punkcie początkowym wykona 1 pełne drganie, więc będzie w takiej samej fazie jak cząstka, do której fala właśnie dotarła.



Zatem długość fali jest równa odległości pomiędzy najbliższymi punktami o jednakowym wychyleniu i kierunku ruchu.

Fale dźwiękowe

Szczególnym rodzajem fal mechanicznych są fale dźwiękowe. *Falą dźwiękową* nazywamy dowolną mechaniczną falę podłużną. Wrażenie dźwięku jest u człowieka wywołane przez fale o częstotliwościach mieszczących się w przedziale od 20 Hz do 20 000 Hz. Zarówno górna jak i dolna granica odbieranych częstotliwości może być indywidualną cechą człowieka.

Falę dźwiękową w powietrzu stanowią rozchodzące się zaburzenia polegające na cyklicznym zgęszczeniu i rozrzedzeniu powietrza (cyklicznej zmianie ciśnienia i gęstości). Te obszary zagęszczenia i rozrzedzenia przesuwały się z prędkością dźwięku w pewnym kierunku, i mogą wpaść do czyjegoś ucha i wywołać w nim wrażenie dźwięku.



Dźwięki o częstotliwości większej od 20 kHz nazywamy *ultradźwiękami*. Słyszą je niektóre zwierzęta jak psy (do 35 kHz), nietoperze (do 100 kHz) i delfiny (200 kHz).

Dźwięki o częstotliwościach poniżej 20 Hz noszą nazwę *infradźwięków*. Do kategorii infradźwięków należą fale sejsmiczne, rozchodzące się we wnętrzu Ziemi.

W stałych warunkach prędkości dźwięku w różnych ośrodkach są w miarę stabilne i określone. Prędkość dźwięku zależy od gęstości ośrodka, jego własności sprężystych (w przypadku ciał stałych), ściśliwości i temperatury (w przypadku płynów).

Prędkość dźwięku w powietrzu zależy od temperatury (w kelwinach) według zależności:

$$v = v_0 \sqrt{T/T_0} \quad (2)$$

gdzie $v_0 = 331,5$ m/s — prędkość dźwięku w powietrzu w temperaturze $T_0 = 273,15$ K, (0°C).

Zmiana temperatury powietrza o 10°C powoduje zmianę prędkości dźwięku o około 6 m/s, (z temperaturą zmienia się gęstość powietrza).

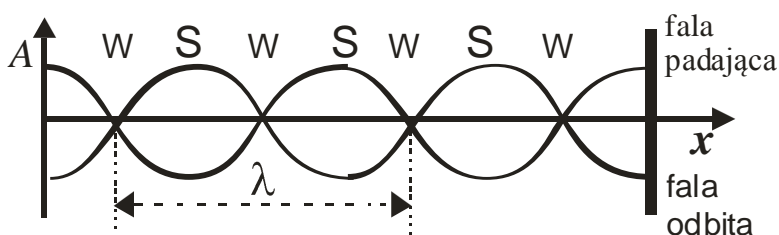
Rezonans akustyczny

Gdy membrana głośnika drga w pobliżu rury, przy pewnych częstotliwościach dźwięku rura rezonuje — w rurze powstaje wtedy fala stojąca. Fala stojąca powstaje w rurze, gdy fala odbita od końca rury interferuje z falą wysyłaną ze źródła. *Interferencją fal* nazywamy nakładanie się fal o tej samej częstotliwości, powodujące wzmocnienie lub osłabienie natężenia fali wypadkowej.

W rzeczywistości fala dźwiękowa w rurze ulega kilkukrotnemu odbiciu w tę i z powrotem pomiędzy końcami rury. Na ogół kolejno odbijane fale nie są zgodne w fazie i amplituda fali wypadkowej będzie mała. Przy pewnych częstotliwościach drgań, wszystkie odbite fale są zgodne w fazie i dają dużą amplitudę fali stojącej. Te częstotliwości są zwane *częstotliwościami rezonansowymi* — przy tych częstotliwościach ma miejsce maksymalny transfer energii pomiędzy głośnikiem i rurą o danej długości.

Stojąca fala dźwiękowa w powietrzu ma węzły i strzałki. **Węzeł** w stojącej fali dźwiękowej jest punkt, w którym prawie nie ma wibracji powietrza. **Strzałka** jest punkt, w którym ruch powietrza jest maksymalny.

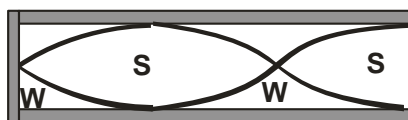
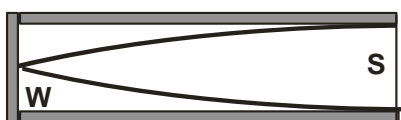
Odległości między kolejnymi węzłami lub strzałkami są równe połowie długości fali, $\lambda/2$.



Fala stojąca jako wynik interferencji fali padającej i odbitej. W – węzeł, S – strzałka.

Odbicie fali dźwiękowej może zachodzić zarówno na otwartych, jak i zamkniętych końcach rury. Jeżeli koniec rury jest zamknięty, cząsteczki powietrza nie mogą drgać poza płaszczyznę zamknięcia — przy końcu rury występuje węzeł. W przypadku odbicia fali na końcu otwartym, występuje tam strzałka. Warunki dla rezonansu łatwiej zrozumieć posługując się pojęciem długości fali. Sformułujemy je dla rury zamkniętej z jednego końca.

Jeśli rura jest zamknięta z jednej strony (otwarta tylko po stronie głośnika) rezonans występuje, gdy długość rury L jest równa nieparzystej wielokrotności ćwiartki długości fali λ .



$$L = n \frac{\lambda}{4}; \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots$$

Rura zamknięta: $n=1$

$n=3$

Dla rury zamkniętej z jednej strony warunek rezonansowy na długość fali λ jest, więc następujący:

$$\lambda = \frac{4L}{n}; \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (3)$$

Korzystając z zależności (1) i (3) możemy obliczyć, przy jakiej długości rury L wystąpi rezonans dźwięku o danej częstotliwości f . Dla rury zamkniętej jednostronnie dostajemy:

$$L = \frac{nv}{4f}; \quad n = 1, 3, 5, 7, \dots \quad (4)$$

Pomiar długości fali

W ćwiczeniu badany będzie rezonans dźwięku o stałej częstotliwości f w rurze zamkniętej z jednego końca. Rura zamknięta jest tłoczkiem, który może być przesuwany wzdłuż rury. Odległość powierzchni czołowej tłoczka od końca rury, przy którym zamocowany jest głośnik, jest miarą faktycznej długości L rury rezonansowej. Gdy odległość ta umożliwia powstanie w rurze fali stojącej powstaje rezonans i z rury dochodzi dźwięk o dużym natężeniu, co oznacza, że długości L jest dokładnie równa nieparzystej wielokrotności ćwiartki długości fali λ . W miarę oddalania tłoczka od końca rury z głośnikiem, tzn. wydłużania odległości L , rezonans zanika, a gdy przyrost długości rury jest równy połowie długości fali, rezonans występuje ponownie:

$$\Delta L = \frac{v}{4f} \cdot \Delta n = \frac{\lambda}{4} \cdot 2 = \frac{\lambda}{2}$$

(Δn – różnica sąsiednich liczb nieparzystych).

Odczyt dwóch sąsiednich położen tłoczka (współrzędnych), przy których występuje rezonans umożliwia obliczenie wartości połowy długości fali dźwiękowej rozchodzącej się w rurze.



Po wyznaczeniu długości fali z zależności (1) obliczamy prędkość dźwięku w powietrzu w temperaturze pokojowej.

WYKONANIE ĆWICZENIA

Głośnik, podłączony do generatora częstotliwości akustycznych, wywołuje drgania powietrza w rurze rezonansowej. Generator sygnału może wytworzyć kilka wartości częstotliwości napięcia przekazywanego do głośnika. Mikrofon, zamontowany u wylotu rury rezonansowej (obok głośnika), wytwarza napięcie stałe o wartości odpowiadającej głośności dźwięku. Sygnał rejestrowany przez mikrofon może być odczytany na woltomierzu podłączonym do mikrofonu.

Czynności pomiarowe

1. Przysuń tłoczek w rurze rezonansowej blisko generatora.
2. Podłącz kabel generatora częstotliwości do gniazdka napięcia 230 V i pokrętlą częstotliwości wybierz jedną z siedmiu możliwych wartości częstotliwości.
3. Miernik uniwersalny ustaw na pomiar częstotliwości i podłącz go do gniazd w generatorze oznaczonych „Częstotliwość, Hz”.
4. Włącz generator i odczytaj oraz zapisz wartość wybranej częstotliwości (w dalszej części ćwiczenia nie zmieniaj już częstotliwości generatora).
5. Wyłącz generator i odłącz multimetr.
6. Przetwó pokrętko multimetru na pomiar napięcia stałego i podłącz go do gniazd w generatorze oznaczonych „Głośność, V DC”.
7. Włącz ponownie generator i zacznij **powoli** oddalać tłoczek od głośnika. Gdy głośność dźwięku jest maksymalna ustaw precyzyjnie położenie tłoczka obserwując wskazania woltomierza. Maksymalna wartość napięcia oznacza dokładnie położenie rezonansowe (maksymalna wartość napięcia może być dla każdego rezonansu trochę inna).
8. Wpisz w tabelę współrzędną położenia tłoczka (z dokładnością do 1mm).
9. Ponownie oddalaj tłoczek i ustal współrzędną odpowiadającą kolejnemu położeniu rezonansowemu. Pomiar powtarzamy aż do uzyskania od pięciu do sześciu odczytów.
10. Wyłącz generator i multimetr, odczytaj i zapisz temperaturę powietrza.



Analiza danych

1. Oblicz różnicę sąsiednich odczytów ΔL_i dla kolejnych rezonansów i określ dla każdej różnicy długości fali: $\lambda_i = 2 \cdot \Delta L_i$.
2. Oblicz średnią długość fali $\bar{\lambda}$ i prędkość dźwięku w powietrzu, $v = \bar{\lambda} \cdot f$.
3. Oblicz teoretyczną prędkość dźwięku v_t na podstawie przybliżonego wzoru (2) opisującego zależność prędkości dźwięku w powietrzu od temperatury (temperatura w kelwinach!).
4. Oblicz błąd względny wyznaczonej wartości v względem wartości teoretycznej v_t :

$$B_p = \frac{|v - v_t|}{v_t} \cdot 100\% .$$

Rachunek błędów.

W ćwiczeniu mamy do czynienia z pomiarem λ powtórzonym kilkakrotnie. Oznaczmy kolejne wyniki pomiaru przez λ_i , gdzie indeks i oznacza numer pomiaru ($i = 1, \dots, N$). Średnia arytmetyczna $\bar{\lambda}$ z wyników pomiarów jest dobrym oszacowaniem wartości długości fali dźwiękowej:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \lambda_i = \frac{\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N}{N}$$

Za miarę niepewności pomiarowej średniej arytmetycznej wartości λ przyjmujemy błąd średni kwadratowy σ (tzw. odchylenie standardowe wartości średniej):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\bar{\lambda} - \lambda_i)^2}{N(N-1)}}$$

Uznajemy, że błąd wyznaczonej wartości λ wynosi σ , co możemy zapisać w postaci $\lambda = \bar{\lambda} \pm \sigma$.

Błąd względny wyznaczenia prędkości dźwięku w powietrzu, obliczonej na podstawie wzoru $v = \lambda \cdot f$, jest równy sumie błędu względnego $\Delta\lambda/\lambda = \sigma/\bar{\lambda}$ i błędu względnego pomiaru częstotliwości f miernikiem cyfrowym:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} + \frac{\Delta f}{f} = \frac{\sigma}{\bar{\lambda}} + \frac{\Delta f}{f}.$$

W przypadku mierników cyfrowych wykorzystywanych w ćwiczeniu należy przyjąć dokładność (błąd względny) pomiaru częstotliwości równą 0,3 %.

Wynik obliczeń błędu pomiaru powinien być zaokrąglony w górę.

Na zakończenie należy we wnioskach porównać błąd względny prędkości dźwięku uzyskany z rachunku błędów z błędem względnym względem wartości teoretycznej.