

Ćwiczenie nr 73

Wyznaczanie prędkości fali dźwiękowej w powietrzu metodą rury rezonansowej

1 Wstęp teoretyczny

1.1 Rodzaje fal, równanie falowe, prędkość fazowa fali

Fale można podzielić na podłużne i poprzeczne, w zależności od kierunku drgań ośrodka względem kierunku rozchodzenia się fali. Fala dźwiękowa w powietrzu jest falą mechaniczną podłużną, polegającą na rozchodzeniu się zaburzeń gęstości i ciśnienia ośrodka. Ogólne równanie różniczkowe fali (równanie falowe) dla jednowymiarowego przypadku ma postać:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} \quad (1)$$

gdzie $\Psi(x, t)$ reprezentuje zaburzenie (np. ciśnienie akustyczne), a v jest prędkością fazową fali. Prędkość fazowa opisuje szybkość przemieszczania się punktów o stałej fazie i dla fali harmoniczej wyraża się wzorem $v = \frac{\omega}{k}$, gdzie ω to częstość kołowa, a k to liczba falowa (Ling et al., 2018).

1.2 Równanie opisujące falę harmoniczną

Najprostszym rozwiązaniem równania falowego jest fala harmoniczna (sinusoidalna). Równanie opisujące taką falę biegnącą w kierunku dodatnim osi x ma postać:

$$\Psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t + \phi) \quad (2)$$

gdzie A to amplituda fali, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ jest liczbą falową, $\omega = 2\pi f$ jest częstością kołową, a ϕ fazą początkową. Wielkości te wiążą się z prędkością propagacji zależnością $v = \lambda f$ (Ling et al., 2018).

1.3 Rezonans akustyczny - fala stojąca

Fala stojąca powstaje w wyniku interferencji (superpozycji) dwóch fal o tej samej częstotliwości i amplitudzie, biegnących w przeciwne strony. Zjawisko to zachodzi w ograniczonych

ośrodkach, np. w rurze, gdzie fala padająca nakłada się z falą odbitą od końca rury. Równanie fali stojącej można zapisać jako:

$$\Psi_{st}(x, t) = 2A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (3)$$

Charakterystyczną cechą fali stojącej jest występowanie węzłów (punktów o zerowej amplitudzie) oraz strzałek (punktów o maksymalnej amplitudzie). Odległość między sąsiednimi węzłami (lub strzałkami) wynosi $\frac{\lambda}{2}$. W rurze jednostronnie zamkniętej (tzw. rezonator ćwierćfalowy) węzeł przemieszczenia cząsteczek powstaje na końcu zamkniętym (strzałka ciśnienia), a strzałka przemieszczenia na końcu otwartym (węzeł ciśnienia). Warunek rezonansu dla takiej rury o długości L jest spełniony, gdy:

$$L = (2n - 1) \frac{\lambda}{4}, \quad \text{gdzie } n = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

1.4 Prędkość rozchodzenia się fali dźwiękowej w powietrzu

Prędkość dźwięku w gazach zależy od ich właściwości termodynamicznych. Zgodnie z teorią kinetyczną gazów, prędkość ta wyraża się wzorem:

$$v = \sqrt{\frac{\kappa RT}{M}} \quad (5)$$

gdzie κ to wykładnik adiabaty (dla powietrza ok. 1,4), R to uniwersalna stała gazowa, T to temperatura bezwzględna, a M to masa molowa gazu. Widać stąd, że prędkość dźwięku rośnie wraz z pierwiastkiem temperatury (Moebs et al., 2018). Pomiar prędkości dźwięku można zrealizować metodą rury rezonansowej (jak w niniejszym ćwiczeniu) lub np. rurą Kundta, gdzie wizualizuje się węzły i strzałki za pomocą pyłu korkowego. W obecnym ćwiczeniu wykorzystuje się zmianę długości słupa powietrza ("Puzon") przy stałej częstotliwości źródła, co pozwala wyznaczyć długość fali λ z odległości między maksimami natężenia dźwięku.

1.5 Generacja i detekcja fal dźwiękowych

W układzie pomiarowym źródłem fali dźwiękowej jest głośnik zasilany z generatora akustycznego, który przetwarza sygnał elektryczny na drgania mechaniczne membrany. Detekcja odbywa się za pomocą mikrofonu, który zamienia zmiany ciśnienia akustycznego na sygnał napięciowy. Sygnał ten jest następnie wzmacniany i mierzony za pomocą woltomierza. Maksymalne wskazania woltomierza odpowiadają występowaniu rezonansu (strzałki fali stojącej) przy mikrofonie.

Literatura

- Ling, S. J., Sanny, J., and Moebs, W. (2018). *Fizyka dla szkół wyższych, Tom 3*. OpenStax. Dostęp: 13.10.2025.
- Moebs, W., Ling, S. J., and Sanny, J. (2018). *Fizyka dla szkół wyższych, Tom 2*. OpenStax. Dostęp: 14.04.2024.