

# 20 – Wyznaczanie prędkości dźwięku w powietrzu za pomocą rury Kundta

## *Instrukcja do ćwiczeń wirtualnych w Laboratorium Fizyki I teren południowy*

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie prędkości dźwięku w powietrzu za pomocą rury Kundta.

### 1. WSTĘP TEORETYCZNY

#### Fale

Fale dzieli się zazwyczaj na trzy główne rodzaje:

1. **Fale mechaniczne** - fale, polegające na rozprzestrzenianiu się drgań ośrodka, w którym się rozchodzą. Mogą to być między innymi fale morskie, fale dźwiękowe i fale sejsmiczne. Wszystkie one posiadają jedną główną cechę: rozchodzą się zgodnie z prawami fizyki klasycznej i mogą istnieć tylko w ośrodkach materialnych takich jak woda, powietrze czy ciało stałe.
2. **Fale elektromagnetyczne** - rozchodzące się w przestrzeni zmienne pole elektromagnetyczne. Fale te nie wymagają ośrodka do rozchodzenia, czyli mogą rozchodzić się w próżni. Przykładami fal elektromagnetycznych są światło, fale radiowe, telewizyjne, mikrofalowe, promieniowanie rentgenowskie i radarowe. Wszystkie fale elektromagnetyczne poruszają się w próżni z taką samą prędkością zwaną prędkością światła.
3. **Fale materii** - fale związane ze wszystkimi poruszającymi się obiektami materialnymi. Długość fali materii jest odwrotnie proporcjonalna do masy i prędkości obiektu, dlatego też o wiele łatwiej stwierdzić własności falowe elektronów czy innych cząstek elementarnych niż np. poruszającego się człowieka.

Fale można podzielić również na dwa rodzaje w zależności od **kierunku drgań** ośrodka (lub zmian parametru opisującego falę) względem kierunku rozchodzenia się fali. Jeśli kierunek drgań jest **prostopadły do kierunku** rozchodzenia się fali, to taka fala nosi nazwę **fali poprzecznej**. Jeśli kierunek drgań jest **równoległy do kierunku** rozchodzenia się fali, to taka fala nosi nazwę **fali podłużnej**.

Ogólny wzór opisujący rozchodzącą się w przestrzeni **falę harmoniczną** jest następujący:

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t),$$

gdzie:

$y(x, t)$  - przemieszczenie zależne zarówno od położenia  $x$  i czasu  $t$ ,

$A$  - **amplituda** fali,

$k$  - **liczba falowa** równa  $2\pi/\lambda$ , a  $\lambda$  oznacza **długość fali** (odległość między dwoma maksimami lub dwoma minimami),

$\omega$  - **częstość kołowa** równa  $2\pi/T$ , a  $T$  oznacza **okres drgań**, czyli czas upływający między jednym, pełnym cyklem zmian położenia dowolnego elementu,

$(kx - \omega t)$  - **faza** fali.

#### Ogólna definicja fali dźwiękowej

Przykładem ruchu falowego jest rozchodzenie się fali dźwiękowej w powietrzu. Cząsteczki powietrza, pobudzone do drgań, ulegają periodycznym zagęszczeniom i rozrzedzeniom, które mogą przenosić się na duże odległości. Tego typu drgania odbywają się wzdłuż prostej pokrywającej się z kierunkiem propagacji zaburzenia, tak więc **fala dźwiękowa jest podłużną falą mechaniczną**. Źródła, takie jak ludzkie struny głosowe, struny instrumentów muzycznych lub wibrujące membrany głośników, wytwarzają w powietrzu fale mechaniczne o częstotliwościach z zakresu około od 20 do 20000 Hz, które w działaniu na nasze uszy wywołują uczucie słyszenia. Takie fale nazywamy falami dźwiękowymi. Ultradźwięki to fale dźwiękowe o częstotliwości powyżej 20000 Hz, a infradźwięki to fale o częstotliwości z zakresu od 1 do 20 Hz.

**Prędkość fali dźwiękowej**

Dowolnej fali rozchodzącej się w ośrodku możemy przypisać parametr zwany prędkością rozchodzenia się:

$$v = \frac{\lambda}{T} = f\lambda$$

gdzie:  $\lambda$  – długość fali,

$T$  – okres,

$f$  – częstotliwość [Hz],  $f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$ .

Ze wzoru tego wynika, że długość fali jest odwrotnie proporcjonalna do jej częstotliwości ( $\lambda \sim \frac{1}{f}$ ), a rolę współczynnika proporcjonalności pełni prędkość fali  $v$ . Można wykazać, że prędkość fali dźwiękowej w suchym powietrzu jest równa:

$$v = \sqrt{\kappa \frac{p}{\rho}}$$

gdzie:  $p$  oraz  $\rho$  – ciśnienie oraz gęstość powietrza (niezaburzonego falą dźwiękową),

$\kappa$  – stosunek ciepła właściwego powietrza przy stałym ciśnieniu do ciepła właściwego powietrza przy stałej objętości ( $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ ).

Należy przy tym uwzględnić, że gęstość powietrza  $\rho$  zależy od temperatury  $T$  zgodnie z zależnością:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha T}$$

gdzie:  $\rho_0$  – gęstość powietrza w 0 °C (273,16 K),

$\alpha$  – współczynnik rozszerzalności objętościowej powietrza (1/K),

$T$  – temperatura w skali bezwzględnej (K).

Ostatecznie otrzymujemy więc:

$$v = v_0 \sqrt{1 + \alpha T}$$

gdzie:  $v_0 = 331 \frac{m}{s}$  – prędkość dźwięku w 0 °C.

Przytoczony wzór jest słuszny dla fal dźwiękowych o niezbyt dużym natężeniu. Wtedy prędkość dźwięku nie zależy od jego natężenia ani od częstotliwości, ale jest zależna od temperatury, w taki sposób, że im wyższa temperatura powietrza, tym dźwięk rozchodzi się w nim szybciej. Tablicowe wartości prędkości dźwięku dla różnych temperatur przedstawia tabela:

Temperatura, °C	$v / \frac{m}{s}$
-40	306,5
-20	319,3
0	331,8
20	343,8
40	355,3

Z ogromnej różnicy między prędkością dźwięku w powietrzu (około  $3 \cdot 10^2 \frac{m}{s}$ ) a prędkością światła (około  $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ) wynika między innymi zauważalna rozbieżność czasowa między błyskiem a grzmotem w czasie burzy. Istnieje prosty sposób na oszacowanie w jakiej odległości od obserwatora uderzył piorun: wystarczy przyjąć, że na każde 3 s opóźnienia między zauważeniem błysku a usłyszeniem grzmotu przypada odległość około 1 km drogi, którą w tym czasie w powietrzu przebył dźwięk.

## Fale stojące

Jak wszystkie inne fale, również fale dźwiękowe mogą ulegać interferencji (nakładaniu się). Wynikiem interferencji fal składowych jest ruch falowy złożony. Jeżeli dwie fale o jednakowej częstotliwości i amplitudzie, biegną w kierunkach przeciwnych, to po ich nałożeniu możemy otrzymać tzw. **falę stojącą**.

Założmy, że interferować będą dwie fale o tej samej częstotliwości i amplitudzie:

- pierwsza:  $y_1(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$  i
- druga:  $y_2(x, t) = A \sin(kx + \omega t)$ .

Zgodnie z zasadą superpozycji wypadkowa fala będzie miała postać:

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t),$$

a po zastosowaniu wzorów trygonometrycznych otrzymuje się **równanie fali stojącej**:

$$y(x, t) = [2A \sin(kx)] \cos(\omega t).$$

Czynnik w nawiasie kwadratowym można traktować jako amplitudę drgań elementu w pozycji  $x$ , natomiast czynnik opisywany funkcją cosinus określa zmienność drgań w czasie.

W przypadku fali harmonicznej rozchodzącej się w przestrzeni amplituda drgań jest taka sama w każdym punkcie przestrzeni. W przypadku fali stojącej tak nie jest, **amplituda zależy od położenia**. Amplituda fali stojącej może być równa zero, jeśli do równania fali stojącej podstawimy wartości  $kx$  takie, aby  $\sin(kx) = 0$ . Taki warunek jest spełniony gdy:

$$kx = n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \text{ czyli } x = n \frac{\lambda}{2}.$$

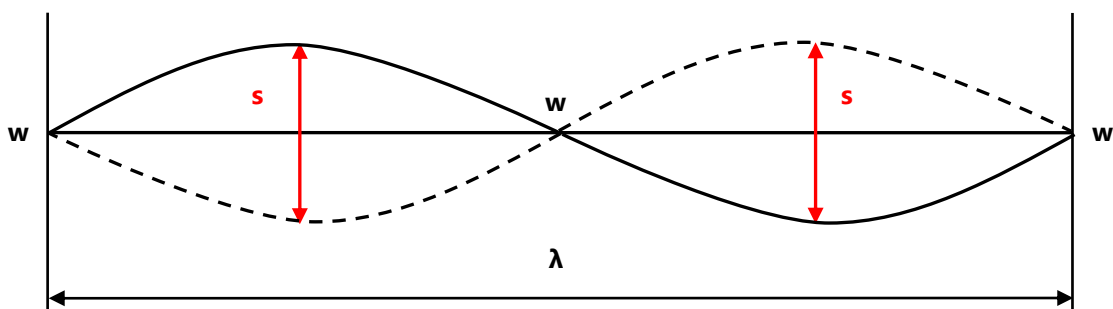
Punkty, w których amplituda jest równa 0 nazywają się **węzłami**.

Maksymalną amplitudę uzyskuje się wówczas, gdy podstawimy wartości  $kx$  takie, aby  $|\sin(kx)| = 1$ . Taki warunek jest spełniony gdy:

$$kx = \frac{1}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi, \dots = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi, \quad (n = 0, 1, 2, \dots), \text{ czyli } x = \left(n + \frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}.$$

Punkty w których amplituda jest maksymalna nazywają się **strzałkami**.

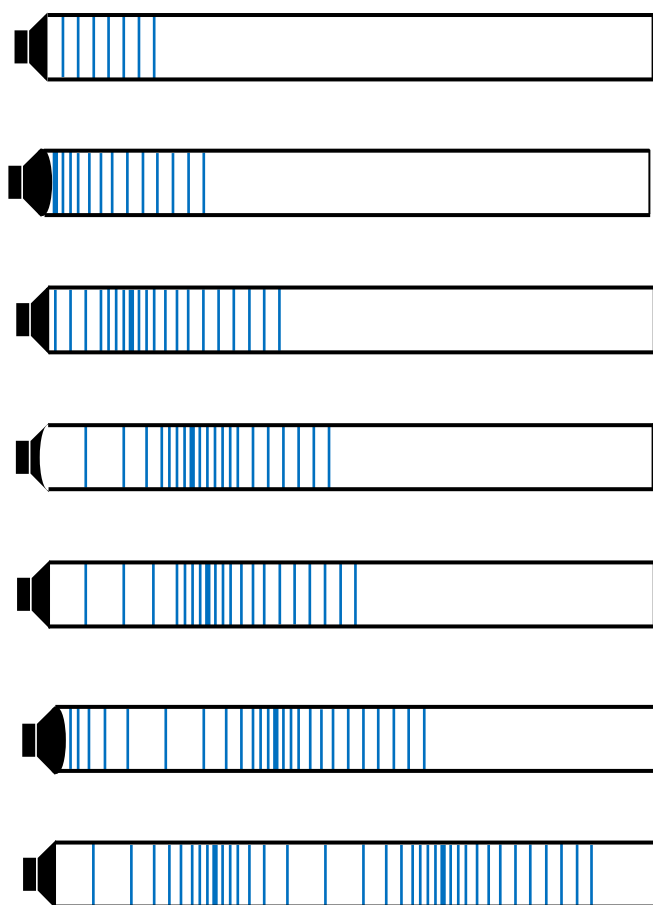
Zwykle fala taka powstaje poprzez nałożenie na falę biegnącą fali odbitej od jakiejś przeszkody. Falę stojącą można w prosty sposób wytworzyć np. w drgającej strunie (**fala mechaniczna poprzeczna!**), która jest umocowana w obu końcach do ścian (rys. 1). W wyniku nałożenia się drgań składowych (dwóch jednakowych sinusoid rozchodzących się w przeciwnych kierunkach z taką samą prędkością) powstaje drganie wypadkowe, które ma postać fali stojącej, a więc sinusoidy, która odkształca się, ale nie przesuwa wzdłuż struny.



Rysunek 1. Fala stojąca na strunie zamocowanej z dwóch końców. Zaznaczono węzły (W) oraz strzałki (S).

Idealna fala stojąca różni się więc od fali biegnącej tym, że nie ma propagacji drgań, nie występuje zatem np. czoło fali. Miejsca, gdzie amplituda fali stojącej osiąga maksima nazywane są **strzałkami (S)**, zaś te, w których amplituda jest zawsze zerowa, **węzłami (W)**. Odległość dwóch najbliższych węzłów (a także dwóch najbliższych strzałek) wynosi  $\frac{\lambda}{2}$ , gdzie  $\lambda$  jest długością fali.

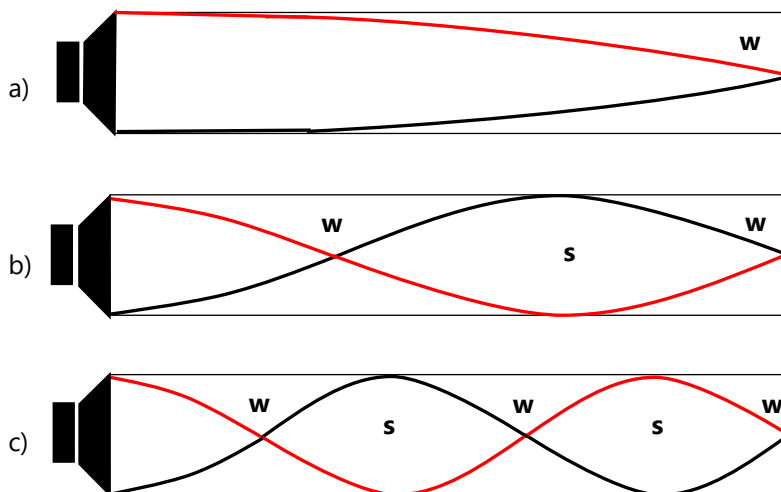
W ćwiczeniu badane będą fale stojące dźwiękowe, czyli fale mechaniczne podłużne. Rozpatrzmy teraz rozchodzenie się fali dźwiękowej w rurze wypełnionej powietrzem, zamkniętej z jednego końca, ze źródłem dźwięku (głośnikiem) po przeciwnej stronie (tzw. rura Kundta). Na rysunku 2 przedstawiono schematycznie powstawanie fali dźwiękowej w rurze. Membrana głośnika wykonuje drgania w lewo i w prawo powodując zagęszczenia i rozrzedzenia ośrodka, czyli powodując drgania cząsteczek ośrodka. Cząsteczki przekazują energię kolejnym i powstaje fala biegnąca od głośnika. Jeśli napotka zamknięty koniec rury, to następuje odbicie fali. Faza fali odbitej zmienia się wtedy o  $180^\circ$ , a jej kierunek rozchodzenia zmienia się na przeciwny. Należy podkreślić, że fale dźwiękowe mogą się rozchodzić nie tylko w powietrzu, ale również w cieczach i ciałach stałych, **ale nie rozchodzą się w próżni!**



**Rysunek 2. Powstawanie fali dźwiękowej w rurze przy użyciu głośnika**

W pewnych okolicznościach, w wyniku nałożenia się fali biegnącej od głośnika i fali odbitej, może dojść do wytworzenia się opisaną wcześniej **fali stojącej**. Częstotliwości fal dźwiękowych, które skutkują powstaniem fal stojących w rurze nazywa się **częstotliwościami harmonicznymi**. Najniższa częstotliwość harmoniczna odpowiada sytuacji, w której na jednym końcu rury powstanie strzałka, a na drugim – węzeł (rys. 3a). Długość rury  $L$  będzie więc odpowiadała  $\frac{\lambda}{4}$ . Dla kolejnej częstotliwości harmoniczej, na długości rury odłożą się 3 ćwiartki długości fali, czyli  $L = \frac{3}{4}\lambda$  (rys. 3b). Ogólnie, w rurze o długości  $L$  mogą powstać fale stojące, których długości spełniają warunek:

$$L = (2n + 1) \frac{\lambda}{4} \quad n = 0, 1, 2$$



**Rysunek 3. Fale stojące w rurze Kundta dla 1, 2 i 3 częstotliwości harmoniczej.**

z którego wynika, że współrzędne  $x$  liczone od pozycji głośnika kolejnych strzałek, to:

$$x_{n,m}^{(s)} = \frac{2mL}{2n + 1}$$

natomiast węzłów, to:

$$x_{n,m}^{(w)} = \frac{(2m + 1)L}{2n + 1}$$

gdzie  $n$  to numer kolejnej harmoniczej natomiast  $0 \leq m \leq n$  jest numerem kolejnej strzałki lub węzła liczonym od głośnika. Wartości  $m = 0$  odpowiada strzałka w miejscu głośnika oraz węzeł odległy od głośnika o  $\lambda/4$ .

Pomiar odległości między sąsiednimi węzłami stojącej fali dźwiękowej w rurze Kundta, przy znanej częstotliwości fali generowanej z głośnika, pozwala wyznaczyć prędkość tej fali. Częstotliwości te (częstotliwości harmoniczne) określone są wzorem:

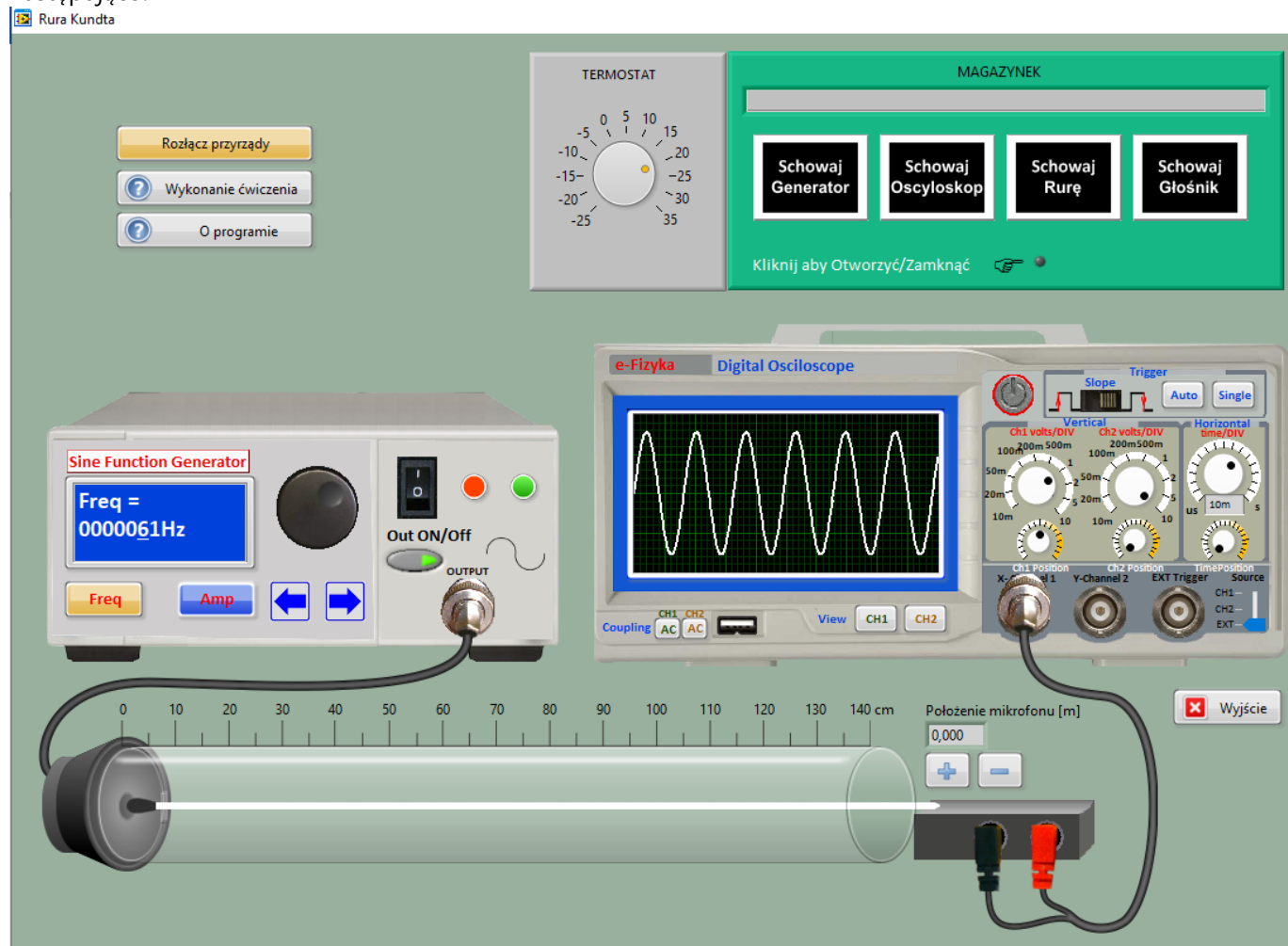
$$f_n = \frac{2n + 1}{4L} v$$

który powstaje z podstawienia wzoru łączącego prędkość, częstotliwość i długość fali do warunku rezonansu. Wynika stąd, że odległość między kolejnymi częstotliwościami rezonansowymi jest stała i zależy tylko od stosunku prędkości fali do długości rury:

$$\Delta f = f_{n+1} - f_n = \frac{v}{2L}$$

## 2. UKŁAD POMIAROWY

Wirtualne doświadczenie realizuje się przez uruchomienie aplikacji "Rura Kundta". Układ pomiarowy wygląda następująco:



W układzie tym generator napięcia sinusoidalnie zmiennego (*Sine Function Generator*) o regulowanej amplitudzie i częstotliwości wytwarza sygnał napięciowy, który podawany jest na cewkę membrany głośnika przystawionego do otwartego końca szklanej rury. Fala dźwiękowa rozchodząca się od głośnika, interferuje z falą odbitą od zamkniętego końca rury, co dla częstotliwość rezonansowej prowadzi do powstania fali stojącej.

Na osi rury zamontowany jest mikrofon, który można swobodnie przesuwając w poziomie a jego położenie względem skali naniesionej na rurę wyświetla się w okienku „Położenie mikrofonu [m]”.

Drgania membrany mikrofonu, wywołane rozrzedzeniami i zagęszczeniami powietrza, są przetwarzane na sygnał napięciowy. Przebieg czasowy tego sygnału można obserwować na ekranie oscyloskopu. Oscyloskop umożliwia ustawienie wzmocnienia sygnału podawanego na wejście *Ch1* (skalowanie sygnału w pionie za pomocą pokrętła *volts/DIV*) oraz dobór podstawy czasu (skalowanie sygnału w poziomie pokrętłem *time/DIV*). Dzięki obserwacjom zmian amplitudy sygnału napięciowego na ekranie możliwe jest wykrycie miejsc, gdzie w rurze tworzą się węzły (amplituda sygnału z mikrofonu osiąga minimum, następuje wyciszenie tzn. cząsteczki powietrza nie drgają) oraz strzałki (amplituda maksymalna – następuje maksymalne wzmocnienie dźwięku).

Temperaturę powietrza, w której zachodzi zjawisko, można regulować pokrętłem na termostacie w zakresie od  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , co  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 3. WYKONANIE ĆWICZENIA

W celu wykonania pomiarów należy:

1. Wyjąć z magazynku przyrządy - generator, głośnik, rurę z mikrofonem i oscyloskop.
2. Podłączyć przyrządy.
3. Ustawić na termostacie żadaną temperaturę.
4. Włączyć generator oraz oscyloskop przyciskami na płytach czołowych.
5. Ustawić odpowiednią częstotliwość i amplitudę napięcia na generatorze (używając przycisków Freq i Amp, strzałek oraz pokręteł). Uwaga: generator będzie podawał ustalone napięcie na wyjście dopiero po wciśnięciu przycisku OUT ON/OFF (musi zapalić się zielona dioda).
6. Za pomocą myszki chwycić rękojeść mikrofonu i przesuwać go wzdłuż rury obserwować ekran oscyloskopu w poszukiwaniu węzłów i strzałek fali stojącej. Precyzyjną zmianę położenia mikrofonu umożliwiają przyciski „+” oraz „-”.
7. Dokładne położenie mikrofonu względem głośnika odczytać z pola „Położenie mikrofonu [m]” obok skali (przyjmując, że dla tej skali działka elementarna to 1 mm).
8. Zakres zmienności częstotliwości i liczbę pomiarów określi prowadzący ćwiczenie na zajęciach wstępnych.

### 4. WYKONANIE POMIARÓW I OPRACOWANIE WYNIKÓW

**Dokładność ustawienia (pomiaru) częstotliwości:**  $c_1=0,5\%$ ,  $c_2=0,02\%$ , zakresy 1, 10, 100 kHz

**Dokładność pomiaru położenie mikrofonu (eksperymentatora):**  $\Delta x=0,003$  m

#### 4.1 Wariant A

1. Ustawić temperaturę pomiaru na termostacie.
2. Zmierzyć odległość między węzłami fali stojącej dla minimum 6 a maksymalnie 10 częstotliwości (wybranych dowolnie lub z zakresu przypisanego przez prowadzącego konkretnym zespołom).
3. Na podstawie zależności między wyznaczoną długością fali a ustawioną na generatorze częstotliwością wykonać wykres, na którym punkty pomiarowe układałyby się wzdłuż prostej. Należy nanieść również niepewności pomiarowe, wykonać dopasowanie prostej metodą najmniejszych kwadratów oraz przeprowadzić test  $\chi^2$  na poziomie istotności 5%, w celu zweryfikowania, czy badana zależność jest liniowa.
4. Ze współczynnika kierunkowego prostej wyznaczyć prędkość dźwięku w powietrzu zamkniętym w rurze.
5. Z niepewności współczynnika kierunkowego wyznaczyć niepewność typu A prędkości dźwięku. Dla jednego punktu pomiarowego z wykresu obliczyć niepewność typu B prędkości dźwięku i w razie potrzeby te dwie niepewności ze sobą złożyć.
6. Niepewność typu B ustawienia częstotliwości obliczyć na podstawie podanych wartości  $c_1$  i  $c_2$  dla generatora.
7. Niepewność typu B położenia mikrofonu należy oszacować samodzielnie.
8. Wynik końcowy - prędkość dźwięku zapisać z niepewnością standardową oraz rozszerzoną.
9. We wnioskach ocenić zgodność uzyskanego wyniku z wartością tablicową (podać odpowiednie źródła literaturowe) i przedyskutować czynniki wpływające na występowanie w ćwiczeniu niepewności pomiarowych.

#### 4.1 Wariant B

1. Ustawić temperaturę pomiaru na termostacie.
2. W rurze Kundta wytworzyć falę stojącą dla jednej, dowolnie wybranej częstotliwości (każda osoba wykonuje pomiary dla innej, zdanej częstotliwości).
3. Dla fali stojącej w rurze zmierzyć położenia 10 kolejnych węzłów (licząc od głośnika).
4. Na podstawie zależności między położeniem mikrofonu a numerem węzła wykonać wykres, na którym punkty pomiarowe układałyby się wzdłuż prostej. Na wykres należy nanieść niepewności pomiarowe, wykonać dopasowanie prostej metodą najmniejszych kwadratów oraz wykonać test  $\chi^2$  na poziomie istotności 5% w celu zweryfikowania hipotezy o liniowości badanej zależności.

5. Ze współczynnika kierunkowego prostej wyznaczyć odległość międzywęzłową dla fali stojącej zamkniętej w rurze.
6. Z niepewności współczynnika kierunkowego należy wyznaczyć niepewność typu A odległości międzywęzłowej. Dla jednego punktu pomiarowego z wykresu należy obliczyć niepewność typu B dla odległości międzywęzłowej i ewentualnie te dwie niepewności ze sobą złożyć.
7. Na podstawie wyznaczonej odległości międzywęzłowej i ustawionej częstotliwości obliczyć prędkość dźwięku.
8. Na podstawie niepewności odległości międzywęzłowej i niepewności częstotliwości należy obliczyć niepewność prędkości dźwięku.
9. Niepewność typu B ustawienia częstotliwości obliczyć na podstawie podanych wartości  $c_1$  i  $c_2$  dla generatora.
10. Niepewność typu B położenia mikrofonu oszacować samodzielnie.
11. Wynik końcowy - prędkość dźwięku zapisać z niepewnością standardową oraz rozszerzoną.
12. We wnioskach ocenić zgodność uzyskanego wyniku z wartością tablicową (podać odpowiednie źródło literaturowe) i przedyskutować czynniki wpływające na występowanie w ćwiczeniu niepewności pomiarowych.

### **4.3 Wariant C**

1. Ustawić temperaturę pomiaru na termostacie.
2. W rurze Kundta wytworzyć falę stojącą dla jednej, dowolnie wybranej częstotliwości (zalecany zakres 15-20 kHz).
3. Dla fali stojącej w rurze należy co najmniej 6-cio krotnie wyznaczyć odległość międzywęzłową w serii pomiarowej.
4. Na podstawie wyników w serii obliczyć odległość międzywęzłową a następnie znaleźć jej niepewność typu B i A (w razie konieczności niepewności te należy ze sobą złożyć).
5. Na podstawie wyznaczonej odległości międzywęzłowej i ustawionej częstotliwości obliczyć prędkość dźwięku.
6. Na podstawie niepewności odległości międzywęzłowej i niepewności częstotliwości obliczyć niepewność prędkości dźwięku.
7. Wynik końcowy - prędkość dźwięku zapisać z niepewnością standardową oraz rozszerzoną.
8. Niepewność typu B ustawienia częstotliwości obliczyć na podstawie podanych wartości  $c_1$  i  $c_2$  dla generatora.
9. Niepewność typu B położenia mikrofonu należy oszacować samodzielnie i na jej podstawie oszacować niepewność typu B dla odległości międzywęzłowej.
10. Wynik końcowy - prędkość dźwięku zapisać z niepewnością standardową oraz rozszerzoną.
11. We wnioskach ocenić zgodność uzyskanego wyniku z wartością tablicową (podać odpowiednie źródło literaturowe) i przedyskutować czynniki wpływające na występowanie w ćwiczeniu niepewności pomiarowych.

### **4.4 Wariant D**

1. Ustawić temperaturę pomiaru na termostacie.
2. Ustawić mikrofon na końcu rury (w odległości  $L$  od głośnika) i znaleźć częstotliwość rezonansową (w rurze powstaje fala stojąca z węzłem na końcu rury, a amplituda sinusoidy widocznej na oscyloskopie ma minimum). Modyfikacją tego sposobu pomiaru jest ustawienia mikrofonu jak najbliżej głośnika i zaobserwowanie strzałki fali stojącej (amplituda sinusoidy widocznej na oscyloskopie osiąga wówczas maksimum).
3. Nie zmieniając położenia mikrofonu, znaleźć i zanotować 5-9  kolejnych  częstotliwości rezonansowych (wyższych harmonicznych) – łączna liczba znalezionych częstotliwości rezonansowych powinna być 6-10.
4. Na podstawie danych eksperymentalnych wykreślić zależność między częstotliwością rezonansową a liczbą  $n$ .
5. Obliczyć i nanieść na wykres odcinki niepewności dla punktów pomiarowych. Niepewność typu B ustawienia częstotliwości obliczyć na podstawie podanych wartości  $c_1$  i  $c_2$  dla generatora.
6. Do punktów pomiarowych dopasować prostą metodą najmniejszych kwadratów i na podstawie parametrów dopasowania wyznaczyć prędkość dźwięku oraz jej niepewność typu A.
7. Dla jednego punktu pomiarowego z wykresu obliczyć niepewność typu B prędkości dźwięku i w razie potrzeby złożyć ją z niepewnością typu A.
8. Wynik końcowy - prędkość dźwięku zapisać z niepewnością standardową oraz rozszerzoną.
9. We wnioskach ocenić zgodność uzyskanego wyniku z wartością tablicową (podać odpowiednie źródło literaturowe) i przedyskutować czynniki wpływające na występowanie w ćwiczeniu niepewności pomiarowych.