

ĆWICZENIE 10

POMIAR PRĘDKOŚCI DŹWIĘKU W POWIETRZU

Kraków 08.03.2016

SPIS TREŚCI

CZEŚĆ TEORETYCZNA

1. Wprowadzenie
2. Źródła fal akustycznych i rejestracja fal
3. Amplituda i częstotliwość. Długość fali
4. Podział fal akustycznych
5. Poziom ciśnienia akustycznego wyrażony w decybelach
6. Subiektywne cechy dźwięku i ich odpowiedniki obiektywne
7. Efekt Dopplera
8. Prędkość dźwięku
9. Prędkość dźwięku w gazach. Adiabatyczny model Newtona
10. Zasada pomiaru prędkości dźwięku w gazach
11. Krzywe Lissajous

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

PRZYKŁADY KRZYWCH LISSAJOUS UZYSKANYCH DOŚWIADCZALNIE INSTRUKCJA DO WYKONANIA ĆWICZENIA

ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI

Fale. Podział fal. Fale akustyczne. Źródła i odbiorniki fal akustycznych. Amplituda. Częstotliwość. Dźwięki słyszalne. Infradźwięki. Ultradźwięki. Ciśnienie akustyczne. Poziom ciśnienia akustycznego wyrażony w decybelach. Ton. Wysokość tonu i jego głośność. Efekt Dopplera. Prędkość fali (prędkość fazowa). Model Newtona prędkości dźwięku w gazach. Metoda pomiaru. Krzywe Lissajous (czyt. Lisażu).

CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Wprowadzenie

Fala to rozchodzenie się w ośrodku materialnym lub w próżni zaburzenia pewnej wielkości fizycznej, czyli wszelkiego rodzaju drgań. Fala przenosi energię bez przenoszenia materii.

TABELA 1. Przykłady fal

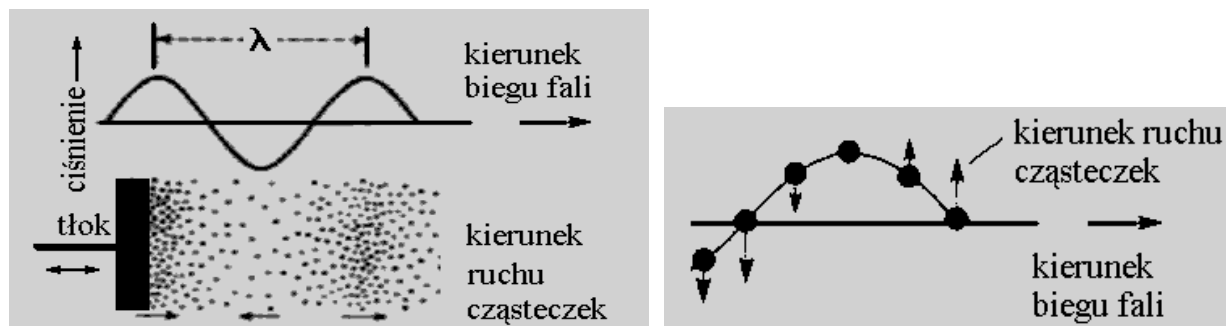
NAZWA	WIELKOŚĆ „ZABURZONA” PODLEGAJĄCA DRGANIOM
Fala powierzchniowa na wodzie	Położenie cząsteczek wody
Fala akustyczna w gazie, w cieczy	Ciśnienie ośrodka (a także gęstość i temperatura)
Fala elektromagnetyczna	Indukcja magnetyczna i natężenie pola elektrycznego

Istnieje szereg **podziałów fal** według różnych kryteriów. Rozróżniamy fale mechaniczne i niemechaniczne. Ze względu na kształt czoła fali, czyli powierzchni łączącej punkty, do których zaburzenie dopiero dotarło, mówimy o falach: płaskich, kołowych, kulistych, cylindrycznych itd. Inny podział to fale poprzeczne i podłużne (patrz Rys.1). Fale tego samego rodzaju lecz różniące się zakresami częstotliwości także noszą różne nazwy.

Fala akustyczna w gazie to zaburzenia ciśnienia i gęstości, które się w nim rozprzesztrzeniają dzięki oddziaływaniom międzycząsteczkowym. Fale akustyczne odbierane zmysłem słuchu nazywamy dźwiękami. Dźwięki w naszym otoczeniu są najczęściej niewielkimi okresowymi zmianami ciśnienia powietrza, czyli drganiami. O falowej naturze dźwięków świadczą takie zjawiska jak: dyfrakcja, interferencja, powstanie fali stojącej, dudnienia i efekt Dopplera. Ponadto fale akustyczne ulegają odbiciu i załamaniu.

Fala akustyczna jest falą mechaniczną, to znaczy związana jest z ruchem atomów lub cząsteczek tworzących ośrodek materialny. Ponadto w gazie jest ona **falą podłużną**, tzn. kierunek ruchu cząsteczek wywołany falą jest równoległy do kierunku biegu fali.

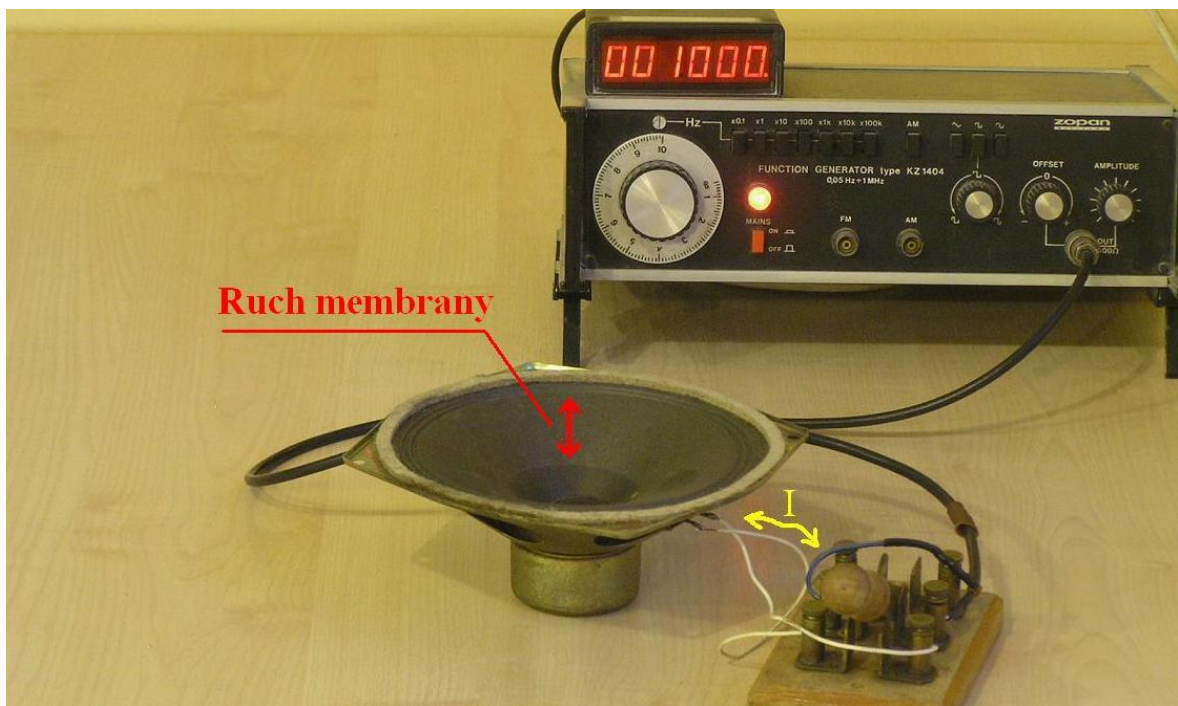
W ciele stałym mogą rozprzesztrzeniać się także akustyczne **fale poprzeczne**, dla których kierunek ruchu cząsteczek wywołany falą jest prostopadły do kierunku biegu fali.



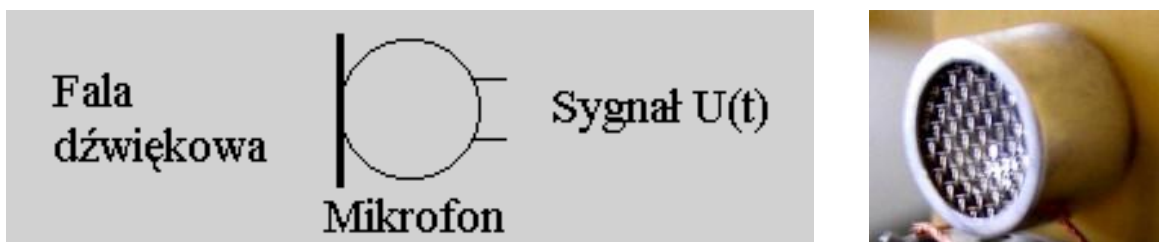
Rys. 1. Po lewej - podłużna fala akustyczna w gazie. Po prawej - fala poprzeczna.

2. Źródła fal akustycznych i rejestracja fal

Źródłami fal akustycznych mogą być drgające membrany, struny i pręty. Ruch drgający membrany głośnika można wzbudzić używając generatora sygnałowego (fot. poniżej).

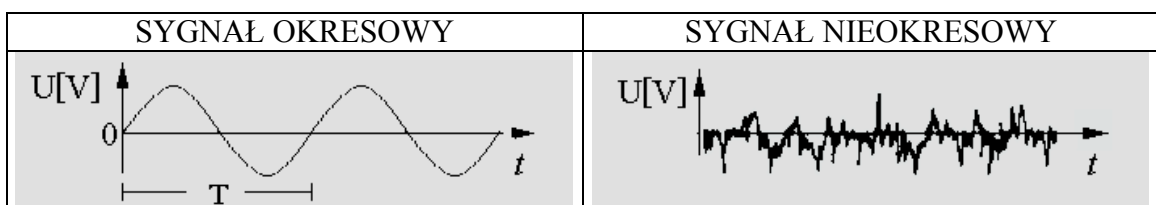


Pomiary dotyczące fal akustycznych i ich rejestrację prowadzić można za pośrednictwem mikrofonów.



Rys.2. Mikrofon użyty w ćwiczeniu: symbol i fotografia.

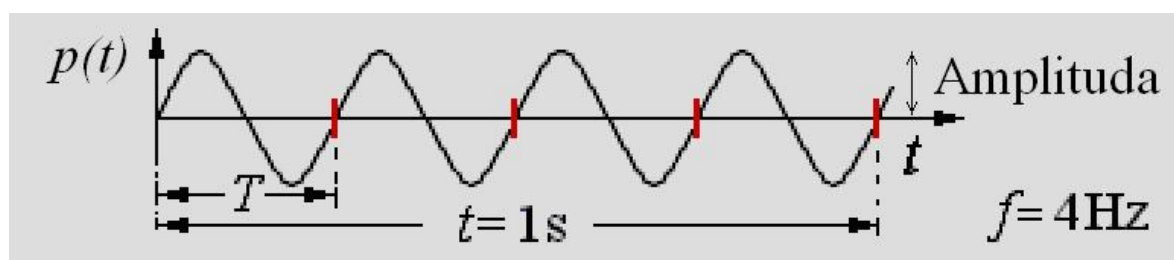
Mikrofon pomiarowy przekształca zmiany ciśnienia powietrza w zmienne napięcie elektryczne $U(t)$, które podlega dalszym pomiarom lub rejestracji. To napięcie zwane inaczej sygnałem elektrycznym może być okresową lub nieokresową funkcją czasu $U(t)$.



3. Amplituda i częstotliwość. Długość fali

Amplituda sinusoidalnej fali akustycznej rozchodzącej się w gazie jest różnicą pomiędzy maksymalną wartością ciśnienia gazu $p(t)$, a jego wartością równowagową - gdy w ośrodku fala się nie rozchodzi (Rys.3.). Tak rozumiana amplituda jest wyrażana w pascalach [Pa]. Gdy dysponujemy wykalibrowanym mikrofonem możliwe jest określenie amplitudy fali akustycznej za pomocą dołączonego do niego oscyloskopu. Amplituda ta jest zwykle znacznie mniejsza od 1Pa.

Dla sygnałów niesinusoidalnych, niesymetrycznych względem osi czasu pojęcie amplitudy musi zostać zastąpione pojęciem tzw. wartości skutecznej ciśnienia.



Rys.3. Amplituda i częstotliwość fali sinusoidalnej.

Długością (λ) fali akustycznej biegnącej w gazie nazwiemy odległość dwu najbliższych punktów w przestrzeni, w których ciśnienie gazu jest największe lub najmniejsze (Rys.1).

Częstotliwość f jest to ilość (n) pełnych okresów drgań ciśnienia rejestrowanych w czasie jednej sekundy. Wyrażamy ją w cyklach na sekundę lub hercach [Hz]. Jeśli czas t rejestracji ilości okresów n jest inny niż 1 sekunda, to $f = n/t$. W szczególności gdy znany jest czas T jednego drgania (okres drgań) i wyrażony jest on w sekundach to $f = 1/T$. W przykładzie przedstawionym na Rys.3 w czasie 1 sekundy występują cztery pełne okresy ($n=4$) o długości trwania $T=0,25s$, zatem $f = 1/0,25s = 4 [1/s] = 4Hz$.

TABELA 2. Jednostki pochodne częstotliwości

SKRÓT	NAZWA	WARTOŚĆ
kHz	kiloherc	1kHz=1000Hz
MHz	megaherc	1MHz=1000kHz=10 ⁶ Hz
GHz	gigaherc	1GHz=1000MHz=10 ⁹ Hz

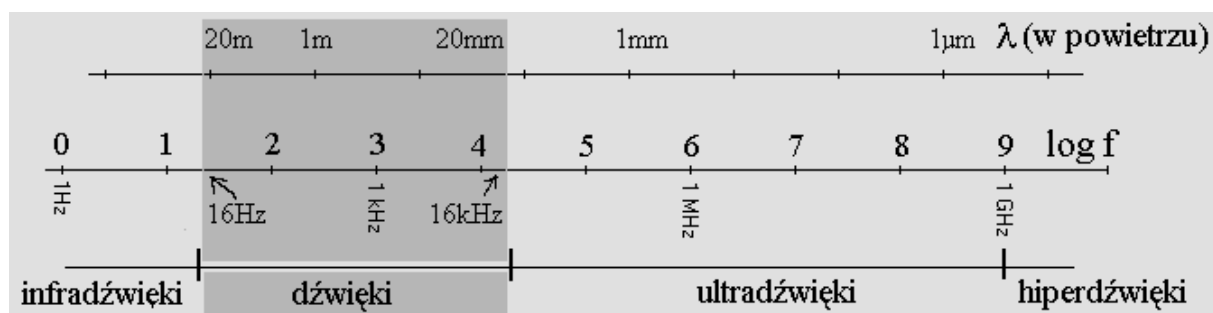
Częstotliwość zmierzyć można za pomocą: oscyloskopu, częstotliciomierzy cyfrowych lub mierników okresu T , które automatycznie obliczają częstotliwość korzystając ze związku: $f=1/T$.

Częstotliwościami harmonicznymi pewnej częstotliwości f_1 nazywamy jej całkowite wielokrotności: $2f_1$ (druga harmoniczna), $3f_1$ (trzecia harmoniczna), itd. Jeśli częstotliwość f_2 jest dwa razy większa od f_1 (tzn. $f_2/f_1=2$) to mówimy, że f_2 jest większa od f_1 o **oktawę**. Jeśli $f_2/f_1=10$ to mówimy, że f_2 jest większa od f_1 o **dekadę**.

4. Podział fal akustycznych

Fale akustyczne obejmują swoim zakresem około 10 dekad częstotliwości - od pojedynczych herców do gigaherców (10^9Hz). Górna granica częstotliwości wyznaczona jest przez odległości międzyatomowe (w ciałach stałych) lub przez średnie drogi swobodne (w gazach).

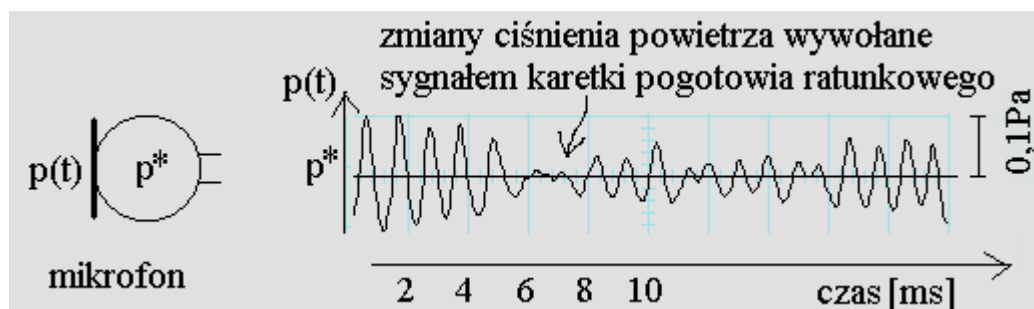
Ze względów historycznych ale i praktycznych fale akustyczne (ze względu na częstotliwość) dzielimy na: infradźwięki, dźwięki, ultradźwięki i hiperdźwięki. Dźwięki obejmują zakres trzech dekad częstotliwości od 16Hz do 16kHz (lub od 20Hz do 20kHz), co odpowiada długościom fal w powietrzu od około 20m do 20mm.



Rys.4. Podział fal akustycznych ze względu na częstotliwość.

5. Poziom ciśnienia akustycznego wyrażony w decybelach

Ciśnienie akustyczne p to wywołana obecnością fali nadwyżka lub niedobór ciśnienia nad ciśnieniem w ośrodku nie zaburzonym (p^*). Dzięki tej różnicy ciśnień poruszana jest membrana mikrofonu. Najśłabsze dźwięki słyszalne dla człowieka stanowią tzw. **próg słyszalności** (p_0). Dla częstotliwości 1kHz próg słyszalności wynosi $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{Pa}$.



Rys.5. Ciśnienie akustyczne w danym punkcie to różnica $p(t) - p^*$.

W badaniach dotyczących zmysłu słuchu oraz w przepisach dotyczących hałasu przyjęto porównywać wartość amplitudy (a raczej tzw. wartości skutecznej) ciśnienia akustycznego z progiem słyszalności i wyrażać jej wartość w jednostkach zwanych decybelami. **Poziom ciśnienia akustycznego** L_p wyrażony w decybelach [dB] definiuje następujące równanie:

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0} \quad [dB]$$

p –wartość skuteczna ciśnienia akustycznego w [Pa],

p_0 –wartość skuteczna ciśnienia akustycznego odniesienia równa $2 \cdot 10^{-5} \text{Pa} = 20 \mu\text{Pa}$.

TABELA 3. Przykładowe wartości ciśnienia akustycznego p oraz poziomu ciśnienia akustycznego L_p

p [Pa]	0,002	0,02	0,2	2
L_p [dB]	40	60	80	100
ŹRÓDŁO	cicha muzyka	restauracja	odkurzacz	młot pneumatyczny

Warto zapamiętać, że długotrwała ekspozycja na umiarkowany hałas ($L_p > 85 \text{dB}$) grozi trwałym, nieuleczalnym uszkodzeniem słuchu (tzw. **przewlekły uraz akustyczny**).

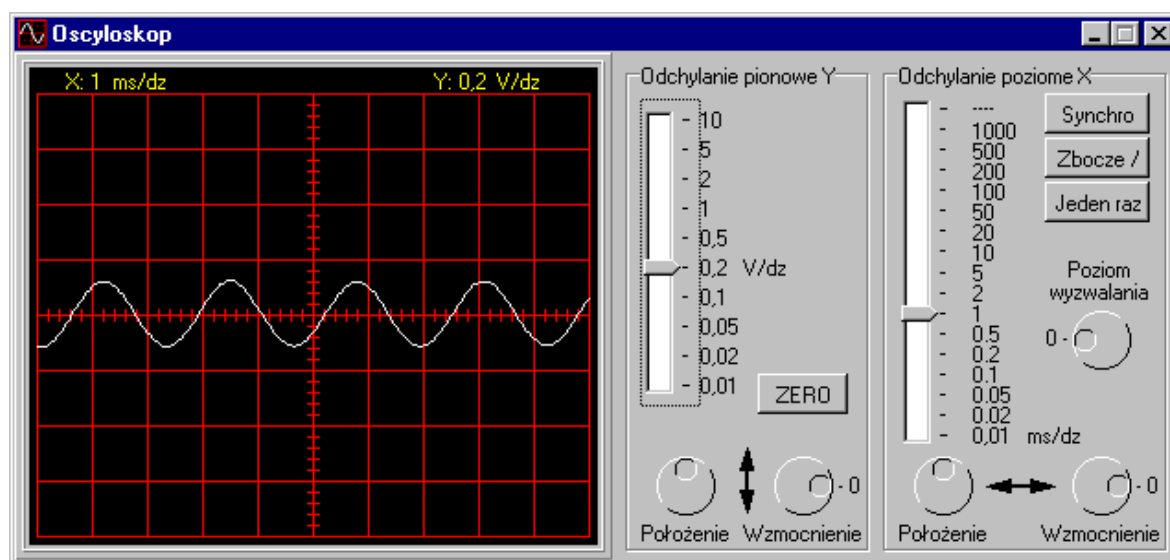
6. Subiektywne cechy dźwięku i ich odpowiedniki obiektywne

W mowie potocznej używamy szeregu słów do opisu wrażeń dźwiękowych. Mówimy o „głośności dźwięku”, jego „wysokości” i „barwie”. Niektóre dźwięki nazywamy „czystymi tonami” inne „szumami”. Problem odnalezienia obiektywnych, czyli możliwych do zmierzenia cech fal akustycznych związanych z tymi określeniami wchodzi w zakres psychoakustyki. **Psychoakustyka** to dziedzina wiedzy, której przedmiotem jest ustalenie zależności pomiędzy parametrami fizycznymi dźwięku a jego percepcją przez narząd słuchu.



Rys.6. Kamerton wytwarzający ton a' ($f=435\text{Hz}$). Są to metalowe widelki umieszczone na pudle rezonansowym. Dźwięk wzbudzany jest przez uderzenie specjalnym młotkiem

Do wytworzenia dźwięku określanego jako „ton” użyć można kamertonu (Rys. 6) uderzając jego „widelki”. Wykonując pomiar można przekonać się, że **ton** to dźwięk, któremu odpowiadają sinusoidalne zmiany ciśnienia akustycznego $p(t)$. W naszym ćwiczeniu do wytworzenia tonu używamy głośniczka ultradźwiękowego i elektronicznego generatora drgań sinusoidalnych.

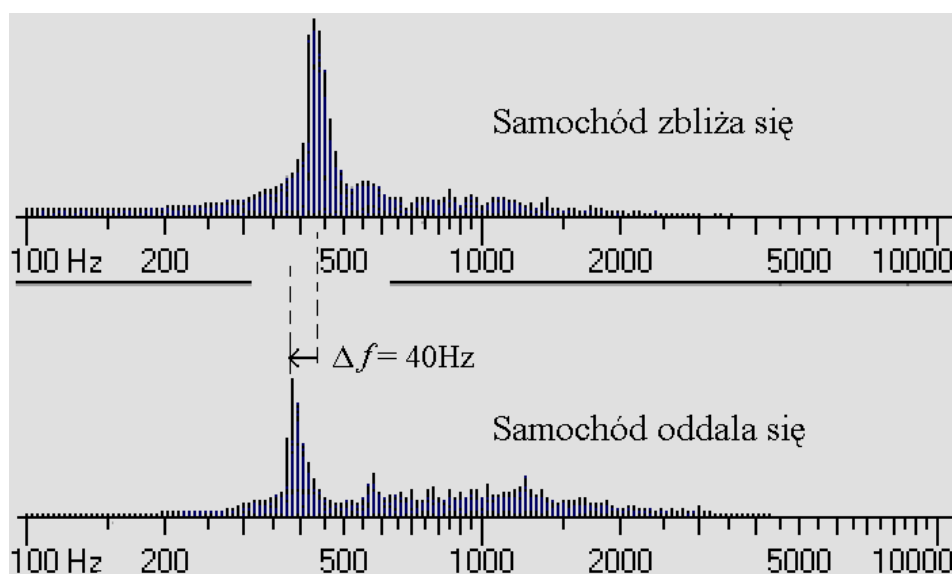


Rys.7. Zmierzony oscyloskopowo kształt sygnału dźwięku kamertonu a' .

Wrażenie „wysokości tonu” zależy od jego częstotliwości. Natomiast wrażenie głośności tonu zależy głównie od jego amplitudy i w pewnym stopniu od jego częstotliwości.

7. Efekt Dopplera

Efekt Dopplera (lub zjawisko Dopplera) w akustyce polega na zmianie obserwowanej częstotliwości fali gdy mamy do czynienia z ruchem źródła fali lub z ruchem jej odbiornika względem ośrodka przenoszącego dźwięk. Najłatwiej zaobserwować go stojąc w pobliżu jezdni, gdy mijający nas pojazd najpierw zbliża się, a następnie oddala. Gdy źródło fali zbliża się, to częstotliwość odbierana f' jest większa, a gdy oddala się jest mniejsza w porównaniu z częstotliwością f fali wysyłanej przez źródło nieruchome.



Rys.8. Dwa wykresy widma dźwięku ilustrujące, powodowane efektem Dopplera zmiany w tonie podstawowym dźwięku samochodu, który nas mija. Częstotliwość zmniejszyła się, a zaobserwowana w tym przykładzie zmiana częstotliwości sięgnęła około 10%.

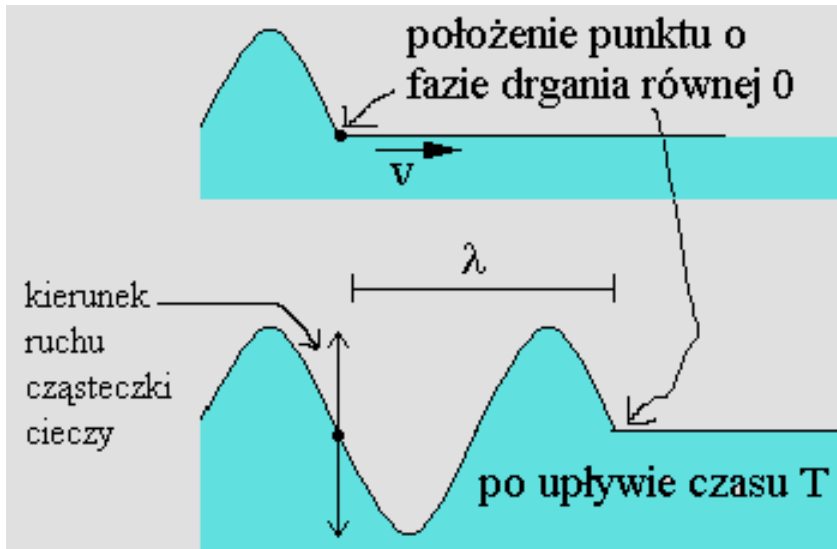
W przypadku niewielkich prędkości źródła, w porównaniu z prędkością dźwięku w powietrzu względna zmiana częstotliwości jest proporcjonalna do prędkości źródła i równa ilorazowi prędkości źródła przez prędkość dźwięku. W przykładzie przedstawionym na Rys.8 prędkość samochodu wynosiła 5% prędkości dźwięku w powietrzu, czyli około 15m/s.

Gdy mamy do czynienia z większymi prędkościami ruchu równania opisujące efekt Dopplera stają się bardziej złożone. Rozróżnić wtedy należy przypadek ruchomego źródła i przypadek ruchomego obserwatora. Dla przykładu - gdy zbliża się źródło, to częstotliwość odbierana f' jest większa i wynosi

$$f' = \frac{f}{\left(1 - \frac{u}{v}\right)}$$

v - prędkość dźwięku w powietrzu,
 u - prędkość źródła zbliżającego się,
 f - częstotliwość źródła.

8. Prędkość dźwięku



Rys.9. Wyjaśnienie definicji prędkości fali sinusoidalnej

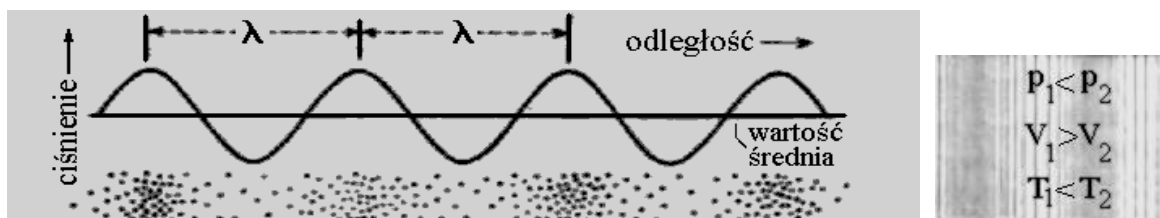
Fala w jednorodnym ośrodku porusza się ruchem jednostajnym. W okresie T punkt o stałej fazie drgania przebywa odległość równą długości fali λ . Zatem prędkość v tego punktu zwana **prędkością rozchodzenia się fali** jest równa:

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

Wartość prędkości rozchodzenia się fali zależy od własności ośrodka. Wynosi ona od około 50m/s w gumie, 330m/s w powietrzu, 1500m/s w wodzie do 5000m/s w stali. W przypadku gazów wartość prędkości fazowej zależy głównie od składu gazu i jego temperatury.

9. Prędkość dźwięku w gazach. Adiabatyczny model Newtona

Doświadczalnie wyznaczona prędkość dźwięku wynosi w warunkach normalnych ($T=0^\circ\text{C}$) 332m/s. Od samych początków powstania fizyki współczesnej (wiek XVII) starano się wyjaśnić ten wynik na drodze obliczeń teoretycznych.



Rys.10. Fala akustyczna w powietrzu. Przy amplitudzie zmian ciśnienia równej 0,1Pa amplituda zmian temperatury wynosi zaledwie około 0,0001°C

U podstaw modelu Newtona leżą założenia, że powietrze to gaz doskonały (spełnia równanie Clapeyrona $pV=nkT$) podlegający przemianom adiabatycznym (spełnia prawo Poissona $p_1V_1^\gamma=p_2V_2^\gamma$). Model adiabatyczny Newtona daje poprawny wynik obliczonej prędkości dźwięku w gazach. Ponadto model Newtona pozwala przewidzieć od czego ta prędkość zależy:

$$v_{adiabat} = \sqrt{\frac{\gamma kT}{M}} .$$

Wpływ na prędkość dźwięku mają: M - masa cząsteczkowa gazu (średnia), T - jego temperatura w skali Kelwina oraz współczynnik $\gamma = c_p/c_v$. (jest to iloraz ciepła właściwych $c_p/c_v = 1,40$ dla powietrza w warunkach normalnych). Wielkość k jest stała (tzw. stała Boltzmanna $k=1,38 \cdot 10^{23}$ J/K). Po podstawieniu odpowiednich wartości γ , k , M dla powietrza o standardowym składzie otrzymujemy:

$$v_{adiabat} = 331,29 \sqrt{1 + \frac{t}{273,15}} \text{ m/s}$$

gdzie t jest temperaturą w skali Celsjusza.

Dyspersja to zależność prędkości fazowej fali w ośrodku od jej częstotliwości. Powyższy model prędkości dźwięku nie przewiduje jakiegokolwiek zależności od częstotliwości. Dla wysokich częstotliwości ($f > 10$ MHz) taka zależność jednak istnieje. W pomiarze przeprowadzanym w naszej pracowni wykorzystujemy ultradźwięki o częstotliwości f około 40 kHz i model Newtona może być zastosowany.

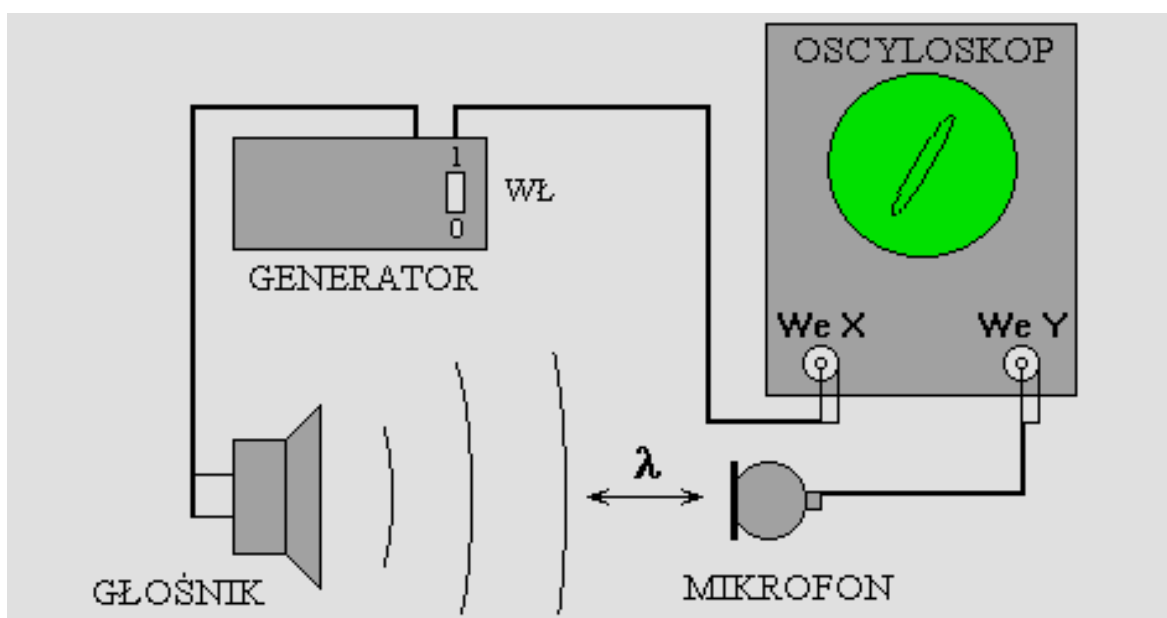
10. Zasada pomiaru prędkości dźwięku w gazach

Jeśli dysponujemy źródłem fali akustycznej o znanej i stałej częstotliwości f , to pomiar długości fali λ pozwala na wyznaczenie jej prędkości v wprost z definicji, ponieważ $T=1/f$. Pomiaru długości fali dźwiękowej λ w powietrzu można wykonać metodą rury Kundta. Dokładność takiego pomiaru wynosi około 10%. Dokładniejszą metodą pomiaru długości fali dźwiękowej (ok. 0,1%) jest metoda oscyloskopowa oparta na metodzie „krzywych Lissajous” (czytaj: Lisazu). Tę metodę użyjemy w naszym ćwiczeniu.

Czoło fali akustycznej w jednorodnym ośrodku porusza się ruchem jednostajnym. W okresie T punkt o zerowej fazie drgania przebywa odległość równą długości fali λ . Zatem prędkość tego punktu lub innego punktu o stałej fazie zwana **prędkością fazową** jest równa:

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

Źródłem fali akustycznej o znanej i stałej częstotliwości f jest generator elektroniczny sterujący głośnik. Dokładny pomiar długości fali λ możliwy jest do wykonania za pomocą oscyloskopu.



Rys.11. Pomiar długości fali dźwiękowej λ w powietrzu metodą oscyloskopową

Fala akustyczna biegnąca w powietrzu pomiędzy głośnikiem i mikrofonem do wejścia oscyloskopowego „We Y” dociera opóźniona w stosunku do sygnału elektrycznego biegnącego przewodem do wejścia oznaczonego „We X”. Dzięki temu na ekranie obserwujemy elipsę - jedną z tzw. *krzywych Lissajous* (czytaj: „Lisazu”). Jeśli mikrofon zaczniemy przesuwając to kształt elipsy zmieni się. Przy przesunięciu o odległość równą λ obraz na ekranie powróci do poprzedniego kształtu. Najwygodniej jest rozpocząć pomiary dla takiego ustawienia mikrofonu, dla którego elipsa staje się tak wąska, że widzimy ją w postaci ukośnego odcinka.

11. Krzywe Lissajous

Obserwowane podczas wykonywania doświadczenia na ekranie oscyloskopu elipsy i ukośnie położone odcinki są szczególnym przypadkiem *figur Lissajous* lub *krzywych Lissajous*¹. Powstają one, gdy punkt – w naszym przypadku plamka na ekranie oscyloskopu - podlega ruchom drgającym jednocześnie w dwu wzajemnie prostopadłych kierunkach „x” i „y” opisanym przez równania:

$$x(t) = A \cdot \sin(2\pi f_x t)$$

$$y(t) = B \cdot \sin(2\pi f_y t + \varphi)$$

gdzie A, B oznaczają amplitudy tych drgań, t - czas, f_x i f_y częstotliwości, φ – różnicę faz drgań. Dla powstania krzywych Lissajous spełnione muszą być ponadto pewne warunki dotyczące częstotliwości f_x i f_y tych drgań: $f_x=f_y$, $f_x=2f_y$, ogólnie $nf_x=mf_y$, gdzie n i m oznaczają niezbyt duże liczby naturalne. Innymi słowy iloraz f_x/f_y powinien być liczbą wymierną. W naszym ćwiczeniu $f_x=f_y$ czyli warunek ten jest spełniony.

LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA

D.Halliday, R.Resnick, Fizyka dla studentów nauk przyrodniczych i technicznych, T.1, PWN

Warszawa

M. Jeżewski, Fizyka ogólna T.2, §4. Drgania i fale. Akustyka. PZWS, W-wa 1973

S.Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, Tom 1

F.C.Crawford, Fale, PWN, Warszawa, s.174 (model Newtona)

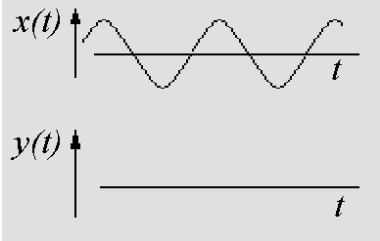
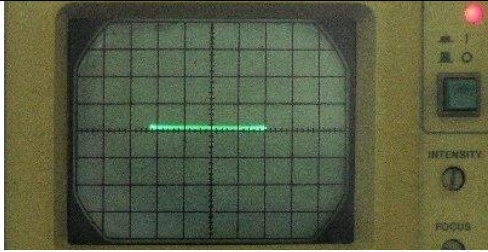
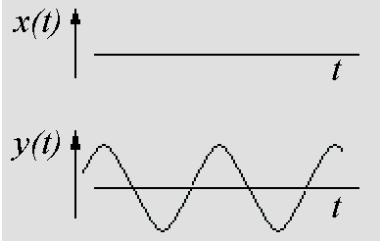
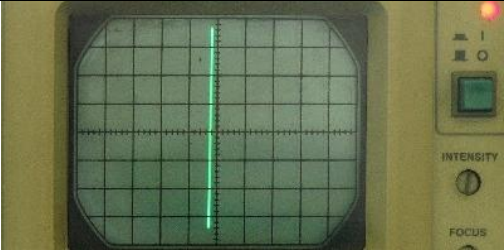
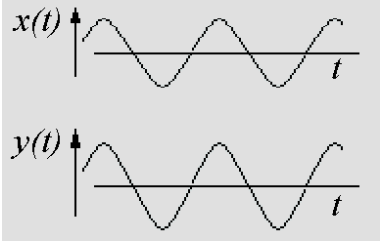
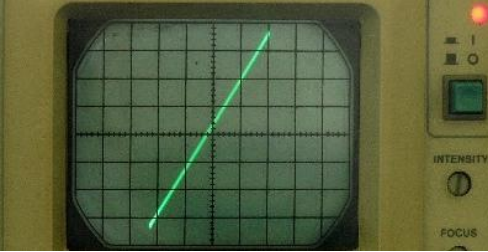
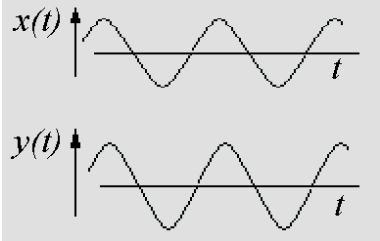
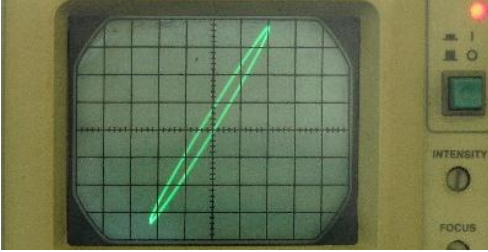
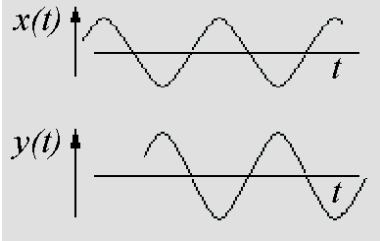
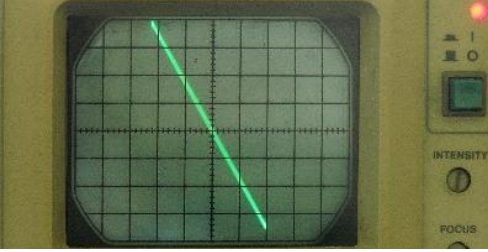
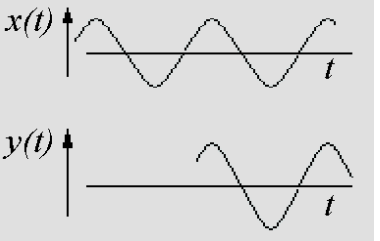
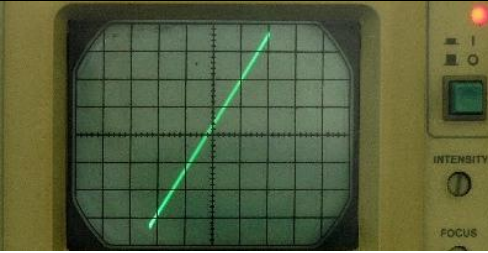
P.Turkowski, Pomiar prędkości dźwięku w powietrzu, Fizyka w szkole, 1/2001, s.28-31

Słownik fizyczny, WP, Warszawa 1984

¹ Czytaj „lisażu”. Nazwa upamiętnia nazwisko francuskiego fizyka (Jules Lissajous 1822-1880).

PRZYKŁADY KRZYWCH LISSAJOUS UZYSKANYCH DOŚWIADCZALNIE ($f_x=f_y$)

1. Obraz na ekranie oscyloskopu gdy plamka podlega drganiom w kierunku „x” zgodnie z równaniem: $x(t) = A \cdot \sin(2\pi f t)$. Drgania te wywołane są elektronicznie za pomocą generatora drgań sinusoidalnych dołączonego do oscyloskopu odcinkiem kabla koncentrycznego.
2. Obraz na ekranie oscyloskopu gdy plamka podlega drganiom w kierunku „y” zgodnie z równaniem: $y(t) = B \cdot \sin(2\pi f t + \varphi)$. Drgania te wywołane są falą ultradźwiękową, która biegnie w powietrzu pokonując pewną odległość pomiędzy głośniczkiem a mikrofonem.
3. Obraz na ekranie oscyloskopu gdy plamka podlega jednocześnie drganiom w kierunkach „x” i „y”, przy czym $\varphi=0$. Krzywa Lissajous jest odcinkiem nachylonym w stosunku do osi x pod kątem α , $\operatorname{tg}\alpha = B/A$.
4. Podobnie jak w poprzednim przykładzie plamka podlega jednocześnie drganiom w kierunkach „x” i „y”, jednak mikrofon odsunięty został od głośniczka o niewielką odległość (mniejszą niż 1mm). Odsunięcie spowodowało opóźnienie w czasie, w którym dźwięk wywołujący drgania w kierunku osi „y” dociera do głośniczka. Krzywa Lissajous na ekranie oscyloskopu nie jest już odcinkiem lecz wydłużoną elipsą, ponieważ $\varphi \neq 0$.
5. Plamka na ekranie podlega jednocześnie drganiom w kierunkach „x” i „y”. Mikrofon odsunięty został od głośniczka o odległość równą połowie długości fali w powietrzu ($\lambda/2$). Odsunięcie spowodowało przesunięcie faz sinusoid o 180 stopni ($\varphi=180^\circ$). Krzywa Lissajous jest ponownie odcinkiem.
6. Plamka na ekranie podlega jednocześnie drganiom w kierunkach „x” i „y”. Mikrofon odsunięty został od głośniczka o odległość równą długości fali w powietrzu (λ). Odsunięcie spowodowało przesunięcie faz sinusoid o 360 stopni ($\varphi=360^\circ$). Ponieważ $y(t)=B \cdot \sin(2\pi f_y t + 360^\circ) = B \cdot \sin(2\pi f_y t)$ obraz powraca do stanu z przykładu numer 3.

nr	Wykresy drgań	Obraz na ekranie oscyloskopu
1		
2		
	Wykresy drgań	Krzywa Lissajous
3		
4		
5		
6		

10 POMIAR PRĘDKOŚCI DŹWIĘKU W POWIETRZU

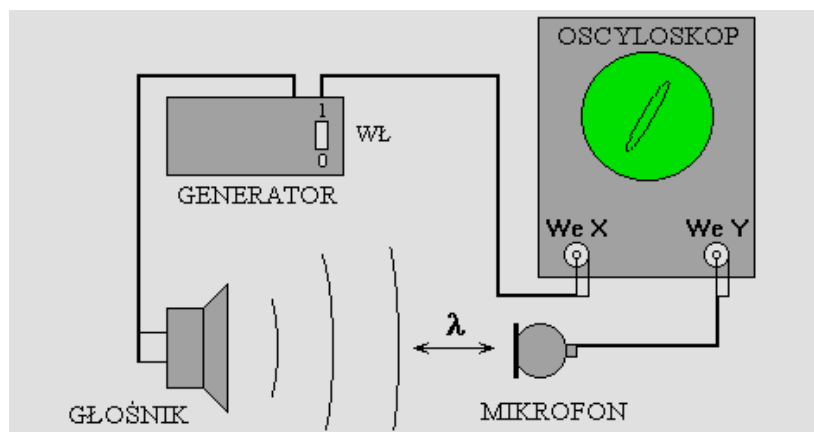
Aparatura: generator sinusoidalny, przetworniki ultradźwiękowe, oscyloskop, suwmiarka, termometr.

ZASADA POMIARU

Jeśli dysponujemy źródłem fali akustycznej o znanej i stałej częstotliwości f , to pomiar długości fali λ pozwala na wyznaczenie jej prędkości v zwanej prędkością fazową:

$$v = \lambda \cdot f$$

Dokładny pomiar długości fali λ możliwy jest do wykonania za pomocą suwmiarki z zastosowaniem generatora drgań sinusoidalnych, głośniczka, mikrofonu oraz oscyloskopu.



Rys. Pomiar długości fali dźwiękowej λ w powietrzu metodą oscyloskopową

Fala akustyczna biegnąca w powietrzu pomiędzy głośnikiem i mikrofonem do wejścia oscyloskopowego „We Y” dociera opóźniona w stosunku do sygnału elektrycznego biegnącego przewodem do wejścia oznaczonego „We X”. Dzięki temu na ekranie obserwujemy elipsę - jedną z tzw. *krzywych Lissajous* (czytaj: „Lisazu”). Jeśli mikrofon zaczniemy przesuwając to kształt elipsy zmienia się. Przy przesunięciu o odległość równą λ obraz na ekranie powróci do poprzedniego kształtu. Najwygodniej jest rozpocząć pomiary dla takiego ustawienia mikrofonu, dla którego elipsa staje się tak wąska, że widzimy ją w postaci ukośnego odcinka.

CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie prędkości ultradźwięku w powietrzu i porównanie wyniku z przewidywaniami modelu Newtona.

WYKONANIE ĆWICZENIA

W pomiarze posłużymy się precyzyjną ławą pomiarową. Na jednym z jej końców został zamocowany głośniczek ultradźwiękowy zasilany z generatora sinusoidalnego o częstotliwości około 40kHz. Ultradźwięki o tej częstotliwości nie są słyszalne przez człowieka. Na przesuwanym elemencie ławy zamocowano mikrofon ultradźwiękowy. Pokrętko przesuwu znajduje się po prawej stronie ławy.

1. Włączyć zasilanie generatora i oscyloskopu.
2. Odległość głośniczek-mikrofon można regulować pokrętkiem umieszczonym na końcu ławy pomiarowej po prawej jej stronie. Regulując tę odległość uzyskać na ekranie obraz ukośnego położonego odcinka (pochyłego np. w prawo).
3. Posługując się suwmiarką zmierzyć odległość pomiędzy punktami pomiarowymi oznaczonymi czerwonymi strzałkami i zanotować w tabelce (x_0). Przyjmujemy niepewność pomiarową $\Delta_d x_0 = 0.1\text{mm}$.

4. Obracając pokrętko w kierunku przeciwnym do kierunku ruchu wskazówek zegara przybliżyć mikrofon do głośniczka tak by ponownie uzyskać na ekranie obraz ukośnie położonego odcinka (pochyłego w prawo). Odległość pomiędzy punktami pomiarowymi wzrosła o λ . Zmierzyć suwmiarką odległość x_1 i zapisać wraz z numerem pomiaru ($n=1$). Dla zwiększenia dokładności pomiaru λ należy kontynuować oddalanie mikrofonu zliczając liczbę (n) przebytych odcinków o długości λ i zapisując wyniki pomiarów x_2, x_3 , itd. aż do osiągnięcia $n=10$.
5. Zanotować temperaturę powietrza t oraz maksymalną niepewność pomiarową $\Delta_d t$.
6. Powtórzyć pomiar według punktu 4 oddalając mikrofon od głośnika. W tym celu pokrętko obracamy w kierunku ruchu wskazówek zegara. Wyniki pomiarów x_9, x_8 , notować w tabelce 2 aż do osiągnięcia $n=0$. Wyniki powinny być zbliżone (w granicach 1mm) do zapisanych w tabeli 1.

Tab.1. Pomiar długości fali ultradźwiękowej (λ)

Nr pomiaru (n)	Położenie mikrofonu [mm]
0	$x_0 =$
1	$x_1 =$
.....
10	$x_{10} =$

Tab.2.

Nr pomiaru (n)	Położenie mikrofonu [mm]
10	$x_{10} =$
9	$x_9 =$
.....
0	$x_0 =$

OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Obliczyć długość fali ultradźwiękowej w powietrzu posługując się wynikami pomiarów skrajnych położenia mikrofonu zapisanymi w Tabeli 1: $\lambda = (x_{10} - x_0)/10$. Obliczyć wartości prędkości dźwięku (v) zgodnie z równaniem $v=\lambda \cdot f$. Częstotliwość generatora $f = 40324\text{Hz}$, $\Delta_d f = 3\text{Hz}$.
2. W oparciu o wykonany uprzednio pomiar temperatury powietrza $t[^\circ\text{C}]$ obliczyć prędkość dźwięku przewidywaną modelem Newtona zgodnie z półempirycznym wzorem:

$$v = 331.29 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

3. Obliczyć niepewności standardowe pomiarów długości fali ultradźwiękowej λ oraz częstotliwości f :

$$u(\lambda) = \frac{1}{10} \sqrt{\frac{(\Delta_d x_{10})^2}{3} + \frac{(\Delta_d x_0)^2}{3}}, \quad u(f) = \frac{\Delta_d f}{\sqrt{3}}. \quad \text{Przyjmujemy } \Delta_d x_0 = \Delta_d x_{10} = 0.1\text{mm}.$$

4. Obliczyć niepewność standardową $u(v)$ pomiaru prędkości dźwięku. W tym celu do równania $v=\lambda \cdot f$ stosujemy wzór (12)* i przyjmujemy że v jest funkcją dwu zmiennych λ oraz f .
5. Obliczyć niepewność rozszerzoną pomiaru prędkości dźwięku $U(v)=k \cdot u(v)$ przyjmując $k=2$.
6. Zapisać wynik końcowy pomiaru wraz z niepewnością rozszerzoną.
7. Obliczyć niepewność standardową $u(t)$ pomiaru temperatury powietrza t :

$$u(t) = \frac{\Delta_d t}{\sqrt{3}}.$$

8. Obliczyć niepewność standardową $u(v)$ prędkości dźwięku przewidywanej przez model Newtona zgodnie ze wzorem (9)*, który dla jednej zmiennej t przyjmuje uproszczoną postać:

$$u(v) = \left| \frac{\partial v}{\partial t} \right| u(t),$$

gdzie symbol $\frac{\partial v}{\partial t}$ oznacza pochodną funkcji danej równaniem $v = 331.29 \sqrt{1 + \frac{t}{273.15}}$ po zmiennej t .

9. Obliczyć niepewność rozszerzoną pomiaru prędkości dźwięku $U(v)=k \cdot u(v)$ przyjmując $k=2$.
10. Zapisać wynik końcowy pomiaru wraz z niepewnością rozszerzoną.

Wzory ()* patrz „Wprowadzenie do metod opracowywania wyników pomiarowych”.