

Akustyczny efekt Dopplera

1. Zagadnienia do opracowania:

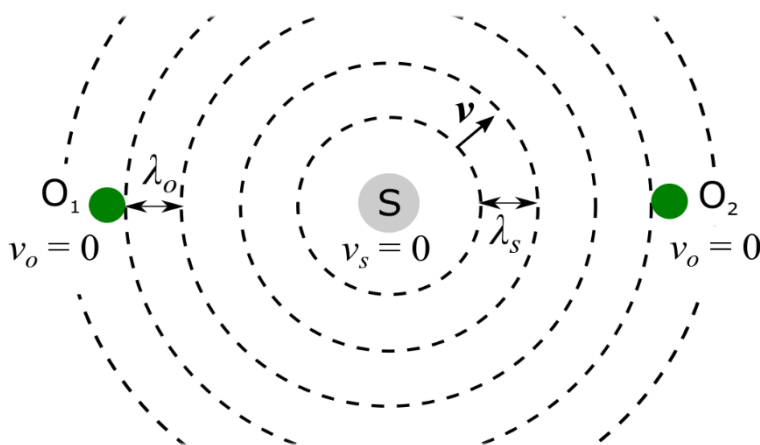
1. Fale sprężyste - równanie fali i podstawowe wielkości charakteryzujące ruch falowy.
2. Zjawiska towarzyszące propagacji fali dźwiękowej - odbicie, załamanie i pochłanianie.
3. Zjawisko Dopplera.

Literatura

1. D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Podstawy fizyki, t. 2, PWN, Warszawa 2006, str. 173-177.
2. William Moebis, i in., Fizyka dla szkół wyższych, t. 1, Open Stax Polska 2018, str. 898-905.
3. J. Massalski, M. Massalska, Fizyka dla inżynierów, t. 1, PWN, Warszawa 2018, str. 223-226.

2. Wprowadzenie

Zmiana częstotliwości sygnału odbieranego przez obserwatora, którego mija karetka pogotowia, jest typowym przykładem zjawiska Dopplera. Pierwszy raz zjawisko, to przewidział w 1842 austriacki fizyk Johan Christian Doppler, co później, w roku 1845 w Holandii zostało potwierdzone doświadczalnie przez Buysa Ballota. Należy wspomnieć, że zjawisko Dopplera zachodzi również dla fal elektromagnetycznych, co znalazło zastosowanie między innymi w astronomii, do wyznaczania prędkości obiektów astronomicznych względem Ziemi. Jednak znacznie prościej jest zademonstrować i wyjaśnić efekt Dopplera na przykładzie fal sprężystych. Fizykę zjawiska Dopplera można dobrze zobrazować na podstawie rysunku 1, gdzie po dwóch stronach źródła dźwięku S znajduje się dwóch obserwatorów oznaczonych jako O_1 oraz O_2 .



Rys. 1. Stacjonarne źródło dźwięku S i obserwatorzy O_1 i O_2 .

Źródło dźwięku S emituje sferyczne fale o długości λ_s , które rozchodzą się we wszystkich kierunkach (sferycznie) z prędkością v . Należy zaznaczyć, że długość fal λ_s emitowanych przez źródło oraz ich częstotliwość f_s , nie zmieniają się. Jeśli obserwatorzy i źródło dźwięku znajdują się w spoczynku ($v_{ob} = v_s = 0$), to obaj obserwatorzy odbierają dźwięk o tej samej częstotliwości (długości fali) jaka została wygenerowana przez źródło (generator). Wówczas długość fali λ_0 odbieranej przez nieruchomych obserwatorów, można opisać następującym równaniem:

$$\lambda_o = \frac{v}{f_o} \quad (1)$$

gdzie, v to prędkość dźwięku a $f_o = \frac{1}{T}$ to częstotliwość dźwięku rejestrowanego przez odbiorcę.

Przyjmijmy, że źródło dźwięku porusza się w kierunku obserwatora O_2 z prędkością v_s , to droga jaką przebędzie w czasie równym okresowi T będzie równa:

$$s = v_s \cdot T \quad (2)$$

Poruszając się z prędkością v_s , źródło dźwięku emituje falę sferyczną w taki sposób jak pokazano na rysunku, więc odległość między sąsiednimi zaburzeniami, a tym samym długość fali jaka dociera do obserwatora O_2 będzie odpowiednio krótsza, czyli pomniejszona od drogi jaką przebędzie źródło, co zapisujemy następująco:

$$\lambda_o = v \cdot T - v_s \cdot T \quad (3)$$

Dla obserwatora O_1 , od którego źródło dźwięku się oddala powyższe równanie, będzie zmodyfikowane:

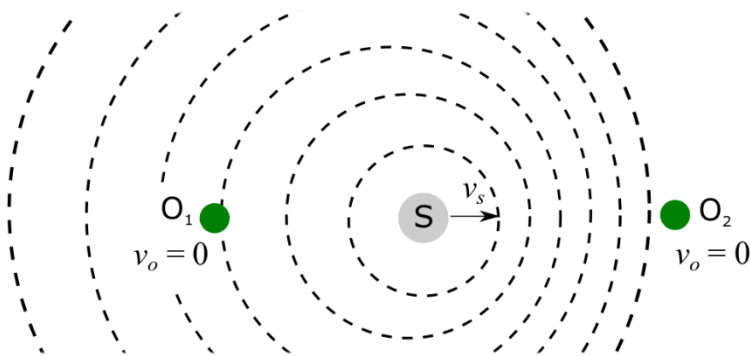
$$\lambda_o = v \cdot T + v_s \cdot T \quad (4)$$

Analizując równania (3) i (4) łatwo zauważyć, że długość fali odbieranej przez obserwatora O_1 jest większa niż długość fali emitowana przez poruszające się źródło. Obserwator O_2 , do którego źródło dźwięku się zbliża, będzie odbierał falę o mniejszej długości.

Bazując na wcześniejszych wnioskach możemy napisać ogólne wyrażenie na częstotliwość fali docierającej do obserwatora:

$$f_o = f_s \left(\frac{v}{v \mp v_s} \right) \quad (5)$$

gdzie znak (+) oznacza źródło oddalające się od obserwatora O_2 , czyli w tym przypadku częstotliwość dźwięku słyszana przez obserwatora jest mniejsza od częstotliwości dźwięku, który emituje źródło. Znak (−) oznacza, że źródło dźwięku zbliża się do obserwatora (O_2), czyli obserwator słyszy dźwięk o wyższej częstotliwości niż został wyemitowany przez źródło.



Rys. 2. Źródło dźwięku przemieszczające się z prędkością v_s w kierunku obserwatora O_2 .

Analogiczne rozumowanie można przeprowadzić w przypadku, gdy źródło dźwięku znajduje się w spoczynku, a obserwator porusza się z prędkością v_o . Jeśli przyjmijmy, że obserwator porusza się w kierunku źródła, czas między kolejnymi czołami fali, jakie zarejestruje obserwator, będzie krótszy niż okres dźwięku emitowanego przez źródło, a tym samym obserwator zarejestruje dźwięk o częstotliwości wyższej niż f_s . W przypadku, gdy obserwator oddala się od źródła dźwięku, to czas, jaki potrzebuje na pokonanie odległości między dwoma sąsiednimi czołami fali jest większy od okresu

dźwięku emitowanego przez źródło, a tym samym dźwięk przez niego rejestrowany ma mniejszą częstotliwość.

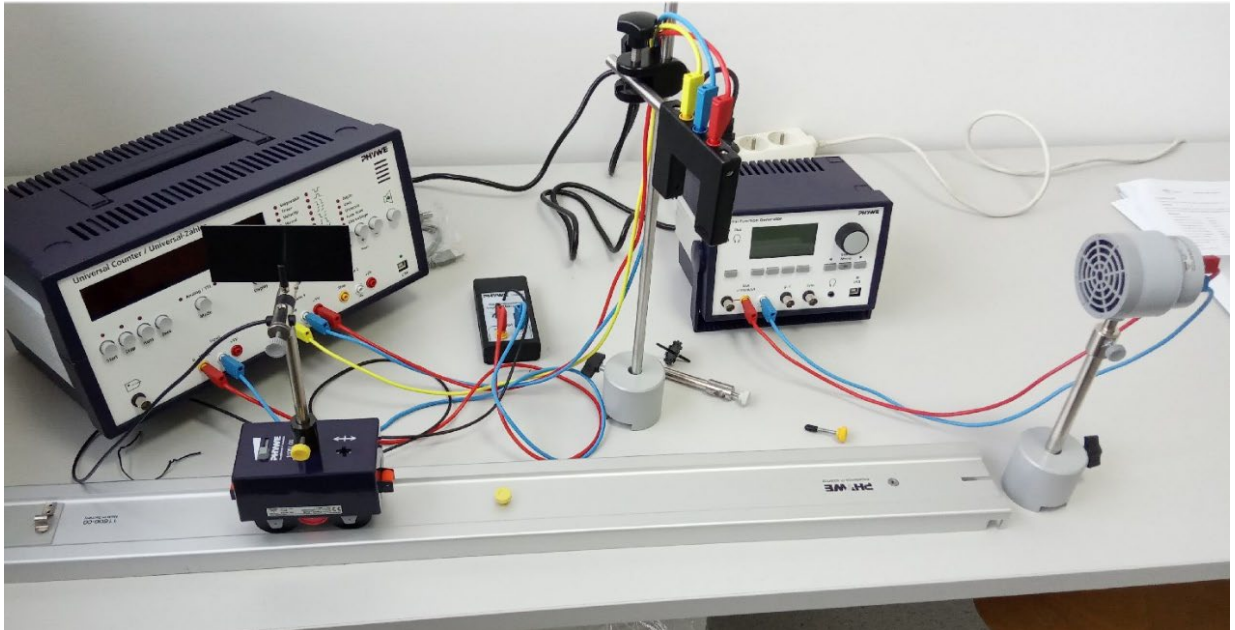
Wyrażenie opisujące częstotliwość f_o odbieraną przez obserwatora, który się zbliża lub oddala od źródła dźwięku, można opisać jednym równaniem:

$$f_o = f_s \left(\frac{v \pm v_o}{v} \right) \quad (6)$$

Znak (+) dotyczy sytuacji, gdy odbiorca zbliża się do źródła dźwięku, natomiast znak (-), gdy odbiorca oddala się od źródła dźwięku.

3. Metodologia wykonania pomiarów

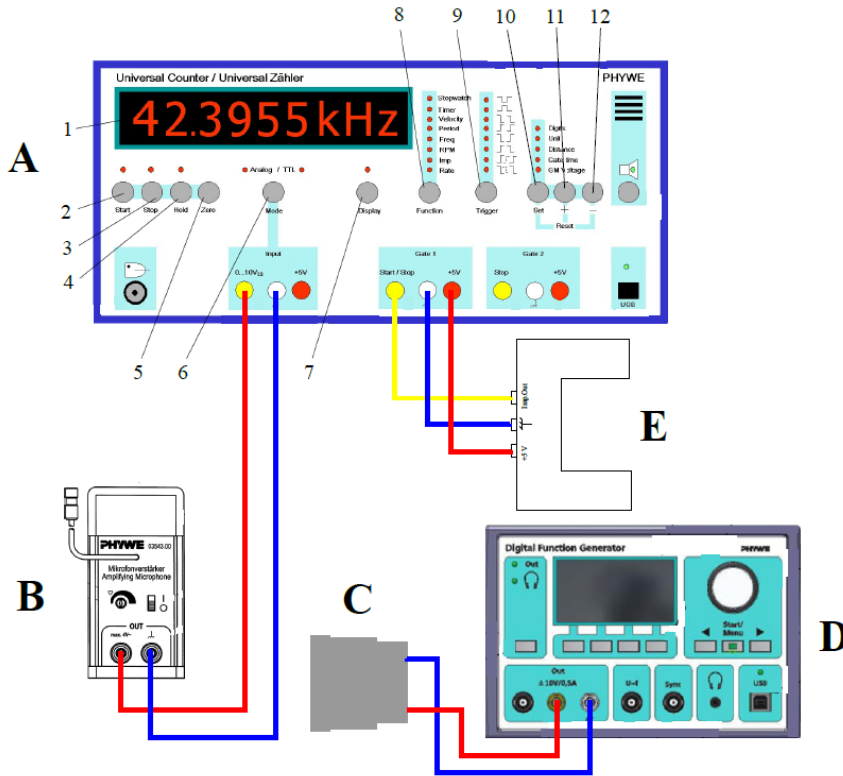
1. Sprawdzić kompletność zestawu przedstawionego na rysunku 3 oraz zidentyfikować wszystkie jego elementy.



Rys. 3. Poruszający się detektor i nieruchome źródło dźwięku.

2. Zamocować mikrofon na wózku jeżdżym w taki sposób, aby mikrofon i głośnik znajdowały się na tej samej wysokości.
3. Źródło dźwięku podłączyć do generatora. Mikrofon i bramkę świetlną podłączyć do licznika uniwersalnego, tak jak pokazano na rysunku 4.
4. Wyznaczyć prędkość wózka poruszającego się w kierunku głośnika. W tym celu ustawić licznik uniwersalny (Rys. 4) w następujący sposób:
 - za pomocą przycisku (8) ustawić licznik na pomiar prędkości: "Velocity",
 - tryb działania fotobramki: \square , \square ,
 - używając przycisków (10), (11) i (12), wprowadzić wymiary przesłony (opcja: „Distance”).
5. Dla zadanej prędkości, pomiar powtórzyć dziesięć razy i wyznaczyć prędkość średnią.
6. Uruchomić generator cyfrowy, wybrać sygnał sinusoidalny z amplitudą 1 V.
7. Zmienić przyciskiem (8) ustawienia licznika uniwersalnego na pomiary częstotliwości „Frequency” a przyciskiem (6) ustawić odpowiednio typ sygnału wejściowego „Analog”.

8. Przyciski (2) i (3) zatrzymują pomiar natomiast, przycisk „Hold” ustala wartość zmierzoną podczas przechodzenia przez bramkę świetlną.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego z zaznaczonymi elementami: A) Licznik uniwersalny, B) Mikrofon ze wzmacniaczem, C) Głośnik, D) Generator cyfrowy, E) Bramka świetlna oraz opis wybranych funkcji licznika uniwersalnego: 1) Wyświetlacz cyfrowy, 2) Przycisk „Start”, 3) Przycisk „Stop”, 4) Zatrzymanie wyniku, 5) Zerowanie licznika, 6) Wybór rodzaju sygnału wejściowego, 7) Wyświetlanie danych zapisanych po zakończonym pomiarze, 8) Wybór trybu pracy licznika, 9) Wybór trybu działania bramki świetlnej.

między 0,06 m/s a 1,6 m/s. Wszystkie uzyskane wyniki zamieścić w tabeli.

12. Takie same pomiary wykonać, gdy detektor zbliża się do źródła dźwięku.

9. Przed przystąpieniem do pomiarów częstotliwości sprawdzić, czy wzmacnienie mikrofonu jest ustawione prawidłowo. W tym celu należy nieruchomy wózek ustawić w trzech różnych punktach na torze jezdnym i odczytać wartość częstotliwości z licznika uniwersalnego. Jeśli odczytana wartość częstotliwości odbiega od częstotliwości zadanej na generatorze oraz znacząco się zmienia wraz z odległością mikrofonu od głośnika, to należy dostroić mikrofon za pomocą przedwzmacniacza, tak aby zminimalizować taki efekt.

10. Pomiary częstotliwości wykonać dla 5 różnych częstotliwości z przedziału między 5 kHz a 10 kHz. Najpierw wykonać pomiar częstotliwości f_s , gdy wózek znajduje się w spoczynku, następnie w trakcie ruchu wózka, dla każdej zadanej częstotliwości pomiar powtórzyć 5 razy.

11. Punkty 4-9 wykonać dla trzech różnych prędkości wózka

Tabela pomiarowa

$\bar{v}_0 \pm u(\bar{v}_0)$	v	$f_s \pm u(f_s)$	$f_0 \pm u(f_0)$	$f'_0 \pm u(f'_0)$	$\Delta f_0 \pm u(\Delta f_0)$
[m/s]	[m/s]	[kHz]	[kHz]	[kHz]	[Hz]
	340				

4. Obliczenia

1. Wyznaczyć prędkości średnie wózka \bar{v}_0 oraz niepewności $u(\bar{v}_0)$ metodą typu A.
2. Wyznaczyć niepewność częstotliwości f_S metodą typu B oraz f_0 metodą typu A.
3. Przyjmując prędkość dźwięku $v = 340$ m/s oraz podstawiając do wzoru (6) zmierzone wartości f_S i \bar{v}_0 , obliczyć f'_0 oraz jej niepewność $u(f'_0)$. Porównać wartości obliczone i zmierzone.
4. Obliczyć przesunięcie Dopplera $\Delta f = f_0 - f_S$ dla wszystkich zmierzonych wartości. Niepewność $u(\Delta f)$ wyznaczyć z prawa przenoszenia niepewności.
5. Narysować wykresy zależności $\Delta f(f_S)$, dla poszczególnych prędkości wózka. Na wykresie zaznaczyć niepewności $u(\Delta f)$ i $u(f_S)$.