

# Lekcja 3

## Ruch falowy

### Cel

- Przedstawienie podstawowych pojęć dotyczących ruchu falowego.

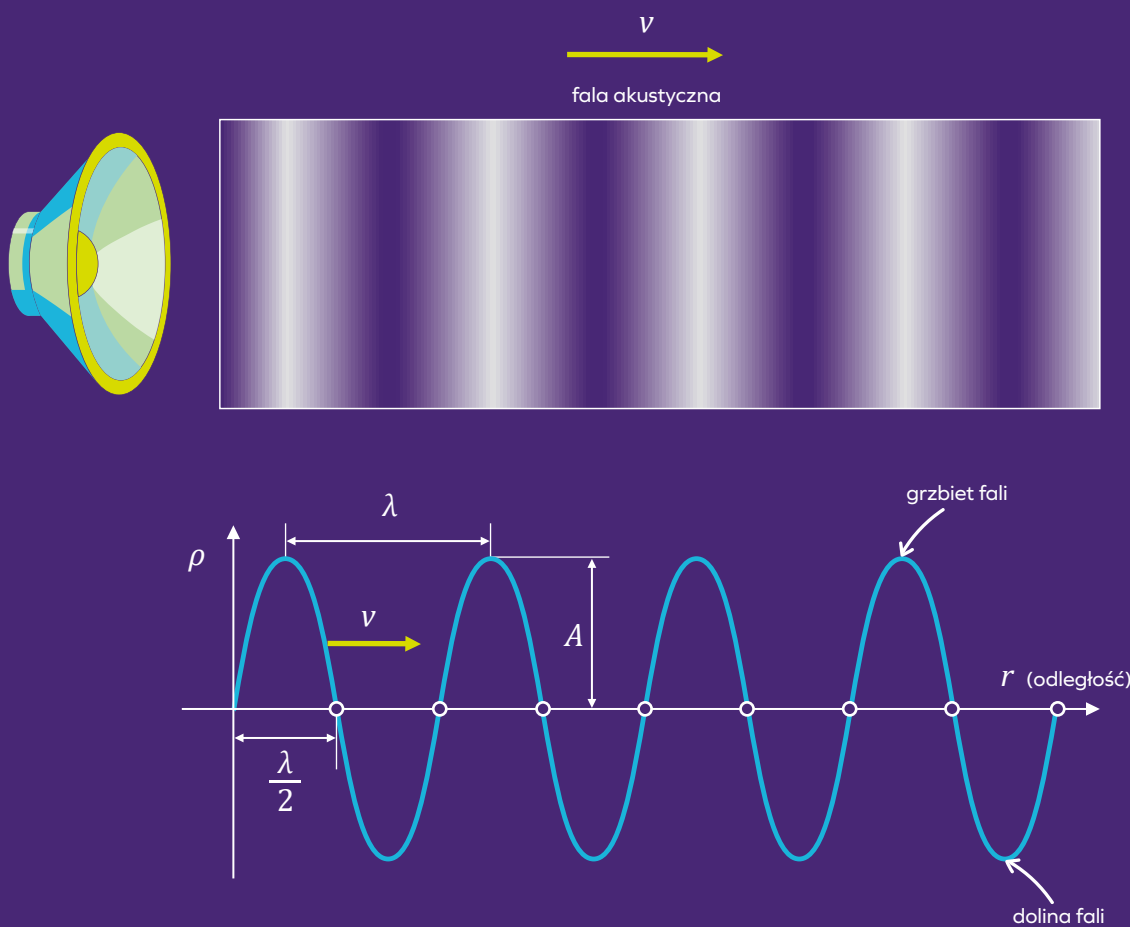
### Efekty kształcenia

- Uczeń potrafi wymienić główne wielkości opisujące falę harmoniczną.
- Uczeń zna zależności wiążące wielkości opisujące falę harmoniczną i potrafi je wykorzystać w praktyce.
- Uczeń potrafi wskazać związek między falą harmoniczną a ruchem punktu po okręgu.
- Uczeń potrafi obliczyć minimalny rozmiar anteny, przy którym można osiągnąć efektywną energetycznie transmisję sygnału elektromagnetycznego.



## 1. Fala harmoniczna i jej cechy charakterystyczne

Przez **ruch falowy** rozumiemy rozchodzące się zaburzenie pewnego ośrodka sprężystego lub pola fizycznego. Jako przykłady ruchu falowego często przywołuje się fale na wodzie lub dźwięk, tzn. falę akustyczną. Fala elektromagnetyczna, którą wprowadziliśmy w Lekcji 2, nie wymaga materialnego ośrodka – to zaburzenie pola elektromagnetycznego obecnego nawet w próżni.



**Rys. 1.** Ruch falowy na przykładzie fali akustycznej. Główne parametry fali harmonicznej.

**Fala akustyczna** jest ciągiem zagęszczeń i rozrzedzeń powietrza. Może być generowana przez poruszającą się ruchem drgającym membranę głośnika. Membrana porusza się tak szybko, że powietrze w jej najbliższym sąsiedztwie nie zostaje od razu odepchnięte (jak np. w przypadku machnięcia ręką) lecz ulega sprężeniu – jego gęstość rośnie powyżej średniej gęstości powietrza. Dopiero po chwili sprężone powietrze popycha dalej położone warstwy powietrza także prowadząc do ich sprężenia. W tym czasie membrana

głośnika cofa się prowadząc do powstania strefy rozrzedzonego powietrza. Zaburzenie zaczyna propagować zachowując podobny wzorec zagęszczenia/rozrzedzenia nawet daleko od źródła. Jeżeli głośnik emituje tzw. ton czysty (o jednej częstotliwości), powstająca fala ma charakter tzw. fali harmonicznej (zobacz Rys. 1, gdzie różne stopnie zacinienia odpowiadają różnej gęstości powietrza).

Przyjmijmy dla uproszczenia, że jest to fala płaska (tzn. miejsca o danej gęstości są równoległymi płaszczyznami) oraz energia fali nie jest rozpraszana. Dzięki temu wielkość zaburzeń będzie taka sama nawet w oddaleniu od źródła. Przyjrzyjmy się cechom charakterystycznym fali harmonicznej.

Jeżeli wykonamy wykres gęstości powietrza  $\rho$  w zależności od odległości  $r$  od źródła otrzymamy regularny ciąg **grzbietów** oraz **dolin** fali – tzn. miejsc o odpowiednio największej i najmniejszej gęstości powietrza (Rys. 1). W przypadku ogólnego ruchu falowego grzbiety i doliny związane są ze skrajnymi odchyleniami ośrodka (lub pola) od stanu równowagi. Np. dla fali na wodzie grzbiet to najwyższe położenie powierzchni wody, zaś dolina – najniższe.

Odległość między kolejnymi grzbietami (lub dolinami) fali nazywamy **długością fali** i oznaczamy przez  $\lambda$ . Wielkość zaburzenia mierzoną od położenia równowagi do maksymalnego odchylenia od równowagi nazywamy **amplitudą** i oznaczamy przez  $A$  (zauważ, że nie chodzi o odstęp między grzbietem a doliną – ten odstęp jest równy podwojonej amplitudzie). **Prędkość** przemieszczania się fali oznaczamy przez  $v$ . Dla dźwięku w powietrzu wynosi ona ok. 340 m/s.

Jak powiedzieliśmy, fala jest zaburzeniem rozchodzącym się w przestrzeni. Jeżeli jednak wybierzemy jeden, konkretny punkt w przestrzeni i będziemy obserwować zachowanie się ośrodka (lub pola) w czasie, kiedy przechodzi przez niego fala, dostrzeżemy po prostu ruch drgający. Tzn. zamiast wykonywać wykres jak na Rys. 1 w przestrzeni (w zależności od  $r$ ), możemy wykonać analogiczny wykres w czasie (w zależności od  $t$ ). Możemy wtedy zapytać jak długo trwa pełen cykl drgania ośrodka (lub pola), czyli czas pomiędzy przejściem dwóch kolejnych grzbietów fali. Czas ten nazywamy **okresem** i oznaczamy przez  $T$ . Liczbę cykli drgania w ciągu 1 s nazywamy **częstotliwością** i oznaczamy przez  $f$ . Częstotliwość podajemy zazwyczaj w hercach – Hz (1 Hz jest odwrotnością 1 sekundy).

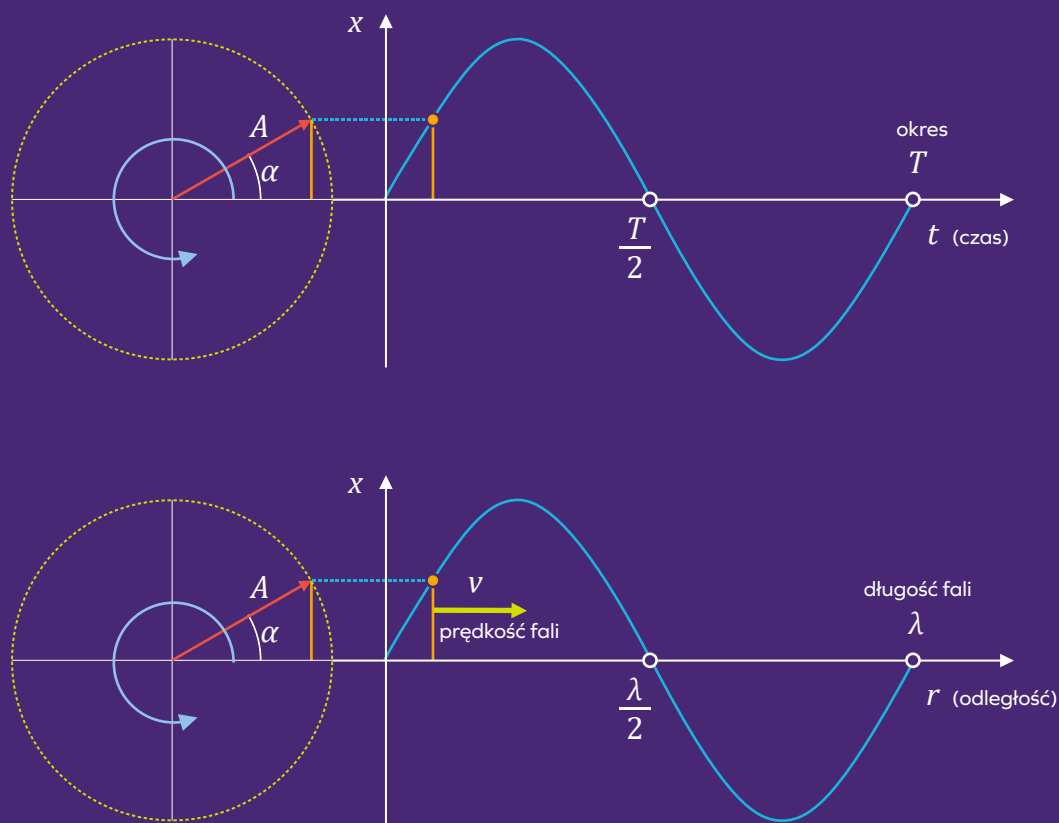
Istnieje bardzo prosta zależność pomiędzy okresem i częstotliwością:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]}$$

$$1 \text{ Hz} = \frac{1}{1 \text{ s}}$$

## 2. Fala harmoniczna jako obraz ruchu po okręgu

Zauważmy, że tak naprawdę nie powiedzieliśmy jeszcze, czym dokładnie jest fala harmoniczna. Istnieje bardzo ścisły związek pomiędzy falą tego typu i ruchem jednostajnym po okręgu.



**Rys. 2.** Fala harmoniczna jako obraz ruchu punktu po okręgu.

Wyobraźmy sobie okrąg o promieniu równym amplitudzie  $A$  fali oraz punkt poruszający się po tym okręgu ruchem jednostajnym tak, że pokonuje on całą długość okręgu w ciągu okresu  $T$  (Rys. 2). Wysokość punktu nad wybraną średnicą okręgu (tutaj — poziomą) będziemy nanosić na wykres w zależności od czasu. W efekcie odtworzymy przebieg, który dokładnie odpowiada jednemu okresowi drgania harmonicznego. Kilka etapów ruchu po okręgu pokazano bardziej szczegółowo na Rys. 3.

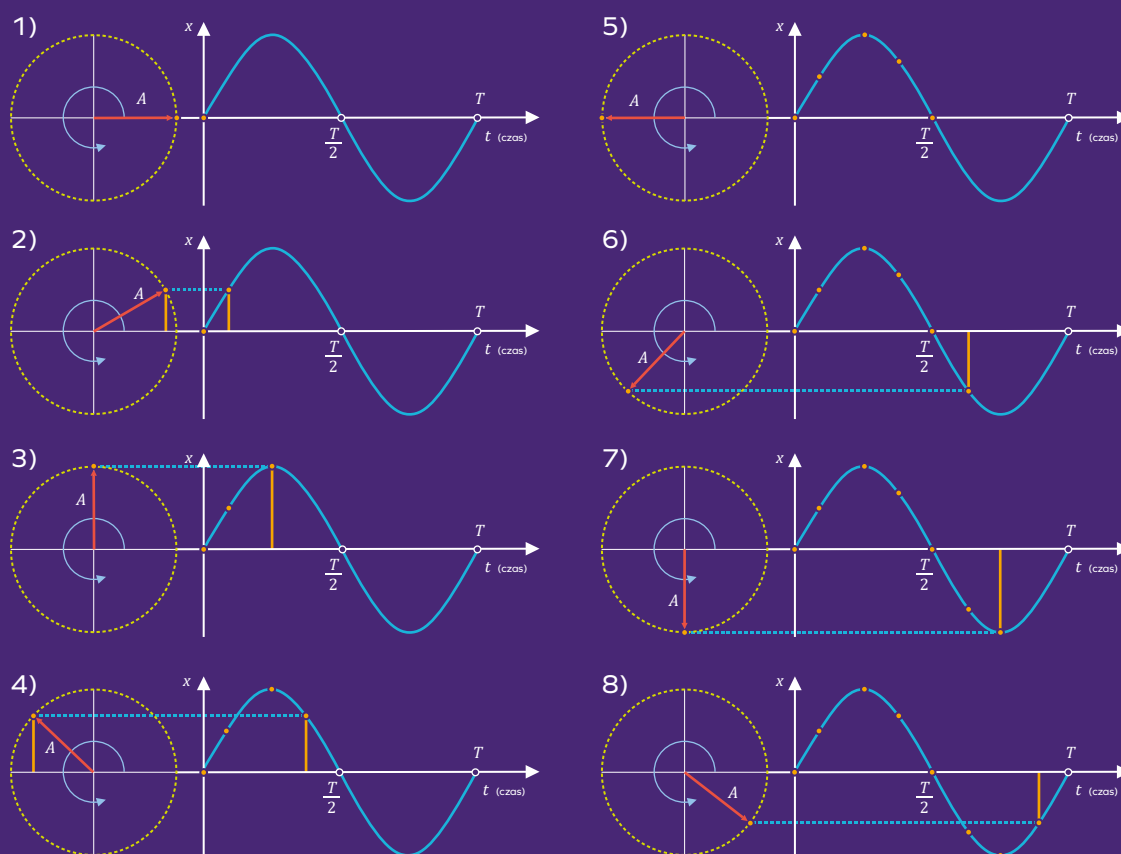
Analogicznie możemy wykonać wykres w przestrzeni. Tym razem na osi odciętych nie będziemy odkładać czasu  $t$ , lecz drogę  $r$  pokonywaną przez falę w czasie  $t$  czyli, zakładając jednostajną prędkość fali,  $r = vt$ . Odtworzymy w ten sposób jeden, pełny wycinek fali harmonicznego tzn. jedną długość fali. Poprzez kontynuowanie ruchu po okręgu możemy odtworzyć całą falę harmoniczną.

Jak widzimy, w ciągu jednego okresu fala przebywa odległość równą długości fali. Otrzymujemy zatem bardzo użyteczną zależność:

$$vT = \lambda$$

którą możemy zapisać inaczej jako:

$$v = \lambda f$$

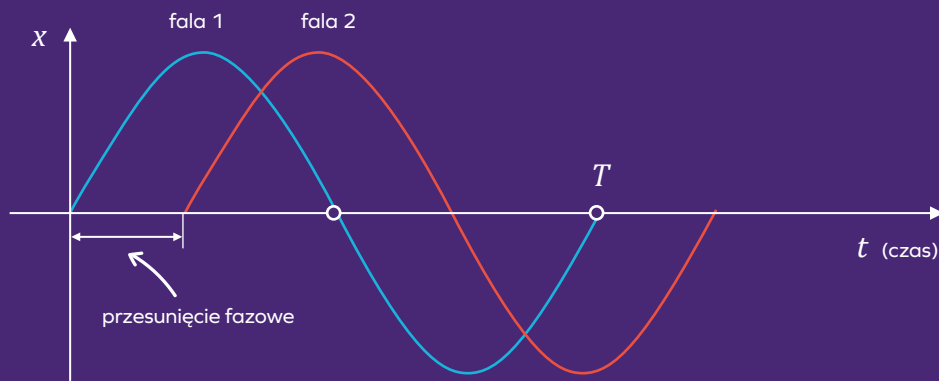


**Rys. 3.** Wybrane etapy ruchu po okręgu i odpowiadające im momenty cyklu drgania ośrodka (lub pola).

### 3. Faza i przesunięcie fazowe

Zarówno na Rys. 2, jak i na Rys. 3 odchylenie od stanu równowagi w chwili  $t=0$  jest zerowe. Kiedy rozpatrujemy tylko jedną falę lub jeden ruch drgający, zawsze możemy ustalić chwilę  $t=0$  na moment, kiedy właśnie osiągnięty jest (przynajmniej chwilowo) stan równowagi. Kiedy drgań jest więcej lub mamy do czynienia z większą liczbą nakładających się na siebie fal, to w ogólnym przypadku nie da się wszystkich zsynchronizować tak, by równocześnie występował stan równowagi wszędzie. Dlatego warto wprowadzić pojęcie fazy drgań.

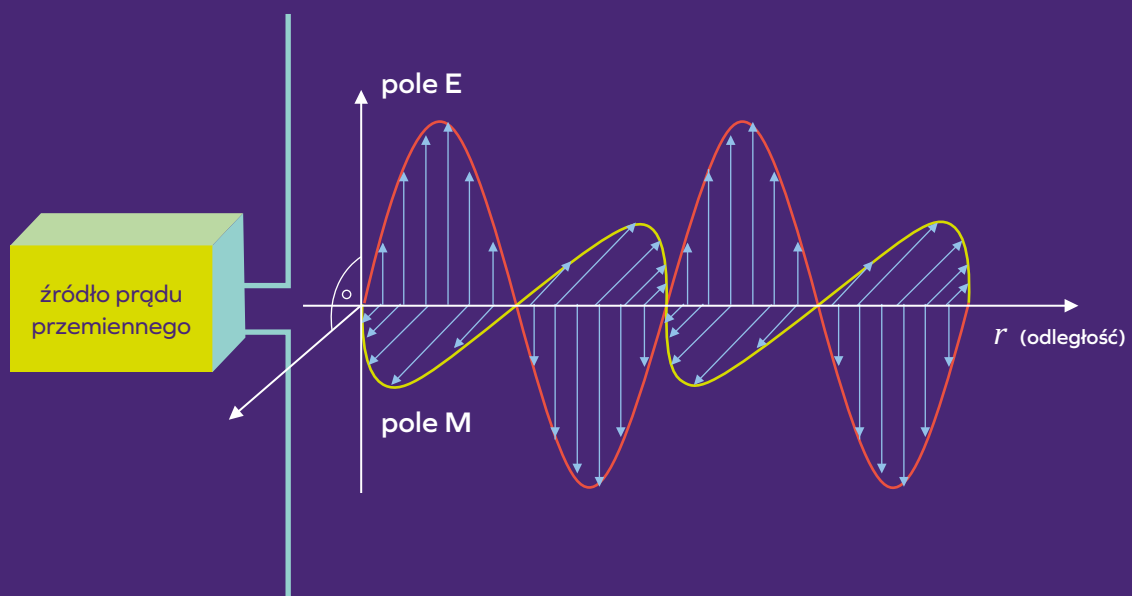
Przez **fazę** będziemy rozumieć wielkość fizyczną, która określa, w którym momencie okresu znajduje się dany obiekt podlegający drganiom. Możemy np. powiedzieć, że ruch drgający w dwóch różnych punktach przestrzeni ma tę samą fazę, jeżeli w obu miejscach fala osiągnęła stan równowagi lub w obu – grzbiet fali. Jeżeli taka synchronizacja nie zachodzi, mówimy, że pomiędzy drganiami występuje **przesunięcie fazowe** rozumiane jako różnica faz (Rys. 4).



**Rys. 4.** Przesunięcie fazowe pomiędzy drganiami w różnych punktach.

## 4. Fala EM i dobór długości anteny

Wszystkie pojęcia, które wprowadziliśmy wcześniej dla harmonicznej fali akustycznej, mają również zastosowanie do harmonicznych fal elektromagnetycznych (EM), które możemy wzbudzić np. w antenie dipolowej korzystając ze źródła prądu przemiennego (Rys. 5). Zatem także w przypadku fal EM możemy mówić o długości fali, częstotliwości, amplitudzie, prędkości oraz fazie.



**Rys. 5.** Fala elektromagnetyczna jako drgania pola EM.

Ponieważ zmienne w czasie pole elektryczne prowadzi do wzbudzenia zmiennego pola magnetycznego, oba te pola występują razem w propagującej fali. Co więcej, wektory natężenia tych pól są w próżni do siebie prostopadłe oraz są prostopadłe do kierunku rozchodzenia się fali. Mówimy, że fala EM jest falą **poprzeczną**. Fala akustyczna natomiast jest falą **podłużną** – w jej przypadku kierunek, w którym dochodzi do zagęszczeń/rozrzedzeń powietrza, jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali.

Okazuje się, że aby emisja fali EM przez antenę dipolową była efektywna energetycznie, długość  $l$  anteny nie powinna być mniejsza niż połowa długości emitowanej fali:

$$l \geq \frac{\lambda}{2}$$

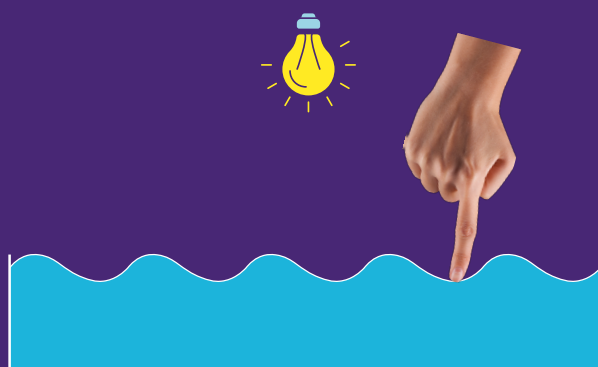
Nie oznacza to, że krótsza antena nie będzie emitowała fali. Może jednak wymagać więcej energii dostarczanej ze źródła prądu, by uzyskać wymaganą energię fali EM (co przekłada się m.in. na zasięg transmisji). Często dobiera się długość anteny tak, by była dokładnie równa połowie długości fali. Uzyskuje się dzięki temu specyficzne warunki, przy których napięcie elektryczne na krańcach anteny okresowo się zmienia na grzbiet i dolinę wzbudzonej w przewodach anteny fali, zaś prąd elektryczny przyjmuje maksymalną wartość przy środku anteny (tzw. fala stojąca). Animację obrazującą to zjawisko można obejrzeć w „Materiałach zewnętrznych” (1).

**Uwaga:** dla anten innego typu wprowadzony warunek może mieć inną postać. Np. dla tzw. anteny monopolowej zasilanej na jednym z końców jej długość powinna być większa niż jedna czwarta długości fali. Zależności te staną się istotne w Lekcji 7, gdzie wprowadzimy koncepcję modulacji sygnału.



## Doświadczenie

Przygotuj duży pojemnik z wodą, może być płytki, ważne tylko by jego ściany były znacznie od siebie oddalone. W warunkach domowych może to być wanna z niewielką ilością wody. Zbiornik powinien być od góry oświetlony tak, by wyraźnie było widać na dnie zbiornika cień fal na powierzchni wody.



**Rys. 6.** Doświadczenie z falami na powierzchni wody.

1. Dotknij palcem powierzchni wody. Na dnie powinien być widoczny cień kółka rozchodzącej się fali powierzchniowej. Zwróć uwagę, że fala rozchodzi się z określoną prędkością niezależną od tego, jak głęboko zanurzysz palec.
2. Zaczynaj rytmicznie poruszać palcem w wodzie (ok. 2 razy na sekundę). Jaka wielkość fizyczna związana jest z tempem, w którym poruszasz palcem? Zaobserwuj następujące po sobie grzbiety i doliny rozchodzącej się fali. Potrafisz oszacować jak duży jest odstęp pomiędzy kolejnymi grzbiętami? Jaka wielkość fizyczna odpowiada temu odstępowi?
3. Zwiększ teraz tempo poruszania palcem (ok. kilku razy na sekundę). Jaka wielkość fizyczna uległa zwiększeniu? Zwróć uwagę na odstęp pomiędzy grzbiętami fali. Czy zmienił się w porównaniu z punktem 2? Wzrósł czy zmalał?
4. Biorąc pod uwagę wzór i przyjmując, że prędkość fali jest stała – czy kierunek zmian występujących w nim wielkości fizycznych zgadza się z obserwacjami?



**Dyskusja.** Zgodnie ze wzorem  $v = \lambda f$  wzrost częstotliwości przy stałej prędkości fali musi prowadzić do zmniejszenia długości fali. Ponieważ częstotliwość i długość fali są wzajemnie odwrotnie proporcjonalne, dwukrotne zwiększenie częstotliwości oznacza dwukrotne zmniejszenie długości fali.



## Słowniczek

**Ruch falowy** – rozchodzące się zaburzenie pewnego ośrodka sprężystego lub pola fizycznego.

**Fala akustyczna** – rozchodzący się w powietrzu ciąg zagęszczeń i rozrzedzeń ośrodka.

**Długość fali** – odstęp w przestrzeni pomiędzy kolejnymi grzbiętami lub dolinami fali. Jednostka – metr [m].

**Amplituda fali** – maksymalna wielkość zaburzenia wywołanego przez falę mierzona od stanu równowagi. Jednostka uzależniona od charakteru fizycznego fali.

**Prędkość fali** – prędkość z jaką przemieszczają się w przestrzeni grzbiety fali. Jednostka – metr na sekundę [m/s].

**Okres drgań** – czas trwania pełnego cyklu drgania ośrodka (lub pola), czyli czas pomiędzy przejściem dwóch kolejnych grzbiętów fali. Jednostka – sekunda [s].

**Częstotliwość drgań** – liczba pełnych cykli drgania w ciągu 1 s. Jednostka – herc [Hz].

**Fala harmoniczna** – fala będąca obrazem jednostajnego ruchu punktu po okręgu.

**Faza** – wielkość fizyczna określająca, w którym momencie okresu znajduje się dany obiekt podlegający drganiom. Zwykle przyjmuje się, że jest to wielkość bezwymiarowa (jako część okresu).

**Przesunięcie fazowe** – różnica faz pomiędzy dwoma ruchami drgającymi.

**Fala poprzeczna** – fala, w której kierunek zaburzenia ośrodka (lub pola) jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali.

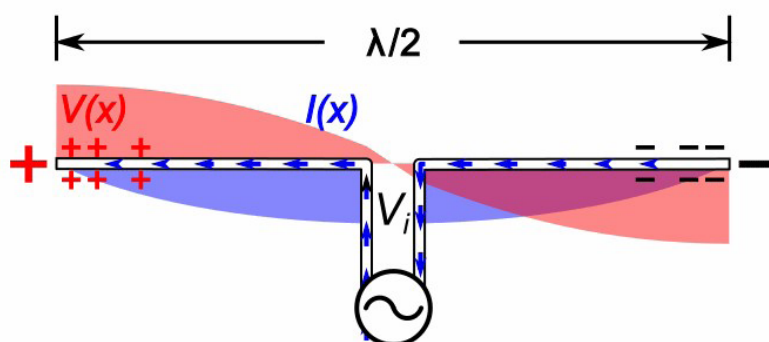


**Fala podłużna** – fala, w której kierunek zaburzenia ośrodka (lub pola) jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali.



## Materiały zewnętrzne

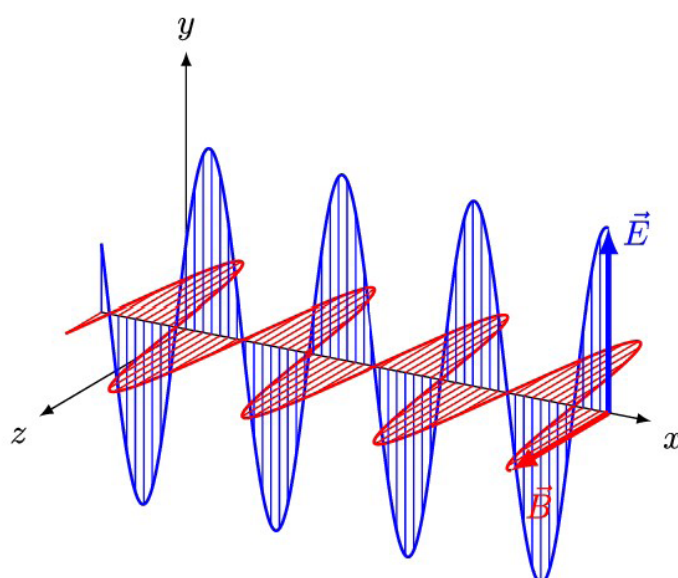
1. Animacja przedstawiająca falę stojącą w antenie dipolowej.



Zeskanuj QR kod



2. Animacja fali elektromagnetycznej i jej obu składowych – zmian pola elektrycznego oraz magnetycznego.



Zeskanuj QR kod





## Praca domowa

1. W powietrzu rozchodzi się fala akustyczna o częstotliwości odpowiadającej dźwiękowi  $C_1$  (do) na klawiaturze fortepianu czyli  $f=261,6$  Hz. Przyjmując, że prędkość dźwięku to  $v=340$  m/s, wyznacz długość fali.

**Dane:**

$$f=261,6\text{ Hz}$$

$$v=340\text{ m/s}$$

**Szukane:**

$$\lambda=?$$

2. Załóżmy, że chcielibyśmy nadać przez antenę dipolową falę EM o dokładnie takiej samej częstotliwości jak dźwięk  $C_1$  czyli  $f=261,6$  Hz. Jaka może być najmniejsza długość anteny, która pozwoli na efektywną energetycznie emisję tej fali? Przyjmij prędkość fali EM jako  $c=3\cdot 10^8$  m/s .

**Dane:**

$$f=261,6\text{ Hz}$$

$$c=3\cdot 10^8\text{ m/s}$$

**Szukane:**

$$l=?$$