

M5 Opis ćwiczenia

Podstawy biofizyki zmysłu słuchu. Badanie progu pobudliwości ucha ludzkiego.

Literatura:

- William Moebs, Samuel J. Ling, Jeff Sanny, *Fizyka dla szkół wyższych*, Tom 1, Wyd. OpenStax, R. 2017, **Rozdział 15, 16, 17.**
<https://openstax.org/books/fizyka-dla-szk%C3%B3%C5%82-wy%C5%BCszych-tom-1/pages/15-wstep>
- Jaroszyk F., *Biofizyka. Podręcznik dla studentów*, Wyd. Lekarskie PZWL, R. 2014. **Rozdział 15**, strony: 456 – 460, 471 – 485.



Zagadnienia:

- Drgania mechaniczne.
- Fala mechaniczna – powstawanie, mechanizm rozchodzenia się, własności, równanie fali harmoniczej.
- Interferencja fal, fala stojąca.
- Fala akustyczna jako przykład fali mechanicznej, własności fali akustycznej, równanie fali akustycznej, krzywe izofoniczne.
- Zjawisko rezonansu.
- Efekt Dopplera.
- Budowa ucha i zasada odbierania wrażeń słuchowych, próg słyszalności, próg bólu.
- Audiometria obiektywna i subiektywna.
- Prawo Webera-Fechnera.
- Cechy dźwięku, poziom natężenia dźwięku.

Wymagane umiejętności:

- brak

Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z biofizycznymi podstawami odbioru wrażeń słuchowych.

Celem szczegółowym jest wyznaczenie, w badaniu audiometrycznym, progu pobudliwości ucha dla różnych częstotliwości fal akustycznych.

Podstawowe prawa i definicje:

Fala harmoniczna to rodzaj fali w której wychylenie obiektów drgających y w funkcji ich położenia x oraz czasu t opisuje następujące równanie:

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

Gdzie: A – amplituda (maksymalne wychylenie) drgań; k – liczba falowa; ω – częstość kołowa, φ – faza początkowa.

Fala akustyczna jest rodzajem fali mechanicznej, w której cząsteczki ośrodka drgają wzdłuż kierunku rozchodzenia się fali (fala podłużna). Drgania ośrodka prowadzą do niewielkich zmian jego ciśnienia.

Prawo Webera–Fechnera opisuje zależność między fizyczną wielkością bodźca a subiektywną siłą jego odczucia. Percepcyjna intensywność wrażenia **rośnie proporcjonalnie do logarytmu** natężenia bodźca fizycznego:

$$W = k \ln \left(\frac{B}{B_0} \right)$$

gdzie:

- W – subiektywna siła wrażenia
- B – fizyczne natężenie bodźca
- B_0 – próg absolutny (najmniejsze postrzegalne natężenie)
- k – stała zależna od rodzaju bodźca i układu zmysłowego

Opis metody pomiarowej:

Organizm kontaktuje się z otoczeniem za pomocą receptorów. Receptory przekształcają odbierany bodziec (np. mechaniczny, optyczny czy chemiczny) na bodźce elektryczne, czyli potencjały czynnościowe błon komórek nerwowych. Następnie informacja przekazywana jest do mózgu. Przy odbieraniu wszystkich rodzajów bodźców, obowiązuje schemat receptor – przewodnik (nerwy) – odbiornik (mózg), gdzie bodziec jest przetwarzany na nasze odczucia.

Ludzki zmysł słuchu odbiera bodźce mechaniczne, których źródłem jest fala dźwiękowa w zakresie częstotliwości 16 – 20 000 Hz. Właściwe komórki receptorowe znajdują się w uchu wewnętrznym, na błonie podstawnej ślimaka. To tam drgania mechaniczne zamieniane są na potencjały czynnościowe błon komórkowych. Pozostałe części ucha, ucho zewnętrzne i środkowe pełnią przede wszystkim funkcję „wzmacniaczy” odbieranego bodźca.

Fala akustyczna w trakcie pokonywania drogi w układzie słuchowym jest wielokrotnie wzmacniana dzięki zjawisku rezonansu. Pierwszym zbiorem rezonatorów jest ucho zewnętrzne. Małżowina uszna wzmacnia dźwięki o częstotliwości 4-7 kHz o ok. 5-7 dB, natomiast przewód słuchowy zewnętrzny i błona bębenkowa stanowią komorę o częstotliwości rezonansowej ok 2,5 kHz, wzmacniającą dźwięki z przedziału 2 - 4 kHz o ok. 10 dB.

W uchu środkowym drgania cząsteczek powietrza zamieniane są na drgania mechaniczne kosteczek słuchowych, które to z kolei pobudzają do drgań cieczę ślimaka w uchu wewnętrznym. Drgania te są przenoszone przez cieczę ślimaka na błonę podstawną ślimaka, gdzie zamieniane są na potencjały czynnościowe włókien nerwów słuchowych w narządzie Cortiego. Drgania mechaniczne są wzmacniane zarówno w uchu środkowym, jak i wewnętrznym.

Dźwięk

Odczuwane przez nas wrażenie słuchowe, czyli dźwięk, jest sumą wielu nakładających się czynników. Każdy dźwięk składa się z wielu tonów podstawowych. Ton ma swoją określoną częstotliwość i poziom natężenia. Czysty ton można uzyskać np. za pomocą kamertonu. Dźwięki dochodzące do naszych uszu złożone są z wielu nakładających się na siebie tonów i dlatego trudno je obiektywnie opisać. Odczuwamy je subiektywnie i staramy się charakteryzować np. poprzez głośność, barwę czy wysokość słyszanego dźwięku.

Natężenie i poziom natężenia dźwięku

Cechą charakterystyczną każdej fali jest jej natężenie. W przypadku fali akustycznej natężenie jest definiowane jako stosunek mocy P fali padającej na jednostkę powierzchni. Natężenie fali wyrażane jest w W/m^2 .

Najmniejsza wartość natężenia sygnału, wywołująca wrażenie słuchowe, dla częstotliwości 1 kHz to ok. 10^{-12} W/m^2 . Największa wartość, która nie wywołuje jeszcze trwałego uszkodzenia słuchu to ok. 1 W/m^2 . Stosunek tych dwóch wartości wynosi 10^{12} i nazywany jest zakresem dynamicznym ucha. Zakres ten jest bardzo duży i dlatego niewygodny do stosowania, np. natężenie dźwięku mowy podczas rozmowy wynosi 10^{-5} W/m^2 . Do opisu natężenia dźwięku przyjęto wygodniejszą skalę logarymiczną. Natężenie określające próg słyszalności, 10^{-12} W/m^2 , uznano za natężenie odniesienia I_0 . Każde inne natężenie dźwięku jest wyrażane względem I_0 .

$$\frac{I_1}{I_0}$$

Stosunkowi 10:1 odpowiada 1 bel

Liczbę beli otrzymuje się przez zlogarytmowanie przy podstawie 10 ilorazu natężeń.

$$\log_{10} \frac{I_1}{I_0} = B(\text{bel})$$

Bel jest jeszcze zbyt dużą jednostką, aby posługiwać się nią w codziennej praktyce, dlatego powszechnie używa się jednostki decybel.

$$10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0} = dB(\text{decybel})$$

Wielkość charakteryzująca dźwięk wyrażona w decybelach nazywana jest **poziomem natężenia dźwięku**. Skala decybelowa nie jest skalą liniową, zatem nie można po prostu sumować poziomów natężenia dźwięku. Aby obliczyć poziom natężenia dźwięków dochodzących z różnych źródeł, trzeba najpierw wyliczyć natężenia dźwięków w W/m^2 , zsumować i potem dopiero zlogarytmować.

Głośność dźwięku i prawo Webera-Fechnera

Jak już wcześniej wspomniano, głośność jest wrażeniem subiektywnym, przypisywanym odbieranym dźwiękom. Na wrażenie głośności wpływ mają przede wszystkim dwa obiektywne czynniki – częstotliwość i poziom natężenia odbieranego dźwięku. Poziom głośności dźwięku jest wielkością porównawczą. Porównuje się głośność słyszanego dźwięku z głośnością tonu o częstotliwości 1 kHz i różnych poziomach natężenia. Jednostką poziomu głośności dźwięku jest fon. Poziom głośności badanego dźwięku jest liczbowo równy poziomowi ciśnienia akustycznego tonu standardowego (1 kHz), z którym jest on jednakowo głośny. Dźwięki o różnej częstotliwości i poziomie natężenia mogą wywoływać wrażenie o takim samym poziomie głośności. Nazywamy je izofonami.

Zależność między fizyczną miarą bodźca a odebraniem wrażeniem zmysłowym wyraża prawo Webera-Fechnera. Prawo to dotyczy wszystkich zmysłów, nie tylko słuchu. Mówi ono, że odpowiedź układu biologicznego zależy nie od bezpośredniej wielkości a od względnej zmiany działającego bodźca. W cichym pokoju, można usłyszeć brzęczącą muchę, jednak tej samej muchy nie usłyszymy, gdy będzie grała głośna muzyka.

$$W = k \ln \frac{B}{B_0} \quad (1)$$

gdzie:

W – wrażenie zmysłowe,

k – doświadczalnie wyznaczany współczynnik proporcjonalności,

B – wielkość bodźca,

B₀ – wielkość bodźca porównawczego.

W zależności od rozpatrywanego rodzaju bodźca, przyjmuje się odpowiedni bodziec porównawczy, zwykle umowną, najniższą wartość bodźca rejestrowaną przez dany zmysł. Na przykład, gdy bierzemy pod uwagę natężenie dźwięku, bodźcem porównawczym będzie próg słyszalności, czyli 10⁻¹² W/m².

Audiometria

Audiometria jest metodą badania słuchu, określającą ubytek słuchu w stosunku do stanu prawidłowego. Wyróżnić można badania audiometryczne obiektywne i subiektywne. Badania obiektywne wykonywane są bez aktywnego udziału pacjenta, natomiast w testach subiektywnych pacjent określa, które dźwięki są dla niego słyszalne, a które nie.

W trakcie ćwiczenia będzie badany próg pobudliwości ucha ludzkiego dla różnych częstotliwości fal akustycznych (od 250 do 8000 Hz). Progi słyszenia mogą być określone za pomocą audiometrii przewodnictwa powietrznego i kostnego.

W badaniu przewodnictwa powietrznego sygnał testowy podawany jest pacjentowi poprzez słuchawki. W ćwiczeniu wykorzystamy test Hughson-Westlake'a. Jest to automatyczny test tonalny. Proóg słyszenia jest tu określony jako 2 z 3 poprawnych odpowiedzi na tym samym poziomie natężenia i częstotliwości podawanego tonu. W automatycznej procedurze poziom natężenia tonu zwiększa się o 5 dB, a zmniejsza się o 10 dB. Celem audiometrii powietrzej jest określenie zdolności słyszenia dla różnych częstotliwości. Badanie może ujawnić utratę słuchu, lecz nie może określić rodzaju ubytku słuchu.

W audiometrii przewodnictwa kostnego sygnał testowy podawany jest przez wibrator kostny umieszczony na wyrostku sutkowym kości potylicznej lub na czole badanego pacjenta. Celem jest podanie tonu bezpośrednio do ucha wewnętrznego za pośrednictwem kości czaszkowych, aby określić próg słyszenia

dla ucha wewnętrznego. W teście przewodnictwa kostnego prawie zawsze powinno być stosowane maskowanie drugiego ucha.

Niepewności:

W ćwiczeniu nie szacujemy niepewności.

Pytania i zadania:

1. Jednoatomowy gaz doskonały pod ciśnieniem **1080 hPa** ma gęstość **0,5 kg/m³**. Wyznacz prędkość fali dźwiękowej w tym gazie.
2. Opuszczając jednostki układu SI student zapisał równanie pewnej fali płaskiej w następującej postaci $\xi(x, t) = 0,2 \cos(4\pi \cdot x - 1200\pi \cdot t)$. Ile wynosi długość, częstotliwość, prędkość tej fali?
3. Prędkość dźwięku w powietrzu wynosi **340 m/s**. Podaj okres fali stojącej o największej długości, która może powstać w otwartej z obu stron rurze o długości **42,5 cm**.
4. Minister Ochrony Środowiska w 2012 roku zmienił rozporządzenie o dopuszczalnym poziomie hałasu na terenach uzdrowisk z **40 dB** na **45 dB**. Ile razy większe natężenie dźwięku dopuszcza ta zmiana?
5. Jaka energia dźwięku o częstotliwości **f = 1000 Hz** przechodzi przez powierzchnię **1 cm²** w czasie **1 s**, jeżeli poziom natężenia dźwięku wynosi **100 dB**. Natężenie wzorcowe **I₀ = 10⁻¹² W/m²**?
6. W pewnym miejscu pomieszczenia poziom natężenia dźwięku w sytuacji, gdy jest włączone tylko radio wynosi **60 dB**, a gdy jest włączony tylko telewizor również **60 dB**. Ile wynosi poziom natężenia dźwięku, gdy są włączone jednocześnie radio i telewizor?
7. W odległości **10 m** od punktowego źródła dźwięku poziom natężenia fali wynosi **45 dB**. Jaki poziom stwierdzimy w odległości **10 cm** od tego źródła? Zakładamy, że ośrodek jest jednorodny, a źródło izotropowe i możemy zaniedbać tłumienie.