

Podstawy biofizyki zmysłu słuchu

Badanie progu pobudliwości ucha ludzkiego

Zagadnienia:

- Drgania mechaniczne.
- Fala mechaniczna – powstawanie, mechanizm rozchodzenia się, własności, równanie fali harmonicznej.
- 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 obiektywne i subiektywne.
- Poziom natężenia dźwięku.

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.

Droga fali akustycznej w układzie słuchowym

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

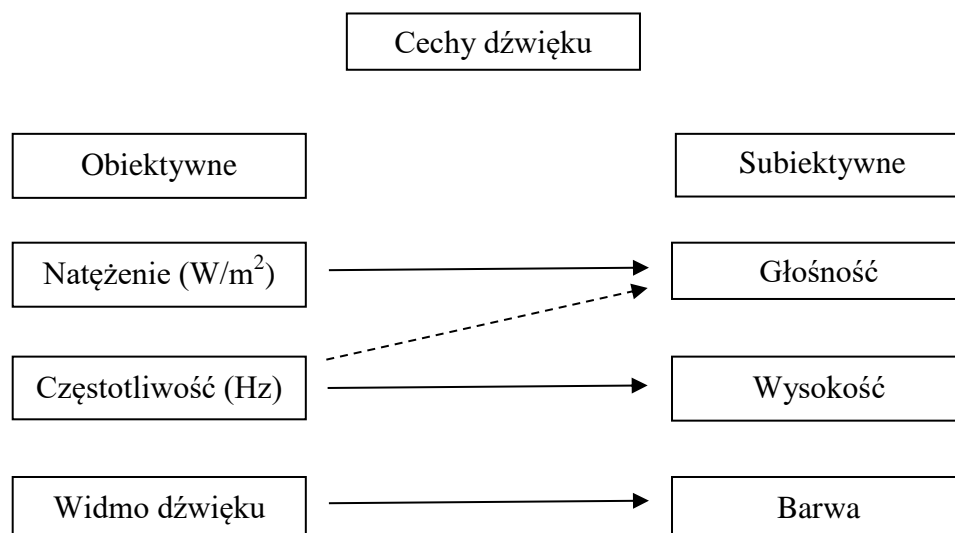
o częstotliwości rezonansowej ok 2,5 kHz, wzmacniającą dźwięki z przedziału 2 - 4 kHz o ok. 10 dB. W **uchu środkowym** drgania cząsteczek powietrza zamieniane są na drgania mechaniczne kosteczek słuchowych (ciało stałe). Tu również mamy do czynienia ze wzmacnianiem fali akustycznej, np.:

- powierzchnia błony podstawnej jest mniejsza niż powierzchnia błony bębenkowej. Ponieważ energia niesiona przez falę pada na mniejszą powierzchnię, natężenie fali rośnie (patrz akapit poniżej o natężeniu dźwięku).

- jedna z kosteczek, młoteczek, działa jak dźwignia jednostronna (przypomnij sobie zasadę działania).

Drgania strzemiączka pobudzają do drgań cieczy ślimaka w **uchu wewnętrznym**. Na błonie podstawnej ślimaka drgania są zamieniane na potencjały czynnościowe włókien nerwów słuchowych w narządzie Cortiego.

Dźwiękiem nazywamy wrażenia słuchowe wywołane przez falę akustyczną. Wrażenie to jest sumą wielu nakładających się czynników i ma charakter subiektywny. Zwykle opisując dźwięk podaje się jego cechy: głośność, wysokość, barwę. Są to tzw. cechy subiektywne dźwięku, ale na ich odczuwanie mają wpływ jak najbardziej obiektywne cechy fali akustycznej, takie jak: natężenie, częstotliwość, widmo dźwięku.



Zwykle podaje się, że poszczególne cechy obiektywne, wpływają na odpowiadające im cechy subiektywne: natężenie dźwięku – głośność, częstotliwość – wysokość i widmo – barwa. Jednak nie zawsze jest to tak jednoznaczne, ponieważ próg słyszalności jest różny dla różnych częstotliwości, więc częstotliwość także w pewnym stopniu wpływa na wrażenie głośności.

Natężenie fali akustycznej (dźwięku):

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

$$I = \frac{P}{a} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Częstotliwość fali akustycznej:

Częstotliwość jest cechą wszelkich zjawisk okresowych, określa liczbę cykli zjawiska w jednostce czasu – zwykle w czasie 1 s. Czyli ile drgań wystąpi w czasie 1 s. Jednostką częstotliwości jest Hz.

Widmo dźwięku:

Zwykle dźwięki, które nas otaczają są zjawiskiem złożonym. Podstawowymi cegiełkami dźwięku są tony. Ton jest to typ dźwięku, który ma dobrze określoną (dokładnie "pojedynczą") częstotliwość. Nie ma dźwięków prostszych niż ton. Większość dźwięków składa się z wielu tonów. Możemy je rozłożyć na pojedyncze tony, za pomocą matematycznej analizy Fouriera i taki rozkład nazywamy widmem dźwięku. Widmo dźwięku wpływa na wrażenie, które nazywamy barwą. Ton sam w sobie nie brzmi zbyt pięknie. Jest do dźwięk prosty, ubogi barwowo. Większość zwykłych dźwięków jest mieszaniną wielu tonów, przy czym jedne tony mogą trwać dłużej, inne krócej; narastać szybko, lub wolno; falować, urywać się, interferować itp. O ile typowe odgłosy przyrody - np. szum morza, warkot silnika, czy uderzenie pioruna, zawierają najczęściej chaotyczną mieszaninę tonów, to dźwięk wydawany przez instrumenty muzyczne posiada bardziej uporządkowane widmo, składające się zazwyczaj z kilku do kilkunastu tonów. W dźwięku tym jest pewien ton szczególnie ważny, ton - który określa nam wysokość dźwięku wydawanego przez instrument, jest to tzw. ton podstawowy nazywany także "pierwszą lub główną składową harmoniczną". Jest to zawsze najniższy ton składający się na dany dźwięk. W większości instrumentów kolejne składowe wytwarzanego dźwięku tworzą szereg tonów będących naturalnymi wielokrotnościami składowej podstawowej (stąd nazwa szereg harmoniczny).

Natężenie dźwięku (W/m^2) a poziom natężenia dźwięku (dB)

Nasze zmysły mają pewną charakterystyczną cechę mianowicie fizyczny bodziec musi narastać logarytmicznie żebyśmy w ogóle zauważyli zmianę we wrażeniu, które narasta liniowo. Dlatego wprowadzono wielkość nazywaną **poziomem natężenia dźwięku** i wyrażana jest ona w dB. Wielkość ta charakteryzuje bodziec w takiej skali, w jakiej go odbieramy.

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. Natężenie określające próg słyszalności, 10^{-12} W/m^2 , uznano za natężenie odniesienia I_0 . Każde inne natężenie dźwięku jest wyrażane względem I_0 .

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

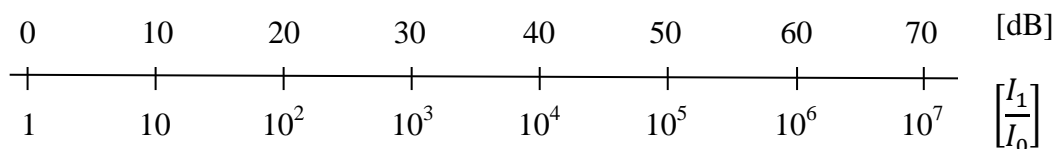
Stosunkowi 10:1 odpowiada 1 bel

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

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

W codziennej praktyce powszechnie używa się jednostki decybel.

$$10 \log_{10} \frac{I_1}{I_0} = 1 \text{ dB}(\text{decybel})$$



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

Zależność między fizyczną miarą bodźca a odebrany wrażeniem zmysłowym opisuje 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.

$$W = k \ln \frac{B}{B_0}$$

gdzie:

W – wrażenie zmysłowe,

k – doświadczalnie wyznaczany współczynnik proporcjonalności,

B – wielkość bodźca,

B_0 – 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/m^2 .

Audiometria

Ćwiczenie polega na wykonaniu badania audiometrycznego i wyznaczeniu progu pobudliwości ucha dla różnych częstotliwości fal akustycznych, w przewodnictwie powietrznym i kostnym.

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.

Dźwięki o różnej częstotliwości i poziomie natężenia mogą wywoływać wrażenie o takim samym poziomie głośności. Nazywamy je izofonami.

W badaniu przewodnictwa powietrznego sygnał testowy podawany jest pacjentowi poprzez słuchawki. Celem audiometrii powietrznej 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 skroniowej. 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.