

BADANIE CZUŁOŚCI UCHA LUDZKIEGO

Potrzeba komunikowania się jest jedną z najważniejszych potrzeb psychicznych każdego człowieka, a najwydatniejszym sposobem komunikowania się ludzi z otoczeniem jest mówienie i słyszenie. Narząd mowy człowieka jest kompleksem elementów, które umożliwiają generowanie szerokiej gamy dźwięków. Natomiast zmysł słuchu ma za zadanie odbierać i analizować informacje, które docierają do nas w postaci fal dźwiękowych z otoczenia. Fale te są zamieniane na ciągi impulsów neuronowych w uchu wewnętrznym. Impulsy te są następnie przekazywane do wyższych pięter układu słuchowego, gdzie następuje ich interpretacja na zrozumiałe informacje. Informacje niesione przez fale są zawarte w ich częstotliwości, natężeniu oraz strukturze widmowej.

Zaburzenia słuchu stanowią istotną przeszkodę w komunikowaniu się z otoczeniem. Występują one u co najmniej 10% ogółu populacji krajów uprzemysłowionych, a co czwartemu współczesnemu nastolatkowi grozi wczesna utrata słuchu mogąca ujawnić się już w wieku 30–40 lat [6].

W medycynie klinicznej istnieje dział otolaryngologii zwany audiologią. Jest to nauka o właściwościach i działaniu narządu słuchu oraz o jego zaburzeniach i leczeniu jego zmian patologicznych. Audiologia zajmuje się także metodami badania zaburzeń słuchu. Jedną z podstawowych metod badania słuchu jest audiometria tonalna. Zadaniem audiometrii jest ocena stanu słuchu za pomocą dźwięków leżących na granicy słyszenia, a więc najśłabszych dźwięków, jakie rejestruje nasze ucho [6]. Następuje to przez wyznaczenie progów słyszalności dla tonów o różnych częstotliwościach. Specjalistycznymi przyrządami służącymi do pomiarów czułości ucha ludzkiego są audiometry. Pozwalają one na ilościowe określenie ubytków słuchu, co prezentowane jest w formie audiogramu [28].

DŹWIEK

Powstawanie fal akustycznych i ich własności

Dźwięk to szczególny rodzaj fali akustycznej rozchodzącej się w ośrodku sprężystym, która wytwarza tzw. wrażenie słuchowe. Źródłem dźwięku może być każde ciało drgające, a parametry dźwięku przez nie wytwarzanego są ściśle związane z parametrami drgań tego ciała. Dlatego omawianie sygnałów akustycznych najlepiej rozpocząć od opisu zagadnień związanych z drganiami ciał [3,2].

Ruch drgający

Ruch drgający to powtarzający się ruch ciała wokół położenia równowagi. Najprostszym ruchem drgającym jest ruch harmoniczny prosty, który można opisać funkcją harmoniczną (sinus lub cosinus). W drganiach tych siła działająca na ciało jest proporcjonalna do wychylenia z położenia równowagi i skierowana przeciwnie do wychylenia. Wychylenie to w dowolnej chwili czasu t można zapisać następująco:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \phi) \quad (1.1)$$

gdzie:

A - amplituda drgań (maksymalne wychylenie z położenia równowagi)

ω - częstość kołowa (pulsacja),

ϕ - faza początkowa (faza sygnału w chwili $t = 0$).

Wielkości te w pełni charakteryzują każdą sinusoidę, a zatem i każde najprostsze drganie. Argument funkcji sinus w wyrażeniu (1.1), czyli kąt α nosi nazwę fazy drgań:

$$\alpha = (\omega t + \phi) \quad (1.2)$$

Czas wykonania jednego pełnego cyklu nazywa się okresem T , natomiast częstotliwość f określa liczbę wykonanych drgań n w jednostce czasu, tzn. jest odwrotnością okresu T :

$$f = \frac{n}{t} = \frac{1}{T} \left[\frac{1}{s} = \text{Hz} \right] \quad (1.3)$$

gdzie: T - okres wyrażony w sekundach.

Zależność między częstotliwością drgań a pulsacją (częstotliwością kołową) prezentuje się następująco:

$$\omega = 2\pi f \quad (1.4)$$

Propagacja dźwięku w przestrzeni

Jeśli drgające ciało umieszczone zostanie w ośrodku sprężystym, to drgania ciała przenoszą się do ośrodka i rozchodzą się w nim. Dźwięk rozchodzi się w postaci fali mechanicznej, która w gazach i cieczech jest falą podłużną, tzn. drgania cząstek ośrodka odbywają się w tym samym kierunku, w którym rozchodzi się energia fali. Natomiast w cieczech lepkich, tkankach biologicznych i ciałach stałych mogą ponadto występować fale poprzeczne, tzn. cząsteczki ośrodka drgają w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali. Ponadto fale można także podzielić ze względu na kształt czoła fali. Wyróżniamy tu fale płaskie, które występują jeśli energia fali rozchodzi się w jednym kierunku, a także fale kuliste, jeśli drgania rozchodzą się we wszystkich kierunkach przestrzeni. Równanie płaskiej fali sinusoidalnej ma postać:

$$\Psi(x,t) = A_o \sin(\omega t - kx + \phi) \quad (1.5)$$

gdzie: $\Psi(x,t)$ - wychylenie z położenia równowagi

$k = 2\pi/\lambda$ – liczba falowa,

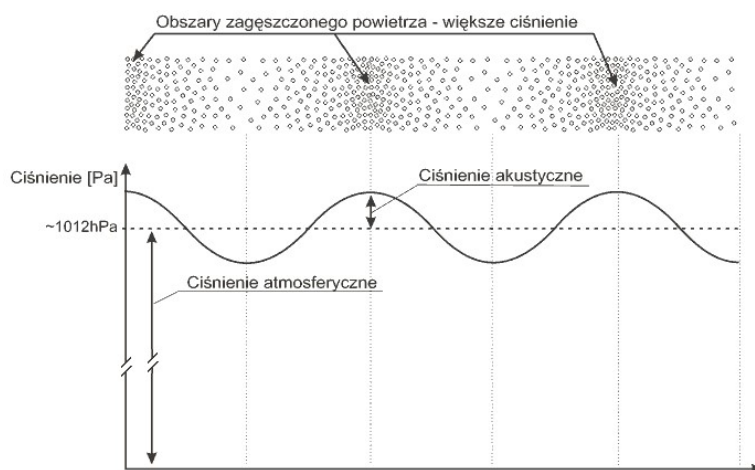
x – odległość od źródła.

Natomiast w fali kulistej amplituda drgań cząsteczek ośrodka maleje z odległością:

$$\Psi(x,t) = \frac{A_o}{r} \sin(\omega t - kx + \phi) \quad (1.6)$$

gdzie: r – odległość od źródła.

W przypadku fali podłużnej, nazywanej także falą ciśnień, na skutek ruchu drgającego oddzielnych cząsteczek, powstają ich zagęszczenia i rozrzedzenia. Zmiany zagęszczeń ośrodka pociągają za sobą zmiany jego gęstości, a więc i ciśnień. W miejscach zagęszczenia ośrodka panuje ciśnienie wyższe niż ciśnienie atmosferyczne, natomiast w miejscach rozrzedzenia ciśnienie jest niższe od atmosferycznego. Różnicę między chwilową wartością ciśnienia p a ciśnieniem atmosferycznym (ciśnieniem statycznym powietrza) nazywamy **ciśnieniem akustycznym** p_{ak}



Rys. 1.1. Chwilowy widok zagęszczonych i rozrzedzonych obszarów fali dźwiękowej w powietrzu

Odległość między sąsiednimi zagęszczeniami lub rozrzedzeniami równa jest długości fali λ . Szybkość rozprzestrzeniania się tego stanu drgań stanowi prędkość rozchodzenia się fali w danym ośrodku.

Pomiędzy prędkością rozchodzenia się energii fali v , długością fali λ i częstotliwością f zachodzi związek:

$$v = \lambda \cdot f \quad (1.7)$$

Ciśnienie akustyczne zmienia się sinusoidalnie

$$p = p_{max} \sin(\omega t - kx) \quad (1.8)$$

Maksymalna wartość ciśnienia akustycznego wyraża się wzorem:

$$p_{max} = \rho v A \omega \quad (1.9)$$

gdzie: p - ciśnienie akustyczne,

ρ - gęstość ośrodka,

v - prędkość rozchodzenia się fali,

A - amplituda drgań cząsteczek,

ω - częstość kołowa drgań

Cechy dźwięku – fizyczne i psychologiczne

Dźwięk można zdefiniować jako falę akustyczną propagującą się w ośrodku sprężystym lub jako pobudzenie narządu słuchu w wyniku odbierania tej fali, czyli tzw. wrażenie słuchowe. W związku z tym rozróżnia się cechy dźwięku fizyczne (obiektywne) oraz psychologiczne (subiektywne).

Istnieje zależność między odpowiednimi cechami obiektywnymi i subiektywnymi, każdej bowiem cesze obiektywnej odpowiada cecha subiektywna co przedstawia poniższa tabela.

Tab. 1.1. Zależność między odpowiednimi cechami obiektywnymi i subiektywnymi

CECHY OBIEKTYWNE	CECHY SUBIEKTYWNE
natężenie	głośność
częstotliwość	wysokość
widmo	barwa

Natężenie fali dźwiękowej, poziom natężenia dźwięku – głośność dźwięku

Fala dźwiękowa rozchodząc się w ośrodku przenosi energię. Stosunek ilości energii dW do powierzchni prostopadłej dS na którą pada fala i do czasu dt nosi nazwę **natężenia fali** I :

$$I = \frac{dW}{dS \cdot dt} \left[\frac{J}{m^2 s} \right] \quad (1.10)$$

Jest to zatem średnia ilość energii fali padającej na 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku propagacji w czasie 1s. Natężenie jest związane z ciśnieniem akustycznym zależnością:

$$I = \frac{1}{2} \cdot \frac{p^2}{\rho \cdot v} \quad (1.11)$$

gdzie: p - ciśnienie akustyczne,

ρ - gęstość ośrodka,

v - prędkość rozchodzenia się fali.

Wrażenie głośności odczuwane przez odbiorcę umożliwia odróżnianie dźwięków cichszych od głośniejszych. Jest ono zależne od natężenia dźwięku i od czułości ucha. Ilościowe określenie tej zależności jest niezwykle trudne, ze względu na subiektywny charakter odczucia głośności. Natężenie dźwięku można zmierzyć, natomiast głośność dźwięku można co najwyżej ocenić jako jakościową różnicę w porównaniu z głośnością innego dźwięku [1,11].

Ucho ludzkie jest zdolne do odbierania dźwięków w bardzo szerokim zakresie częstotliwości od 16 do 20000 Hz. Najmniejszą wartość natężenia dźwięku potrzebną do wywołania ledwie odczuwalnego wrażenia słuchowego nazywamy **progiem słyszalności** i jest ona różna dla różnych częstotliwości. Dla tonu o częstotliwości 1 kHz próg ten ma wartość 10^{-12} W/m^2 , co odpowiada

ciśnieniu akustycznemu na poziomie $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. W miarę wzrostu natężenia dźwięku wrażenie słuchowe staje się coraz silniejsze, aż przy pewnym natężeniu ucho przestaje rozróżniać cechy dźwięki i reaguje bólem (**próg bólu**). Ciśnienie akustyczne, przy którym sygnał dźwiękowy powoduje ból wynosi 20 Pa ($I = 1 \text{ W/m}^2$). Przedział pomiędzy wartością progu słyszalności i progu bólu nazywa się zakresem słyszalności, co przedstawia rysunek 1.2 [1,13].



Rys. 1.2. Zakres słyszalności ucha ludzkiego [15]

Wrażenie głośności nie jest liniową funkcją natężenia dźwięku, jest ono bliższe zależności logarytmicznej.

Wynika to z **prawa Webera-Fechnera**:

Najmniejszy zauważalny przyrost bodźca jest proporcjonalny do natężenia bodźca już działającego

$$\frac{\Delta I_o}{I} = \text{const} \quad (1.12)$$

Zatem wrażenie głośności zależy od względnej zmiany działającego bodźca, czyli głośność zmienia się jak logarytm natężenia dźwięku. Dlatego do określenia wrażenia głośności definiujemy wielkość zwaną **poziomem natężenia dźwięku L**:

$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_o}, [dB] \quad (1.13)$$

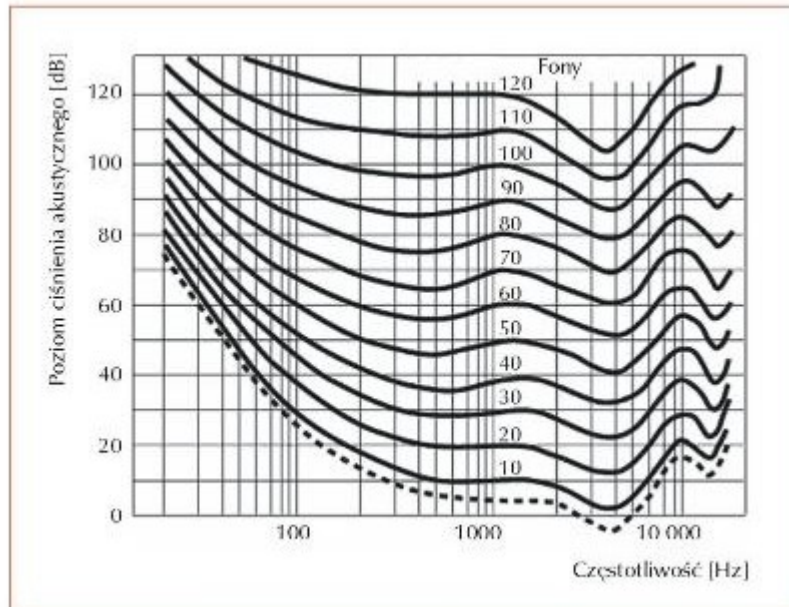
Oznacza to, że wzrost poziomu natężenia dźwięku o 10 dB związany jest z 10-krotnym wzrostem natężenia dźwięku. Ponieważ natężenie dźwięku zależy od kwadratu ciśnienia akustycznego dźwięku, to **poziom ciśnienia akustycznego** określamy zależnością:

$$L = 20 \cdot \log \frac{p_{ak}}{p_o}, [dB] \quad (1.14)$$

gdzie: $p_o = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, występujące przy natężeniu $I_o = 10^{-12} \text{ W/m}^2$.

W diagnostycznej ocenie słuchu progi słyszalności są zazwyczaj wyrażane względem średniego progu, uzyskanego dla zdrowych słuchaczy. W tym przypadku progi wyrażone są w tzw. decybelach „poziomu słyszalnego”, dB HL. Przykładowo próg 40 dB HL dla 1 kHz oznacza, iż pacjent ma próg o 40 dB wyższy niż normalny próg dla tej częstotliwości.

Głośność jest tą cechą subiektywną wrażenia słuchowego, która pozwala nam uszeregować dźwięki od cichych do głośnych. Głośności nie można zmierzyć, dlatego omawiając ją najlepiej posługiwać się skalą, która umożliwi **porównanie głośności dźwięków o różnej częstotliwości**. Taką skalą są krzywe jednakowej głośności, które przedstawione są na rysunku 1.3. Utworzono je przyrównując głośność analizowanego dźwięku o dowolnej częstotliwości z głośnością tonu o częstotliwości równej 1 kHz. Wyznaczona w ten sposób subiektywna miara głośności nazywana jest **poziomem głośności**, a jej jednostką jest **fon**. Skala fonowa pokrywa się przy tonie 1000 Hz całkowicie ze skalą decybeli. Dźwięki o różnej częstotliwości i poziomie natężenia mogą wywoływać wrażenie o takim samym poziomie głośności. Nazywamy je izofonami [4,8].



Rys. 1.3. Krzywe jednakowej głośności [27]

Dla niskich poziomów głośności kształt krzywych jednakowej głośności jest bardzo zbliżony do krzywej progowej, natomiast dla wysokich poziomów głośności krzywe te stają się bardziej płaskie. Ponadto z powyższego rysunku krzywych widać, że odbierana głośność w wyraźny sposób zmienia się w zależności od poziomu ciśnienia akustycznego i częstotliwości. Przykładowo: dla poziomu ciśnienia akustycznego równego 30 dB i częstotliwości wynoszącej 1000 Hz, poziom głośności uzyskuje wartość 30 fonów. Natomiast aby uzyskać ten sam poziom głośności dla 20 Hz, poziom ciśnienia akustycznego musi być zwiększony o około 60 dB [2,3,4,8,18].

Częstotliwość fali – wysokość dźwięku

Częstotliwość f fali dźwiękowej jest tą samą częstotliwością, z którą drga źródło fali. Częstotliwość jest odwrotnością okresu T drgań, a jej jednostką jest herc (Hz). Częstotliwość fali akustycznej decyduje o odczuciu wysokości dźwięku. Dźwięki o dużych częstotliwościach są dźwiękami wysokimi, natomiast dźwięki o małych częstotliwościach są dźwiękami niskimi [8].

Zakres słyszalnych częstotliwości dla ucha ludzkiego rozciąga się od 16 Hz do 20 kHz. Drgania o częstotliwości niższych od 16 Hz to infradźwięki, natomiast drgania o częstotliwości wyższej od 20 kHz to ultradźwięki. Nie są one słyszalne przez ucho ludzkie.

Próg zmiany częstotliwości, czyli najmniejsza dostrzegalna zmiana częstotliwości wynosi około 0,3%. Oznacza to, że ucho jest zdolne zauważyć zmianę wysokości, jeżeli częstotliwość słyszanego tonu zmieni się o 0,3%, np. ton 1000 Hz musiałby się zmienić o 3 Hz, żeby zmiana została zauważona [8,11].

Widmo fali dźwiękowej – barwa dźwięku

Dźwięki, które docierają do ucha można podzielić na dwie zasadnicze kategorie. Do pierwszej z nich zalicza się tony (dźwięki proste), czyli fale akustyczne o określonej amplitudzie i częstotliwości. Do drugiej kategorii zaliczymy dźwięki złożone, czyli dźwięki powstałe przez

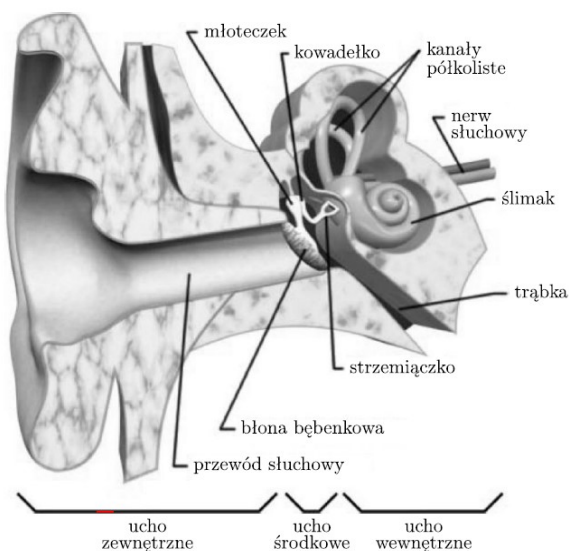
złożenie wielu tonów o różnych amplitudach i częstotliwościach. Zdecydowaną większość spośród dźwięków docierających do naszych uszu stanowią dźwięki złożone. Każdy z nich może być przedstawiony jako kombinacja tonów. Jest to tak zwane widmo dźwięku.

Widmo dźwięku – cecha fizyczna, jest tym co decyduje o wrażeniu barwy lub brzmieniu dźwięku. Barwa dźwięku jest tym atrybutem wrażenia słuchowego, względem którego słuchacz może ocenić dwa stałe w czasie dźwięki złożone o tej samej głośności, wysokości i czasie trwania jako niepodobne [8]

BUDOWA I FUNKCJONOWANIE UKŁADU SŁUCHOWEGO

Droga fali akustycznej w układzie słuchowym

Zanim zaburzenie ośrodka wywoła wrażenie słuchowe identyfikowane jako dźwięk musi przebyć skomplikowaną drogę. Fala dźwiękowa, nakierowana do kanału słuchowego przez małżowinę uszną, powoduje drgania błony bębenkowej. Te z kolei są przenoszone poprzez system kosteczek słuchowych (młoteczek, kowadełko i strzemiączko) do ślimaka – kostnego kanału wypełnionego płynem i skręconego w taki sposób, że przypomina muszlę. Wewnątrz ślimaka zostają wprowadzone w ruch rzęski komórek słuchowych. Komórki te zamieniają drgania mechaniczne na impulsy nerwowe czyli sygnały elektryczne. Impulsy te biegną dalej nerwem słuchowym do kory mózgowej, gdzie następuje ich analiza. Wszystkie te elementy stanowią peryferyjny układ słuchowy, który przedstawia rysunek 2.1.



Rys. 2.1. Peryferyjny układ słuchowy człowieka [5]

Fizjologia narządu słuchu

Ucho, które jest podstawową częścią narządu słuchu, składa się z trzech głównych części: ucha zewnętrznego, ucha środkowego i ucha wewnętrznego.

Ucho zewnętrzne

Zasadniczym zadaniem ucha zewnętrznego jest zbieranie dźwięków i przeniesienie ich z otaczającej nas przestrzeni do ucha środkowego. Na ucho zewnętrzne składa się małżowina uszna i przewód słuchowy zewnętrzny, które wraz z zamykającą go błoną bębenkową tworzą komorę o częstotliwości rezonansowej około 2,5 kHz wzmacniającą dźwięki z przedziału 2-4 kHz o około 10 dB. Małżowina uszna także wzmacnia dźwięki o 5-7 dB z przedziału częstotliwości 4-7 kHz. Poza wzmocnieniem dźwięku ucho zewnętrzne odgrywa również rolę w lokalizacji źródeł dźwięku, pozwala rozróżnić dźwięki dochodzące z przodu od dźwięków dochodzących z tyłu [3,5,8].

Ucho środkowe

Ucho środkowe znajduje się w wypełnionej powietrzem jamie bębenkowej i składa się z zespołu kosteczek słuchowych: młoteczka, przyczepionego do błony bębenkowej, kowadełka i

strzemiączka, które zamyka okienko owalne ślimaka ucha wewnętrznego. Fala dźwiękowa wprawia w drganie błonę bębenkową wraz z młoteczką. Drgania młoteczka są przekazywane przez kowadełko do strzemiączka i jego podstawy zamykającej okienko owalne.

Ucho środkowe stanowi układ transformacyjny, ponieważ jego zadaniem jest zamiana fali dźwiękowej rozchodzącej się w powietrzu na drgania podstawy strzemiączka mogące pobudzić cieczę ślimaka. Transformacja ta nazywana jest **wyrównaniem impedancji** i polega przede wszystkim na zwiększeniu ciśnienia wywieranego na płyn ślimakowy przez podstawę strzemiączka w stosunku do ciśnienia, działającego na błonę bębenkową. Zwiększenie ciśnienia jest możliwe dzięki kosteczkom słuchowym, które tworzą system dźwigni wzmacniający drgania, a także dzięki temu, że powierzchnia błony bębenkowej wynosi około 80 mm^2 , a pole powierzchni okienka owalnego tylko 3 mm^2 . W związku z tym dana siła na bębenku jest redukowana w stosunku $80/3$, czyli około 27 razy [7,8]. Dopasowanie impedancji przez ucho środkowe jest najlepsze w zakresie średnich częstotliwości (1-4 kHz) i dlatego też w tym zakresie ucho jest najbardziej czułe [3,5,8].

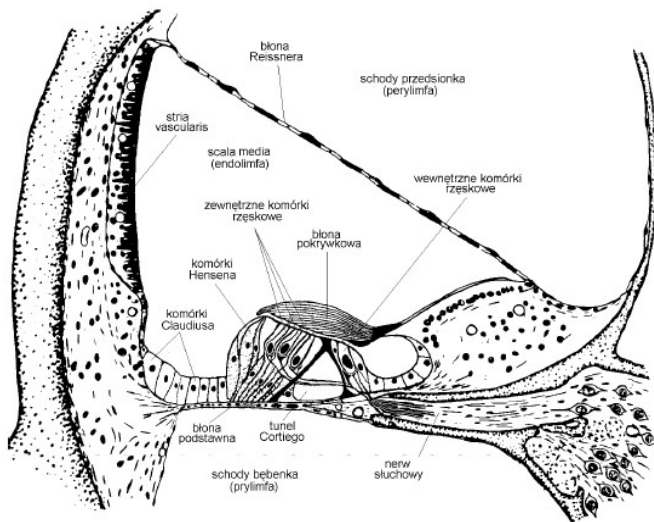
Dodatkową funkcją układu kosteczek jest **ochrona ucha wewnętrznego przed dźwiękami o zbyt dużym natężeniu** i małych częstotliwościach. Jest to możliwe dzięki tak zwanemu odruchowi strzemiączkowemu, który wywołuje skurcz mięśnia napinacza błony bębenkowej i mięśnia strzemiączkowego. Skutkiem tego jest zmiana położenia młoteczka i strzemiączka oraz usztywnienie systemu przenoszącego drgania. Dzięki temu głośność dźwięku może się zmniejszyć nawet o 40 dB [5,7,8].

Aby ucho środkowe prawidłowo funkcjonowało, w jamie bębenkowej musi panować takie samo ciśnienie jak na zewnątrz organizmu. Możliwe jest to dzięki istnieniu trąbki słuchowej (trąbki Eustachiusza). Jest to przewód łączący jamę bębenkową z częścią nosową gardła, którego światło, ze względu na specyficzną budowę, jest normalnie zamknięte i otwiera się tylko podczas ziewania czy połykania, wyrównując w ten sposób ewentualną różnicę ciśnień. Trąbka Eustachiusza służy również za system odwadniający w przypadku zakażenia ucha środkowego [3,5,8].

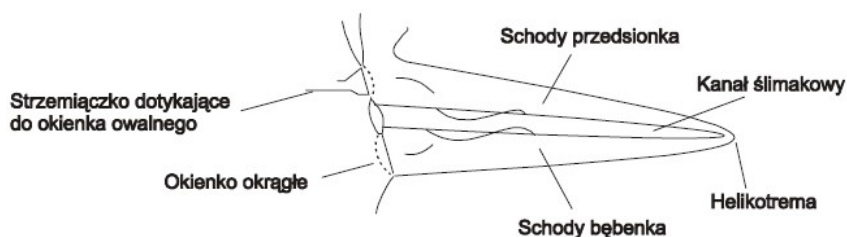
Ucho wewnętrzne

Ucho wewnętrzne, zwane także błędnikiem, zawiera ostatni odcinek układu przewodzącego dźwięki oraz receptory zmysłu słuchu i równowagi. Jest to najbardziej skomplikowany odcinek narządu słuchu. Część środkową błędnika stanowi przedsionek. Ku tyłowi od przedsionka położone są kanały półkoliste, zawierające narząd równowagi, zaś od przodu znajduje się ślimak, który jest zasadniczym elementem ucha wewnętrznego [3,7,17].

Ślimak jest zwężającą się strukturą kostną w kształcie rurki, która zwinięta jest w formie ślimaka i ma $2\frac{3}{4}$ zwoju. Za początek ślimaka przyjmuje się okienko owalne, do którego przylega strzemiączko, natomiast za jego koniec uważa się okienko okrągłe. Drgania cieczy ślimaka analizuje się na „rozwiniętym” ślimaku, co pozwala na lepszą wizualizację i pełniejsze zrozumienie zachodzących procesów. Przekrój poprzeczny ślimaka i przekrój podłużny rozwiniętego ślimaka przedstawione są poniżej:



Rys. 2.2. Przekrój poprzeczny narządu spiralnego [3]



Rys. 2.3. Przekrój podłużny rozwiniętego ślimaka [3]

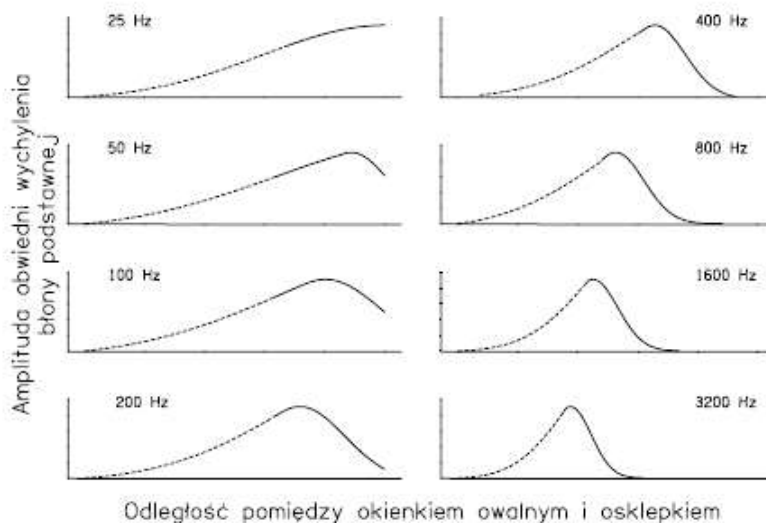
Przez całą długość ślimaka biegną dwie błony: podstawna i przedsionkowa (błona Reissnera), dzieląc go na trzy komory nazywane schodami bębenka i przedsionka oraz przewodem lub kanałem ślimakowym, które wypełnione są prawie nieściśliwymi cieczami.

Schody przedsionka i schody bębenka zawierają perylimfę i łączą się ze sobą na końcu ślimaka przez otwór – szparę osklepka (helikotrema). Przewód ślimakowy jest natomiast wypełniony endolimfą [3].

Procesy zachodzące w uchu wewnętrznym są bardzo złożone. Oscylacje strzemiączka są przenoszone przez okienko owalne do wnętrza ślimaka, zwiększając chwilową gęstość cieczy ślimaka w bezpośrednim sąsiedztwie okienka owalnego. To zaburzenie ciśnienia rozchodzi się wzdłuż ślimaka w kierunku szpary osklepka i dalej schodami bębenka do okienka okrągłego usytuowanego poniżej okienka owalnego. Zaburzenie gęstości cieczy, które propaguje się w schodach bębenka i przedsionka powoduje drgania błony podstawnej, na której rozmieszczone są komórki słuchowe. Drgania te przemieszczają się od podstawy do szczytu ślimaka tworząc tzw. fale biegnące. W ich wyniku błona podstawna podlega niewielkim odkształceniom, przemieszczającym się wraz z zaburzeniami ciśnienia perylimfy [3,5,11].

W przypadku gdy dźwiękiem wymuszającym jest ton, cykliczne zagęszczenia i rozrzedzenia perylimfy, propagujące się wzdłuż ślimaka, powodują cykliczne wychylenia znacznych obszarów błony podstawnej. Jednak nie cała błona podstawna drga w jednakowym stopniu: to, która część błony podatnej wychyla się w największym stopniu, zależy od częstotliwości dźwięku, amplituda zaś tych drgań zależy od natężenia dźwięku.

Błona podstawna ma 33-35 mm długości, a jej właściwości fizyczne nie są takie same na całej długości. U podstawy (bliżej okienka owalnego) błona ta jest wąska i sztywna, a w miarę przemieszczania się w kierunku szpary osklepka staje się coraz szersza i mniej sztywna. Na skutek tego położenie miejsca o największym wychyleniu jest ściśle związane z częstotliwością bodźca: dźwięki o wysokich częstotliwościach najsilniej wzbudzają obszary w pobliżu okienka owalnego, a dźwięki o niskich częstotliwościach – w pobliżu szpary osklepka, co schematycznie zilustrowano na poniższym rysunku.



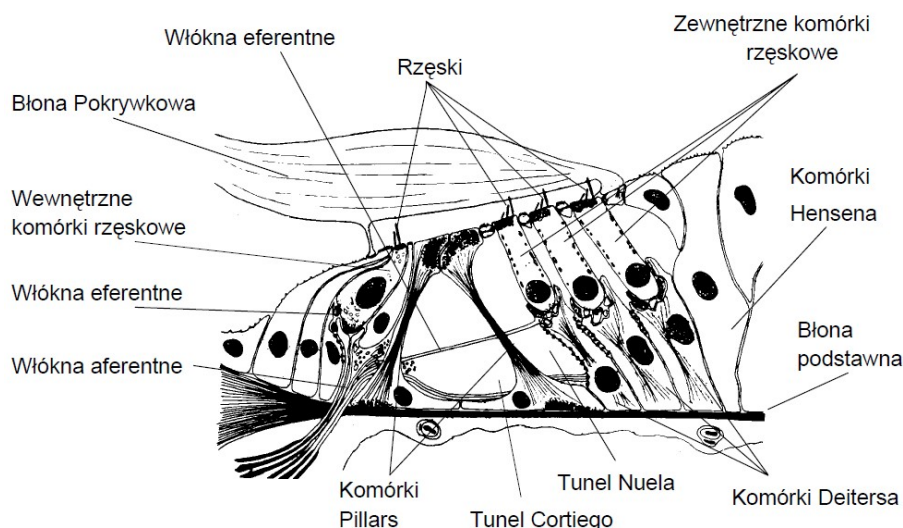
Rys. 2.4. Wychylenia błony podstawnej w zależności od częstotliwości [3]

Dzięki temu ślimak zachowuje się tak, jak analizator dźwięku: sygnał akustyczny złożony z tonów o różnych częstotliwościach i amplitudach pobudza w różnym stopniu różne obszary błony podstawnej. Ta właściwość ślimaka, pozwalająca nam w konsekwencji na percepcyjne rozseparowanie dwóch tonów o różnej częstotliwości. Analiza dźwięku zachodząca na błonie podstawnej nie jest jednak doskonała: jeśli częstotliwości dwóch tonów są nieznacznie różne to przedstawiony mechanizm analizy nie pozwala na ich percepcyjne rozseparowanie i słyszymy wówczas jeden dźwięk. Warto również dodać, że drgania błony podstawnej nie zmieniają się znacząco, gdy dźwięki docierają do ślimaka nie za pomocą strzemiączka (tak zwane przewodnictwo powietrzne), ale przez drgania kości czaszki (tak zwane przewodnictwo kostne) [3,11].

Proces przetwarzania - wzmacniacz ślimakowy

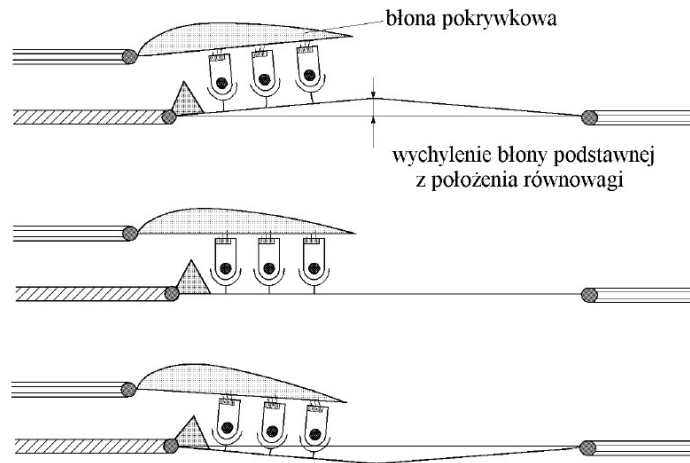
Aby wyjaśnić działanie wzmacniacza ślimakowego należy głębiej wniknąć w budowę i fizjologię ucha wewnętrznego. Fale powstające na błonie podstawnej są zamieniane na potencjały czynnościowe włókien nerwu słuchowego (impulsy neuronowe) w organie Cortiego, który usytuowany jest wzdłuż całej długości błony podstawnej, w środowisku dodatnio naładowanej endolimfy wypełniającej kanał ślimakowy. Przekrój poprzeczny organu Cortiego przedstawiono na rysunku 2.5.

Zasadniczymi elementami tego organu, z punktu widzenia omawianych zagadnień, są komórki rzęskowe wewnętrzne i zewnętrzne, umieszczone po obu stronach tzw. tunelu Cortiego oraz błona pokrywkowa znajdująca się nad tymi rzęskami.



Rys. 2.5. Poprzeczny przekrój organu Cortiego [3]

Wewnętrzne komórki rzęskowe u ludzi umieszczone są w jednym rzędzie, po wewnętrznej stronie tunelu Cortiego. Jest ich około 3500, a każda z nich ma około 40 tzw. rzęsek formujących proste rzędy (stereocilia). Rzęski te stanowią rodzaj przetwornika, w którym energia akustyczna jest zamieniana na wyładowania elektryczne. Do każdej z tych komórek dochodzi około 20 neuronów aferentnych, przekazujących impulsy elektryczne ze ślimaka na wyższe piętra drogi słuchowej i dalej do mózgu. Rzęski tych komórek nie mają najprawdopodobniej styczności z błoną pokrywkową, która jest utwierdzona po swej wewnętrznej stronie. Ruchy błony podstawnej w górę i w dół, przedstawione schematycznie na rys. 2.6., powodują cykliczne zbliżanie organu Cortiego i błony pokrywkowej oraz powstawanie pomiędzy nimi sił ścinających. Dzięki temu bezpośredni kontakt rzęsek wewnętrznych komórek rzęskowych z błoną pokrywkową staje się bardziej możliwy i prowadzi do przeginięcia rzęsek raz w jedną raz w drugą stronę. Przeginięcie to połączone jest z cyklicznym otwieraniem i zamykaniem kanałów jonowych znajdujących się w rzęskach, którymi do ujemnie spolaryzowanych komórek rzęskowych mogą napływać dodatnie jony potasu z endolimfy wypełniającej kanał ślimakowy.



Rys. 2.6. Trzy fazy ruchu błony podstawnej i ich wpływ na przegięcie rzęsek [3]

Wywołane w ten sposób chwilowe zmiany potencjału komórek rzęskowych odbierane są przez synapsy włókien neuronowych i w postaci impulsów transmitowane do wyższych pięter układu słuchowego. Większość informacji o bodźcu akustycznym, dostępna na różnych piętrach drogi słuchowej, pochodzi wyłącznie z wewnętrznych komórek rzęskowych [3,5,8].

Zewnętrzne komórki słuchowe spełniają zupełnie inną funkcję. Uporządkowane są w pięciu rzędach, umieszczonych po zewnętrznej stronie tunelu Cortiego. Jest ich około 25000, a każda z nich ma około 140 rzęsek uformowanych w kształcie litery V. Do komórek tych dochodzi około 1800 neuronów eferentnych, tj. takich, które przekazują sygnały z mózgu. Organ Cortiego odpowiedzialny jest więc zarówno za transmisję informacji o fali dźwiękowej do mózgu jak i za odbieranie sygnałów z centralnego układu nerwowego. Ponadto komórki te charakteryzują się kurczliwością pod wpływem zmian potencjału: wzrost potencjału powoduje ich skrócenie. To właśnie kurczliwość, którą obserwuje się dla bodźców o częstotliwości do kilkunastu kiloherców, stanowi podstawę wzmacniacza ślimakowego.

Mechanizm ten funkcjonuje następująco. Jak już powiedziano, ruchy błony podstawnej w górę i w dół powodują zbliżanie się organu Cortiego i błony pokrywkowej oraz powstanie sił ścinających na styku tych organów. Siły te powodują m.in. przeginięcie rzęsek zewnętrznych komórek rzęskowych raz w jedną raz w drugą stronę. Przeginięcie to powoduje cykliczne otwieranie i zamykanie kanałów znajdujących się w rzęskach, którymi mogą napływać dodatnie jony potasu do ujemnie spolaryzowanych komórek rzęskowych. Ruch błony podstawnej ku górze połączony jest z otwarciem kanałów jonowych, dzięki czemu dodatnie jony potasu z endolimfy napływają do zewnętrznych komórek rzęskowych. Jony te powodują wzrost potencjału komórek, a w związku z ich kurczliwością – również ich skrócenie. Skrócenie to jest największe w szczytowych wychyleniu błony podstawnej, kiedy kanały jonowe są maksymalnie otwarte. Skrócenie zewnętrznych komórek rzęskowych prowadzi do lepszego zbliżenia wewnętrznych komórek rzęskowych i błony pokrywkowej, a więc do znacznie bardziej intensywnego stymulowania ich. W konsekwencji obserwuje się też zwiększenie liczby impulsów czynnościowych neuronów unerwiających te komórki. Kurczliwość zewnętrznych komórek rzęskowych ma zasadnicze znaczenie zwłaszcza w przypadku najcichszych dźwięków, bowiem to właśnie dzięki temu mechanizmowi możemy je w ogóle usłyszeć. Gdyby kurczliwość zewnętrznych komórek rzęskowych nie istniała, wówczas wygenerowanie impulsu we włóknach dochodzących do wewnętrznych komórek rzęskowych wymagałoby znacznie większego wychylenia błony podstawnej, a więc i większego natężenia dźwięku. Podsumowując, uważa się, że o ile wewnętrzne komórki słuchowe działają jako główne komórki receptorowe układu słuchowego, to zewnętrzne komórki słuchowe działają jako komórki motoryczne wzmacniające ruch błony podstawnej. Widać stąd, że zewnętrzne komórki rzęskowe odgrywają w słyszeniu bardzo istotną rolę, a zanik ich cech elektromotorycznych cech oznacza upośledzenie wzmacniacza ślimakowego i prowadzi do tzw. odbiorczego upośledzenia słuchu.

Odbiorcze upośledzenie słuchu, oprócz podwyższenia progów słyszalności, wiąże się ze znaczącym pogorszeniem zrozumiałości mowy prezentowanej na tle szumu [3,5,7].

Nerw słuchowy

Zasadnicza część informacji o sygnale akustycznym dostępna w nerwie słuchowym, który wchodzi w skład VIII nerwu czaszkowego, pochodzi z komórek rzęskowych wewnętrznych. Do każdej z tych komórek dochodzi ok. 20 neuronów aferentnych, przy czym każdy z nich dochodzi wyłącznie do jednej komórki. Dzięki temu informacja o aktywności poszczególnych wewnętrznych komórek rzęskowych transmitowana jest do wyższych pięter układu słuchowego za pomocą 25-30 tys. neuronów stanowiących niezależne kanały informacji.

Kodowanie wysokości tonów w nerwie słuchowym odbywa się na zasadzie częstotliwości i na zasadzie miejsca. Według zasady miejsca, dźwięk o określonej częstotliwości odkształca błonę podstawną w określonym miejscu, a liczba pobudzanych włókien nerwu słuchowego zależy od poziomu natężenia dźwięku. Warto wspomnieć, iż tony o różnej intensywności powodują pobudzanie komórek w mniejszym lub większym obszarze błony podstawnej, ponieważ pobudzenie błony podstawnej nie jest w takich sytuacjach „punktowe”. Można więc oczekiwać, że wiele neuronów dochodzących do pobudzonych komórek rzęskowych będzie również wykazywało pewną aktywność, wyrażaną zazwyczaj liczbą impulsów czynnościowych na sekundę. Zatem informacja o częstotliwości dźwięku zamieniana jest (kodowana) na pobudzenie określonej grupy neuronów dochodzących do komórek rzęskowych znajdujących się w określonych obszarach błony podstawnej, natomiast informacja o natężeniu dźwięku zawarta jest przede wszystkim w liczbie impulsów czynnościowych neuronu na sekundę, czyli częstotliwości jego wyładowań. Nie ma jednak prostej zależności pomiędzy natężeniem, a liczbą impulsów czynnościowych w jednostce czasu: wzrost natężenia prowadzi bowiem w ogólności do wzrostu częstotliwości wyładowań neuronów.

Liczba impulsów czynnościowych na sekundę w poszczególnych neuronach nie jest jedyną informacją o bodźcu dostępną w nerwie słuchowym. Dla częstotliwości bodźca akustycznego mniejszych od 5 kHz czasowy przebieg wyładowań neuronów odzwierciedla strukturę czasową bodźca. Jest to zasada częstotliwości według której częstotliwość wyładowań w nerwie słuchowym odpowiada ściśle częstotliwości fali dźwiękowej. Wyładowania te mają tendencję do występowania dla ściśle określonej fazy bodźca akustycznego, choć nie muszą występować w każdym okresie bodźca. Zjawisko to nazywane jest synchroniznością fazową. Zatem interwały czasowe między kolejnymi wyładowaniami są całkowitymi wielokrotnościami okresu bodźca. Odstępy te zawierają jednoznacznie informację o częstotliwości sygnału. Wydaje się, że dokonując określenia częstotliwości sygnału nasz układ słuchowy może bazować na informacji o tym, które z neuronów są aktywne oraz na odstępach czasowych pomiędzy impulsami w aktywnych neuronach. Warto też podkreślić, że synchronizność fazowa nie jest obserwowana dla częstotliwości powyżej 4-5 kHz. Granica ta związana jest z czasem, po którym przywracany jest stały, ujemny potencjał komórek rzęskowych. W przypadku tych częstotliwości okresy czasu pomiędzy kolejnymi otwarciem kanałów jonowych są zbyt krótkie, aby w komórkach tych potencjał powrócił do swej pierwotnej wartości. Stała depolaryzacja tych komórek powoduje, że neurony generują impulsy w przypadkowych chwilach czasu.

Podsumowując, synchronizność fazowa odgrywa zasadniczą rolę w lokalizacji źródeł dźwięku, percepcji wysokości, dyskryminacji częstotliwości oraz w dyskryminacji natężenia dźwięków. Różnicowanie intensywności dźwięków odbywa się w ośrodkach podkorowych, natomiast identyfikacja i zróżnicowanie wzorców dźwiękowych oraz lokalizowanie źródła dźwięku odbywa się w okolicy słuchowej kory mózgowej [3,5,7,18].

RODZAJE BADAŃ AUDIOMETRYCZNYCH

Audiometria to dział medycyny zajmujący się pomiarami słuchu. Audiometrię możemy podzielić na subiektywną i obiektywną ze względu na rodzaj udziału w pomiarze osoby badanej. W audiometrii obiektywnej korzysta się z odruchów warunkowych lub bezwarunkowych zachodzących u człowieka pod wpływem oddziaływania dźwięku. Te odruchy wywołane bodźcami akustycznymi to m.in. pocenie się skóry, zmiana impedancji akustycznej oraz zmiana ciśnienia. Są one wykorzystywane przede wszystkim do badań dzieci lub osób chorych umysłowo. W audiometrii subiektywnej konieczna jest chęć i możliwość współpracy pacjenta z osobą badającą oraz zrozumienie rodzaju współpracy. Podstawą audiometrii subiektywnej są wrażenia słuchowe badanego. Audiometrię subiektywną możemy podzielić na audiometrię tonalną, audiometrię słowną i audiometrię nadprogową [14,22].

AUDIOMETRIA SUBIEKTYWNA

Audiometria tonalna

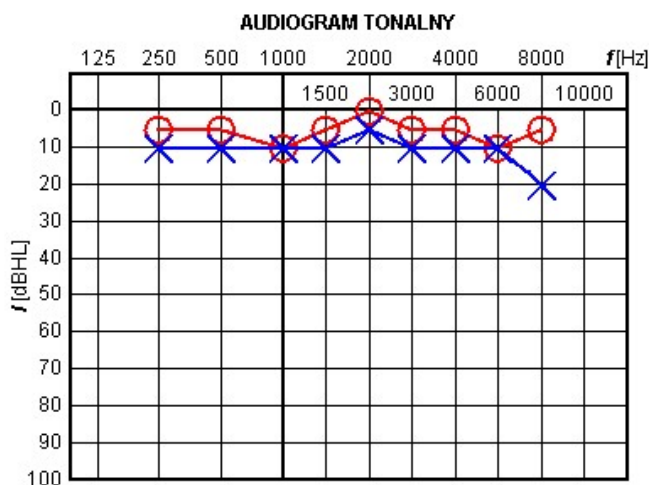
Najpopularniejszym i podstawowym badaniem pozwalającym ocenić stan narządu słuchu jest audiometria tonalna. Podstawą tego rodzaju audiometrii są wrażenia słuchowe badanego i zdejmowane na tej podstawie krzywe słyszalności. Wrażenie słuchowe zależne jest od częstotliwości i natężenia słyszanych dźwięków.

Głównym celem audiometrii tonalnej jest ocena progu słyszenia, dzięki czemu można określić rodzaj i głębokość upośledzenia tego zmysłu. Badanie to jest wykonywane w specjalnej, wyciszonej kabinie pomiarowej bądź w przypadku braku takiego pomieszczenia przyjmuje się jako dopuszczalny, przy wykonywaniu badań diagnostycznych, poziom natężenia dźwięku w pomieszczeniu nie wyższy niż 30 dB. Audiometria tonalna wykonywana jest rutynowo za pomocą przyrządu zwanego audiometrem. Są to generatory częstotliwości akustycznych, regulowane i skalowane względem natężenia i częstotliwości dźwięku. Wyniki tego badania są prezentowane w formie tzw. audiogramu. W zależności od tego, jaką drogą dźwięk dociera do ucha rozróżnia się progi słyszenia przewodnictwa powietrznego i przewodnictwa kostnego [19, 24,25].

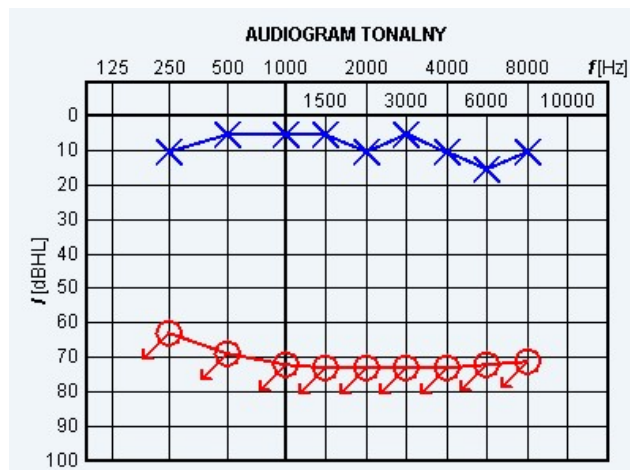
Przewodnictwo powietrzne

Badanie audiometryczne tonalne przewodnictwa powietrznego wykonywane jest przy pomocy zwykłych słuchawek nałożonych na uszy. W czasie tego badania do ucha pacjenta podawany jest sygnał o określonej częstotliwości z zakresu od 125 Hz do 8 kHz, podczas gdy poziom natężenia tego sygnału jest stopniowo zwiększany. Zadaniem pacjenta jest zasygnalizowanie przez naciśnięcie przycisku, momentu, w którym usłyszy jakiś dźwięk. Intensywność najcichszego możliwego do usłyszenia dźwięku określa próg słyszenia. Próg słyszenia jest określany poprzez stopniowe wzmacnianie tonu – metoda wstępująca, lub przez jego osłabienie – metoda zstępująca. W audiometrii tonalnej próg słyszenia określa się przy kilku różnych częstotliwościach dźwięku. Dlatego też najistotniejsze podczas tego badania jest reagowanie nawet na dźwięki, które usłyszy się cicho. Badanie ma na celu oznaczenie jak najcichszych dźwięków, jakie są odbierane przez ucho.

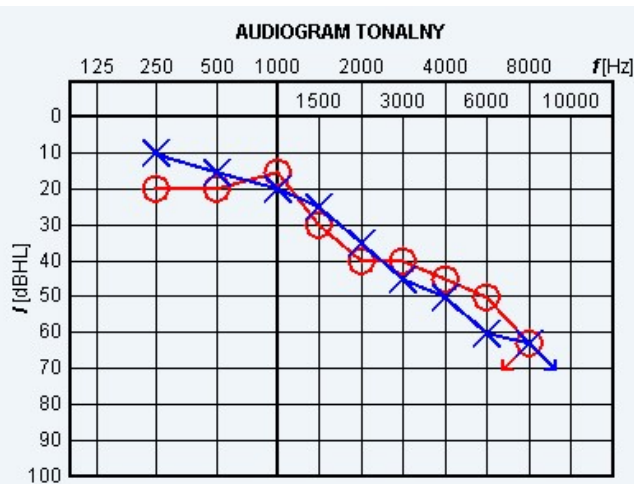
Poniżej zaprezentowano typowe krzywe progowe charakterystyczne dla wybranych jednostek chorobowych. Krzywa czerwona (z kółkami) określa próg słyszenia dla ucha prawego, natomiast krzywa niebieska (z krzyżykami) opisuje próg słyszenia w uchu lewym. **Słuch w granicach normy** rozpoznajemy, gdy próg słyszenia nie przekracza **25 dB** przy wszystkich badanych częstotliwościach [22,24].



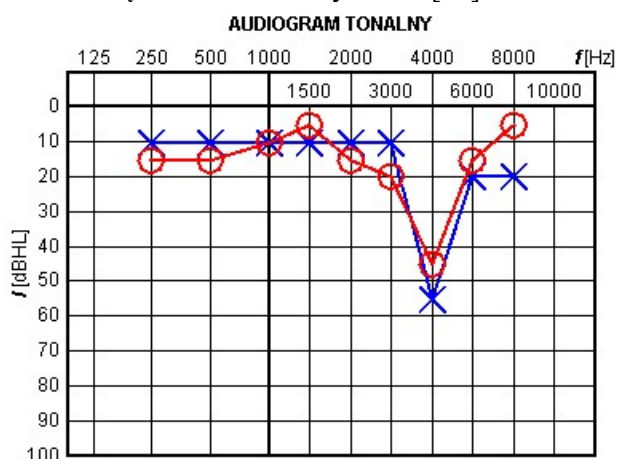
Rys. 3.1. Słuch w granicach normy [24]



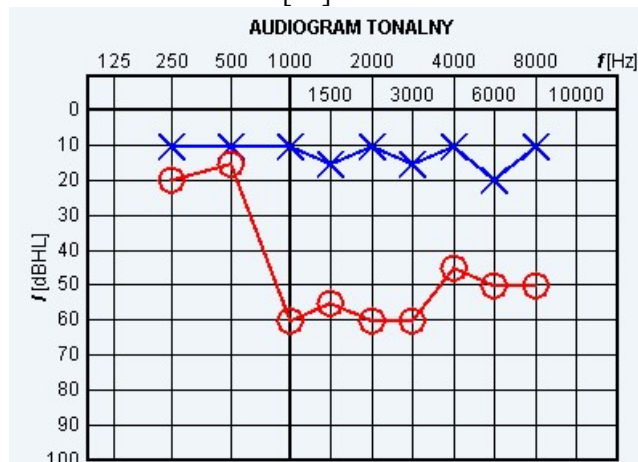
Rys. 3.4. Głuchota jednostronna po stronie prawej [24]



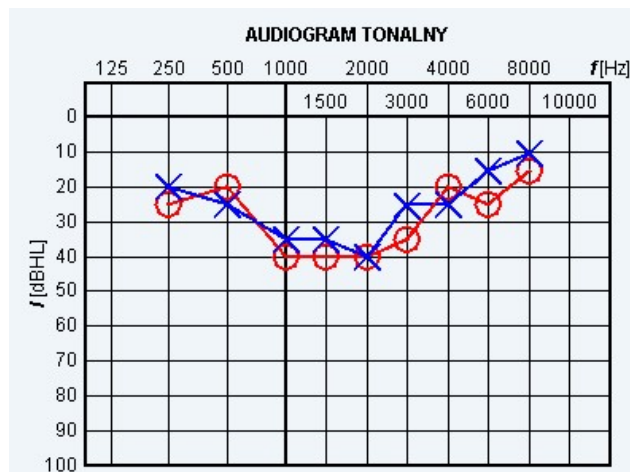
Rys. 3.3. Starzenie się narządu słuchu.
Symetryczny ubytek słuchu przy
częstotliwościach wysokich [24]



Rys. 3.2. Uraz akustyczny. Charakterystyczny
ubytek słuchu przy częstotliwości 4kHz [24]



Rys. 3.5. Guz nerwu ślimakowego po stronie
prawej [24]

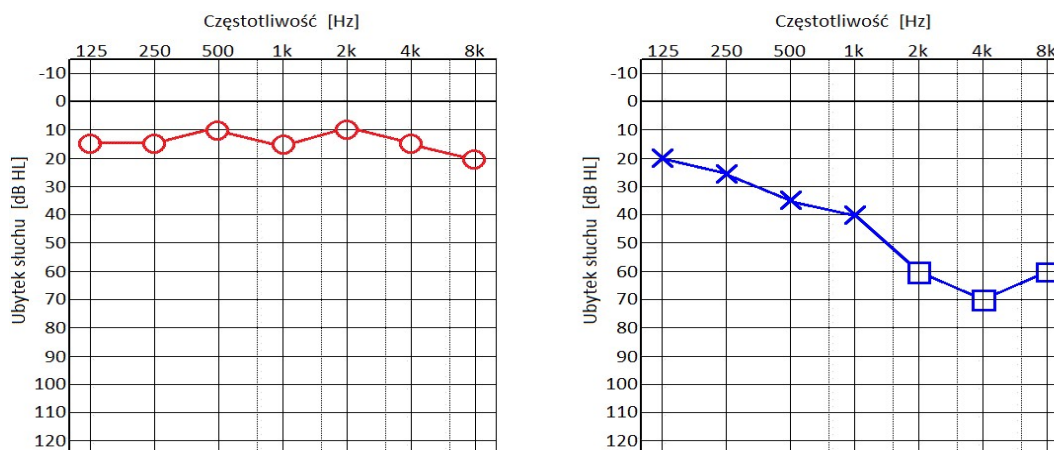


Rys. 3.6. Niedosłuch uwarunkowany genetycznie
[24]

Audiometry posiadają również niezależny kanał umożliwiający wytwarzanie tzw. szumu akustycznego, nakładanego na sygnał służący do diagnostyki. Badanie to określamy jako audiometrię tonalną z maskowaniem. Przebiega ono podobnie jak zwykle badanie, z tym

wyjątkiem, iż podczas badania słyszalności jednego ucha, na drugie ucho działają szumy. Pacjent nadal musi reagować na usłyszany dźwięk, szum natomiast ma za zadanie wykluczenie jednego ucha, gdyż przez drgania czaszki dźwięk może być podawany na drugie ucho i tym samym błędnie wskazywać poziom ubytku słuchu w badanych uchu.

Skuteczne wyłączenie ucha niebadanego jest jednym z bardziej skomplikowanych zagadnień audiologii. Prawidłowe maskowanie musi całkowicie eliminować ucho niebadane oraz nie może obniżać słuchu w uchu badanym. Najczęstszym sposobem maskowania ucha niebadanego jest zagłuszanie tzw. szumem białym, czyli mieszaniną wszystkich częstotliwości spektrum akustycznego o tym samym natężeniu. Innym sposobem jest szum wąskopasmowy skoncentrowany wokół częstotliwości podawanej aktualnie na drugie ucho. Na poniższym rysunku przedstawione są audiogramy badania przewodnictwa powietrznego z maskowaniem [14,21,22].

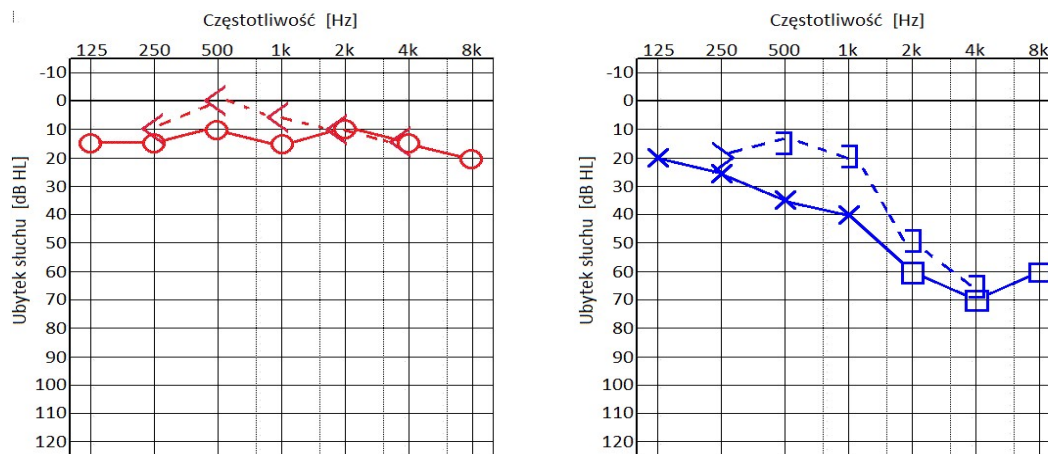


Rys. 3.7. Badanie audiometryczne przewodnictwa powietrznego z maskowaniem (niebieskie kwadraty).
Widoczny niedosłuch ucha lewego [19]

Przewodnictwo kostne

Przewodnictwo kostne badane jest za pomocą specjalnej słuchawki kostnej umieszczonej za uchem na tzw. wyrostku sutkowatym badanego ucha, bądź na czole pacjenta. Słuchawka ta emituje vibracje, które są przenoszone tzw. drogą kostną, poprzez kości czaszki, bezpośrednio do ślimaka (ucho wewnętrzne), z pominięciem ucha zewnętrznego i środkowego. W ten sposób odbierane są dźwięki. Najważniejszy jest fakt, że dźwięki brzmią tak samo, jak przez zwykłe słuchawki, jednak badania tego dokonuje się w węższym paśmie częstotliwości niż dla przewodnictwa powietrznego, a mianowicie w zakresie 250 Hz do 4 kHz. Wyniki oznaczane są symbolami czerwonymi "<" dla ucha prawego i niebieskimi ">" dla ucha lewego. Oznaczenia łączone są linią przerywaną.

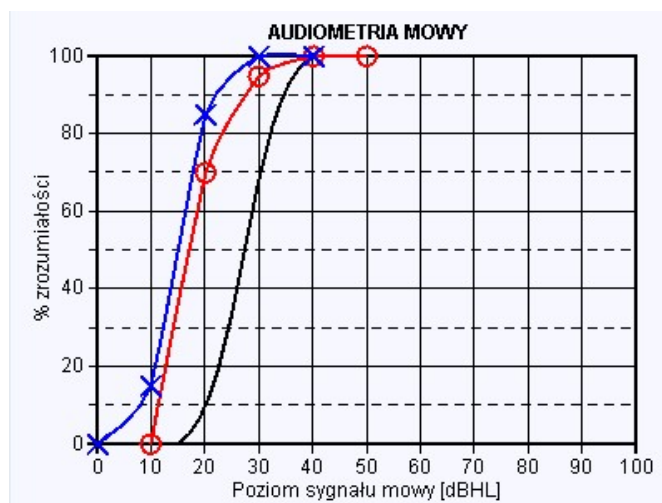
Podobnie, jak w przypadku badań przewodnictwa powietrznego i tu czasami musi być wykonane maskowanie. W tym celu na drugie ucho zakładana jest słuchawka klasyczna i słycać w niej szum. Oznaczenia zmieniają się na czerwony "[" dla ucha prawego i niebieski "]" dla ucha lewego. Poniżej przedstawione są audiogramy z dorysowanymi krzywymi przewodnictwa kostnego [19,25].



Rys. 3.8. Badanie audiometryczne przewodnictwa kostnego z maskowaniem.
Widoczny niedosłuch ucha lewego [19]

Audiometria słowna

Najprostszym, a jednocześnie wszechstronnym fizjologicznym sposobem badania narządu słuchu jest badanie mową, czyli audiometria słowna. Metoda ta pozwala określić stopień rozumienia mowy w zależności od intensywności dźwięków mowy. Wyróżniamy testy zrozumiałości mowy i testy zrozumiałości mowy w szumie. W audiometrii tej stosuje się przeważnie kilka rodzajów prób: listy liczb dwucyfrowych, listy wyrazów jednosylabowych, listy mieszane z wyrazów wielosylabowych i inne. Krzywa zrozumienia mowy jest procentem poprawnie zidentyfikowanych słów przy różnych intensywnościach dźwięku [18,24,26].



Rys. 3.9. Prawidłowa krzywa zrozumienia mowy [24]

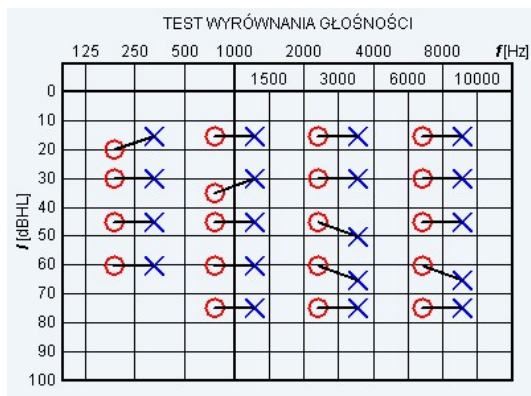
Audiometria nadprogowa

Audiometria nadprogowa ma za zadanie uzupełniać wyniki uzyskane z badań wykonanych w oparciu o audiometrię tonalną. Są to badania, w których stosowane są bodźce dźwiękowe o poziomie natężenia ponad progiem słyszalności osoby badanej [24,26].

Próba Fowlera

Jedną z metod badań w audiometrii nadprogowej jest tzw. próba Fowlera, czyli badanie jednakowego wrażenia głośności. Test ten opiera się na naprzemiennym dwuusznym wyrównywaniu głośności i może być wykonywany dla osób z jednostronnym ubytkiem słuchu. Podczas tego testu ten sam ton jest podawany naprzemiennie na jedno i drugie ucho. Poziom ciśnienia akustycz-

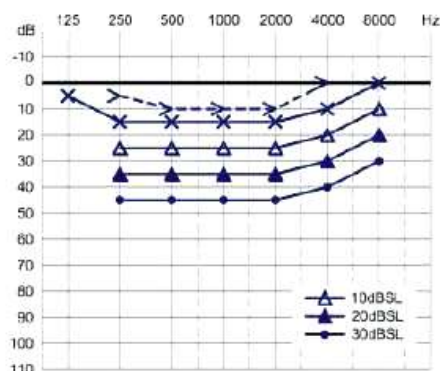
nego tonu w uchu o mniejszym ubytku słuchu ustala się na poziomie przewyższającym próg słyszenia o 10-20 dB. Zadaniem osoby badanej jest zrównanie głośności w obydwu uszach, przez regulację poziomu tonu w uchu z większym ubytkiem. Następnie zwiększa się poziom sygnału podawanego na ucho zdrowsze o 10 lub 20 dB i ponownie dokonuje się zrównania głośności. U osoby prawidłowo słyszącej różnice w intensywności dźwięków, które wywołują uczucie jednakowej głośności, wynoszące 5 dB należy przyjąć jako mieszczące się w normie.



Rys. 3.10. Objaw wyrównania głośności u osoby prawidłowo słyszącej [24]

Test Langenbecka

Kolejnym przykładem audiometrii obiektywnej jest test Langenbecka, czyli badanie przebiegu krzywej słyszenia w szumie. Podczas tego testu stosuje się maskowanie jednoczesne polegające na tym, iż oba sygnały- maskowany i maskujący są podawane w tym samym czasie do tego samego ucha. Sygnałem maskowanym jest ton z audiometrycznego zakresu częstotliwości, natomiast sygnałem maskującym szum biały lub wąskopasmowy. Przystępując do badań określa się najpierw krzywą progową słyszenia dla tonu, a następnie dla szumu. Badanie polega na zdjęciu krzywych odbioru tonu w obecności szumu, przy czym poziom szumu jest zwiększany w kolejnych krokach o 10 dB. Jak widać w teście tym niezbędny jest audiometr umożliwiający jednoczesne podanie do badanego ucha sygnału tonalnego i szumowego.

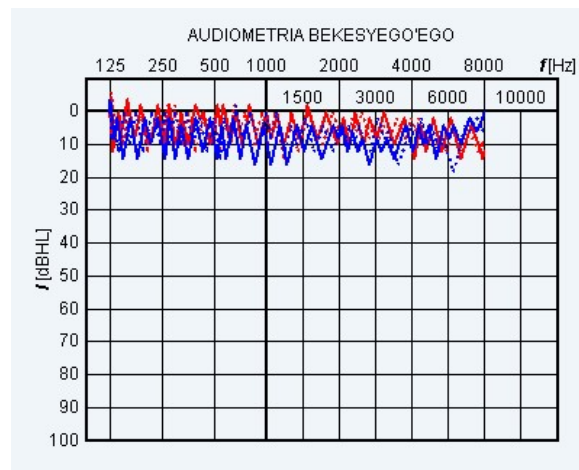


Rys. 3.11. Wyniki próby Langenbecka dla osób o słuchu normalnym [26]

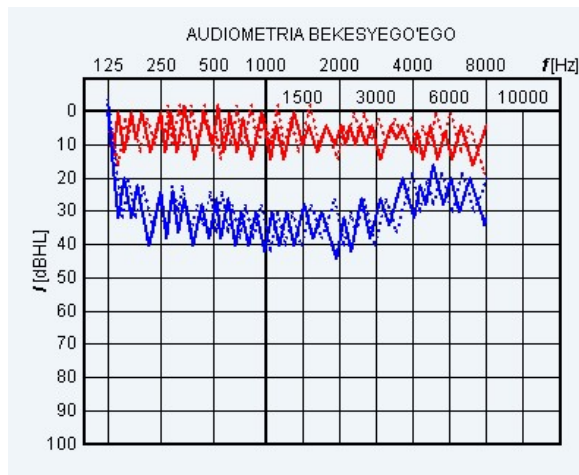
Audiometria Békésy'ego

Audiometria Békésy'ego pozwala określić krzywą progową w sposób automatyczny. Podobnie jak audiometria tonalna, jest ona testem audiologicznym umożliwiającym określenie progu słyszenia w zależności od częstotliwości dźwięku. Podczas badania prezentowany jest ton o zmieniającej się częstotliwości. Jeżeli osoba badana usłyszy dźwięk, sygnalizuje to przyciskając przycisk. Intensywność sygnału dźwiękowego jest wtedy stopniowo zmniejszana, aż dźwięk przestanie być słyszalny i przycisk zostanie zwolniony. Po puszczeniu przycisku intensywność sygnału dźwiękowego znowu wzrasta. Zostaje w ten sposób wykreślona krzywa ząbkowana, która określa próg słyszenia [18,24].

Kolor niebieski oznacza wykres dla ucha lewego, kolor czerwony dla ucha prawego.



Rys. 3.12. Słuch prawidłowy. Krzywa przerywana i ciągła nakładają się na siebie [24]



Rys. 3.13. Ubytek słuchu po stronie lewej.
Krzywa przerywana i ciągła nakładają się na siebie, lecz leżą znacznie poniżej 0dB [24]

Metoda SISI

Test SISI (Short Increment Sensitivity Index) jest to badanie różnicowania głośności, które służy do określenia zdolności różnicowania zmiany natężenia bodźca. W czasie tego testu podawany jest do badanego ucha ton o natężeniu 20 dB powyżej progu słyszenia o czasie trwania 5 s. Głośność podawanego tonu jest zmieniana skokowo o 1 dB co 0,2 s. Test obejmuje 20 przyrostów poziomu, stąd łączny czas trwania badania wynosi ok. 2 min dla jednej częstotliwości. Zadaniem pacjenta jest wykrycie momentu, w którym nastąpiła zmiana głośności. Następnie zliczane są odpowiedzi osoby badanej dotyczące spostrzeżonych zmian i przeliczane są one na procentową wartość zauważonych zmian [18,25,26].

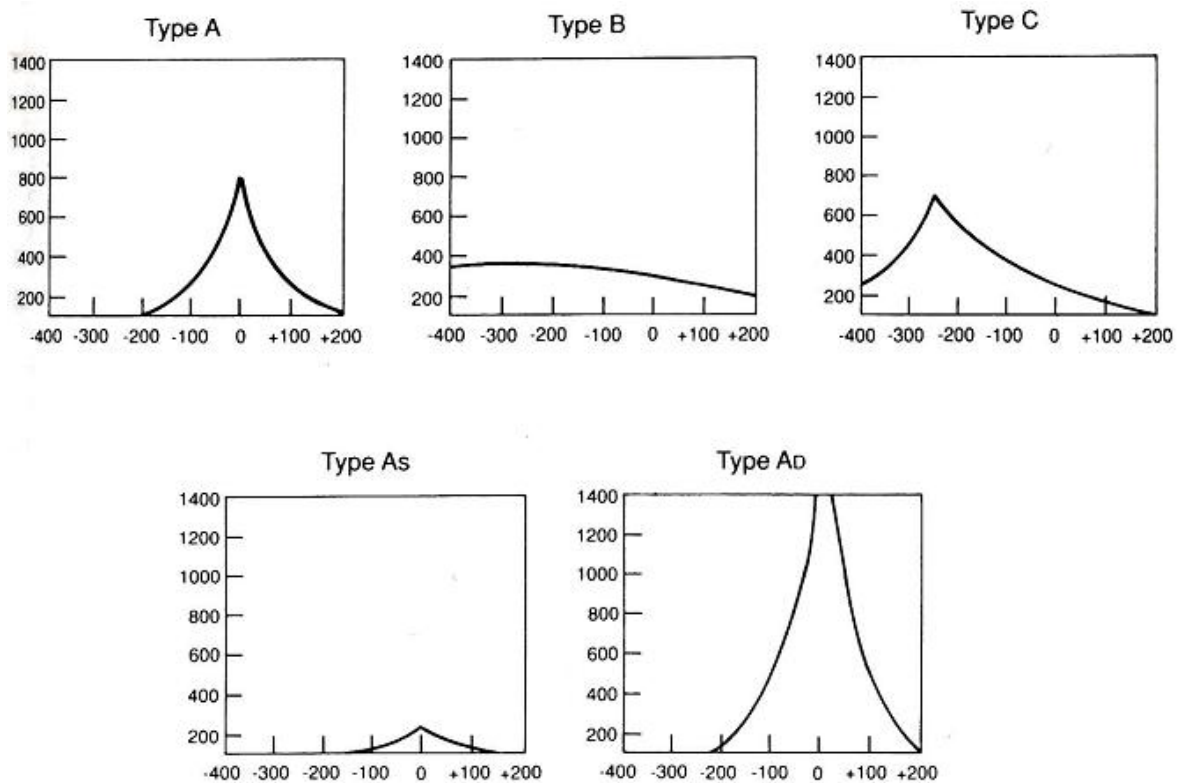
AUDIOMETRIA OBIEKTYWNA

Tympanometria (audiometria impedancyjna)

Jest to obiektywna, nieinwazyjna metoda badania ucha środkowego. Przy jej zastosowaniu mierzy się odbicie fali dźwiękowej od błony bębenkowej przy ustalonym ciśnieniu w zewnętrznym kanale słuchowym, a wyznacza impedancję akustyczną ucha (sztywność błony bębenkowej, podatności błony na zmiany ciśnienia w przewodzie słuchowym)

W kanale słuchowym ucha zewnętrznego umieszczana jest szczelna sonda ze słuchawką, mikrofonem i przewodem do regulacji ciśnienia. Za pomocą tej sondy ustala się ciśnienie w kanale słuchowym, wyższe lub niższe w stosunku do ciśnienie w uchu środkowym (różnica ciśnień

wyrażana jest w mm H₂O = daPa)). Następnie wysyłany jest impuls ciśnienia (impuls dźwiękowy) i rejestruje się odbitą falę dźwiękową od błony bębenkowej. Na podstawie charakterystyki fali odbitej wykreślane są tympanogramy, t.j. wykresy zależności podatności błony bębenkowej od ciśnienia w przewodzie słuchowym zewnętrznym. Na tej podstawie można zdiagnozować m.in. takie zaburzenia jak perforacja błony, obecność płynów w uchu środkowym, uszkodzenia funkcjonowania kosteczek ucha środkowego, nieprawidłowości odruchu strzemiączkowego. Podstawowe typy tympanogramów przedstawiono na rysunku 3.14



Rys. 3.14. Tympanogramy dla ucha normalnego (A) i zaburzonego: B – płyn w uchu środkowym; C – podciśnienie w uchu środkowym; A_s – ograniczona ruchomość kosteczek słuchowych; A_D – przerwany łańcuch kosteczek ucha środkowego lub częściowy zanik błony. Na osi poziomej zaznaczono wartość ciśnienia w zewnętrznym przewodzie słuchowym w daPa.

Otoemisja akustyczna

Jest to obiektywna metoda diagnostyczna pozwalająca wykrywać niedosłuch odbiorczy pochodzenia ślimakowego. W Polsce jest to badanie przesiewowe wykonywane na oddziale noworodkowym każdemu dziecku w drugiej dobie życia

Metoda oparta jest na zjawisku o tej samej nazwie.

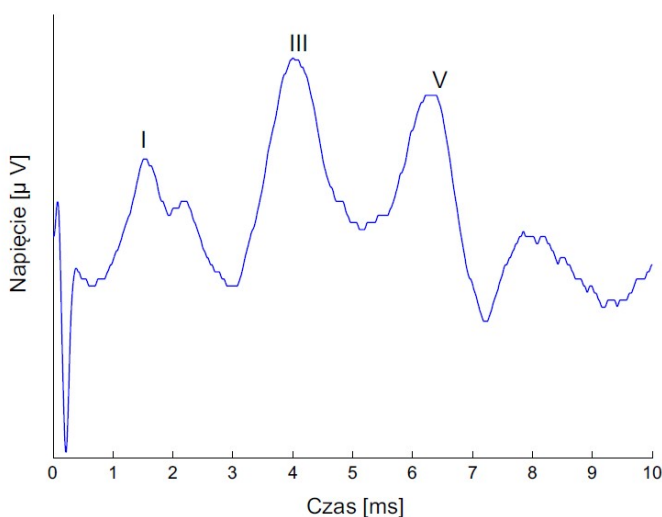
W uchu zewnętrznym badanego dziecka umieszczona zostaje sonda pomiarowa, w której znajduje się głośnik nadający dźwięk i czuły mikrofon. Do ucha generowany jest dźwięk (trzask), który dociera do ucha wewnętrznego (ślimaka) w wyniku czego rzęski wewnętrzne rejestrują go wychylając się, a zewnętrzne kurczą się. Komórki rzęsate (słuchowe) zewnętrzne generują przy tym bardzo cichy dźwięk, który wraca do ucha zewnętrznego i jest rejestrowany przez bardzo czuły mikrofon w słuchawce. Dzięki temu możliwa jest ocena czynności ślimaka i jego mikromechaniki.

Sluchowe potencjały wywołane pnia mózgu - ABR (*Auditory Brainstem Response*)

Po przetworzeniu akustycznego sygnału mechanicznego na sygnał elektryczny w ślimaku, jest on dalej przekazywany za pomocą nerwu słuchowego do mózgu. W odpowiedzi na bodziec słuchowy pojawia się bioelektryczna aktywność generowana w pniu mózgu.

Potencjalne uszkodzenie tej drogi i jego lokalizacja może być wykryte za pomocą rejestracji słuchowych potencjałów wywołanych pnia mózgu. Jest to badanie elektrofizjologiczne, będące odmianą elektroencefalografii (EEG). Po umieszczeniu trzech elektrod na głowie rejestruje się różnicę potencjałów elektrycznych między nimi po zadziałaniu bodźców akustycznych. Opóźnienie odpowiedzi elektrycznej na bodziec zależy od miejsca emisji w układzie nerwowym.

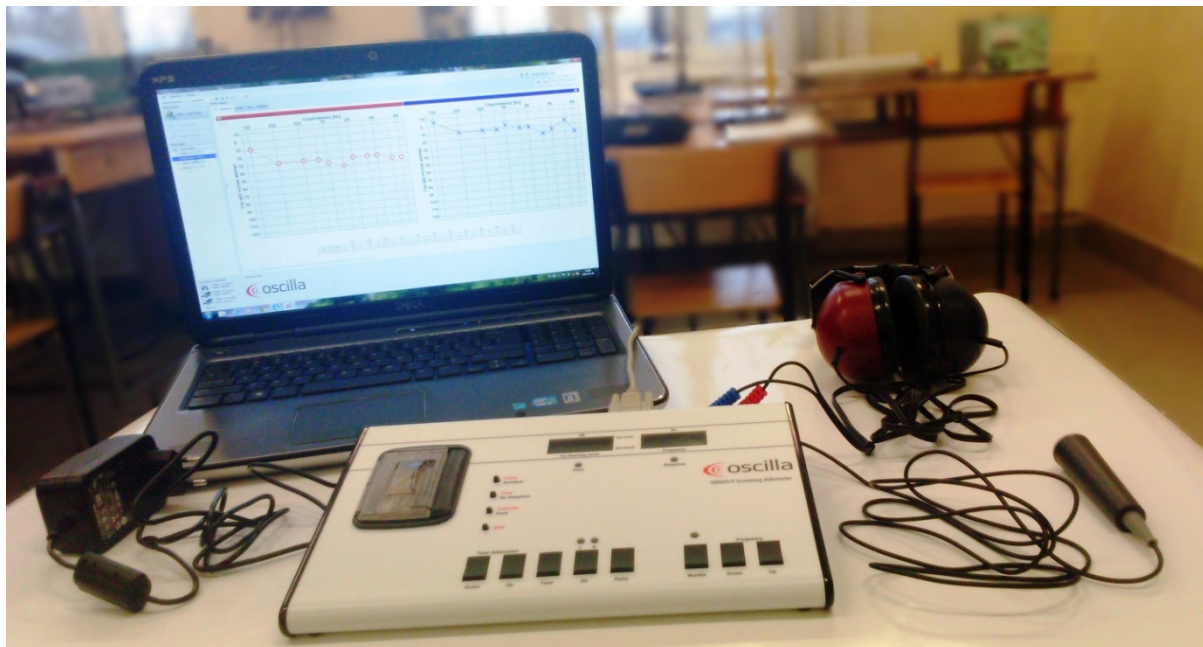
Wynik badania jest przedstawiany w formie wykresu (rysunek 3.15), z którego można wyczytać, jak pacjent reaguje na dźwięki. Na wykresie przedstawione są fale mózgowe pojawiające się do 10 ms po zadziałaniu bodźca, oznaczone cyframi rzymskimi od I do V (lub VII). Każda fala odpowiada konkretnemu odcinkowi drogi słuchowej, od ślimaka do pnia mózgu. U zdrowego człowieka amplituda i miejsce występowania poszczególnych fal nie zależy od siły bodźca, ani od stanu czuwania i snu. Zaburzenia słuchu są uwidocznione poprzez zmienione amplitudy fal. Najważniejsze w badaniu jest pojawienie się fali V, która świadczy o tym, że dźwięk dociera do kory mózgowej.



Rys. 3.15. Przykład zapisu ABR.

Audiometr Oscilla SM920-P

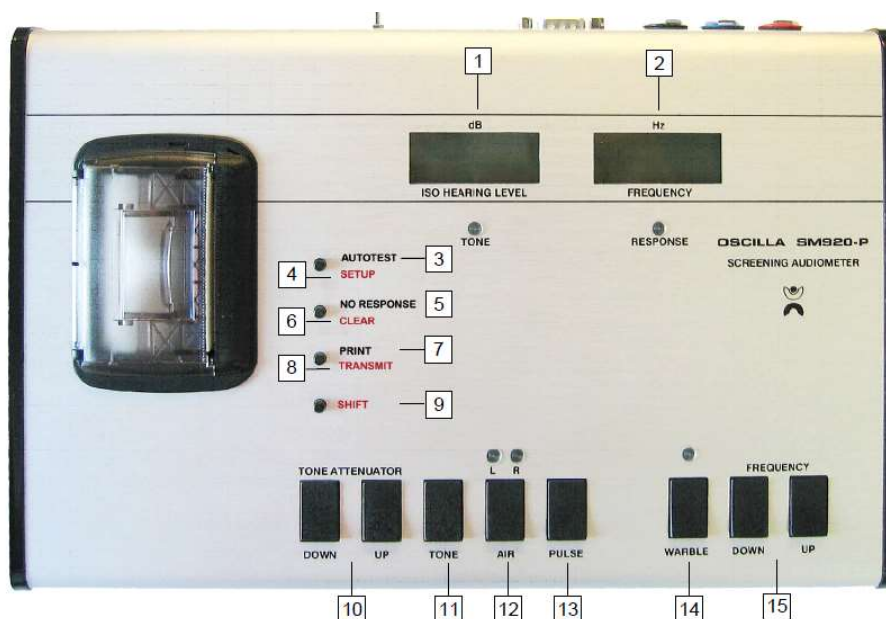
Pomiarów czułości ucha ludzkiego i ubytków słuchu dokonuje się za pomocą specjalnie w tym celu skonstruowanego aparatu zwanego audiometrem. Na rysunku 4.1 widzimy cały zestaw do badania audiometrycznego składający się z: audiometru Oscilla SM920-P, słuchawek, przycisku odpowiedzi i zasilacza. Ponadto zestaw ten jest podłączony do komputera, na który są przekazywane wyniki pomiarów.



Rys.4.1. Stanowisko pomiarowe

Audiometr Oscilla SM920-P (Inmedico) jest audiometrem przesiewowym, co oznacza, iż wyniki uzyskane podczas badania z wykorzystaniem tego audiometru mogą tylko wstępnie zidentyfikować chorobę lub stan słuchu. W przypadku gdy wyniki badań będą niejednoznaczne, należy powtórzyć takie badanie w profesjonalnej pracowni audiometrycznej.

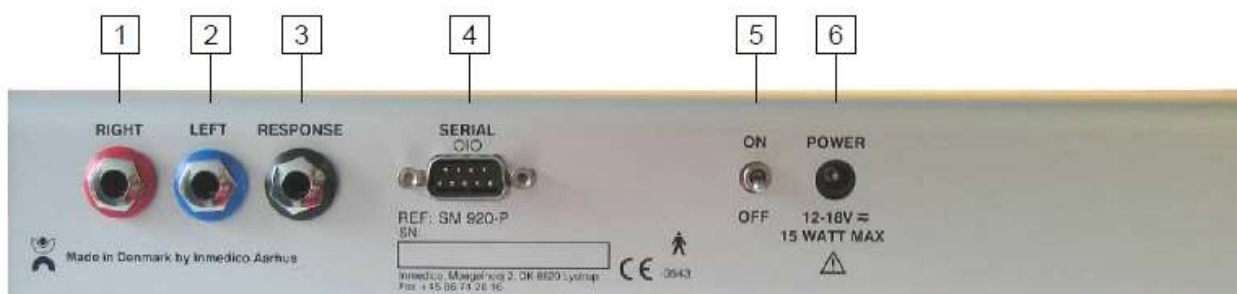
Audiometr ma wbudowaną drukarkę do szybkiego wydruku wyników testu, jednakże wyniki te można również wysyłać na komputer PC, gdzie specjalistyczne oprogramowanie (Audio Console) pozwoli nam na ich lepszą interpretację. Warto w tym miejscu wspomnieć, iż audiometr zapamiętuje tylko jeden pomiar, dlatego ważne jest by został on zapisany. Audiometr obsługuje 11 częstotliwości: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 750 Hz, 1000 Hz, 1500 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz, 6000 Hz oraz 8000 Hz, natomiast poziom odtwarzania sygnału akustycznego regulowany jest w zakresie od -10 dB do 110 dB w krokach co 5 dB. Dokładność poziomu głośności potwierdzoną przez certyfikat kalibracji szacuje się na ± 3 dB dla częstotliwości zawartych w przedziale od 125 Hz do 4000 Hz oraz ± 5 dB dla częstotliwości 6000 Hz i 8000 Hz. Natomiast dokładność dla częstotliwości oszacowana na ± 1 dB. Ponadto może on generować sygnał pulsacyjny i sygnał modulowany, który dodaje modulację częstotliwości do sygnału o częstotliwości modulacji 5 Hz. Audiometr ten jest również wyposażony w automatyczny test losowy. Gdy przez 5 sekund nie otrzymujemy odpowiedzi pacjenta, poziom sygnału zwiększa się o 5 dB. Test ten zaczyna się na częstotliwości 1000 Hz na prawym uchu, a następnie na lewym uchu. Po tym w losowej kolejności wybiera zarówno pozostałe częstotliwości, jak i testowane ucho. To sprawia że pacjent nie jest w stanie zgadnąć, które ucho i jaki ton jest w obecnej chwili badany. Na rysunku 4.2 i rysunku 4.3. przedstawiona jest dokładna budowa audiometru.



Rys.4.2. Płyta czołowa audiometru Oscilla SM920-P

Opis płyty czołowej audiometru:

1. ISO hearing level - Rzeczywisty poziom ciśnienia akustycznego w dB
2. Frequency – Rzeczywista częstotliwość w Hz
3. Autotest – Automatyczny test losowy
4. Setup - Ustawienia
5. No Response – Ustawienia dotyczące odpowiedzi pacjenta
6. Clear – Kasuje audiogram
7. Print – Drukuje pomiar za pomocą wbudowanej drukarki
8. Transmit – Przekazuje dane do PC
9. Shift – Stosowany w połączeniu z czerwonymi funkcjami
10. Tone attenuator - Naciśnięcie DOWN/UP zmienia tłumienie
11. Tone – Wysyła sygnał do pacjenta
12. AIR – Określa czy sygnał idzie do lewego czy do prawego ucha
13. Pulse – Rozpoczyna pulsujący dźwięk o częstotliwości modulacji 2,5 Hz
14. Warble – Dodaje modulację częstotliwości do sygnału o częstotliwości 5 Hz
15. Frequency – Naciśnięcie powoduje zmianę częstotliwości do następnej wartości stałej



Rys.4.3. Tylny panel audiometru Oscilla SM920-P

Opis tylnego panelu audiometru:

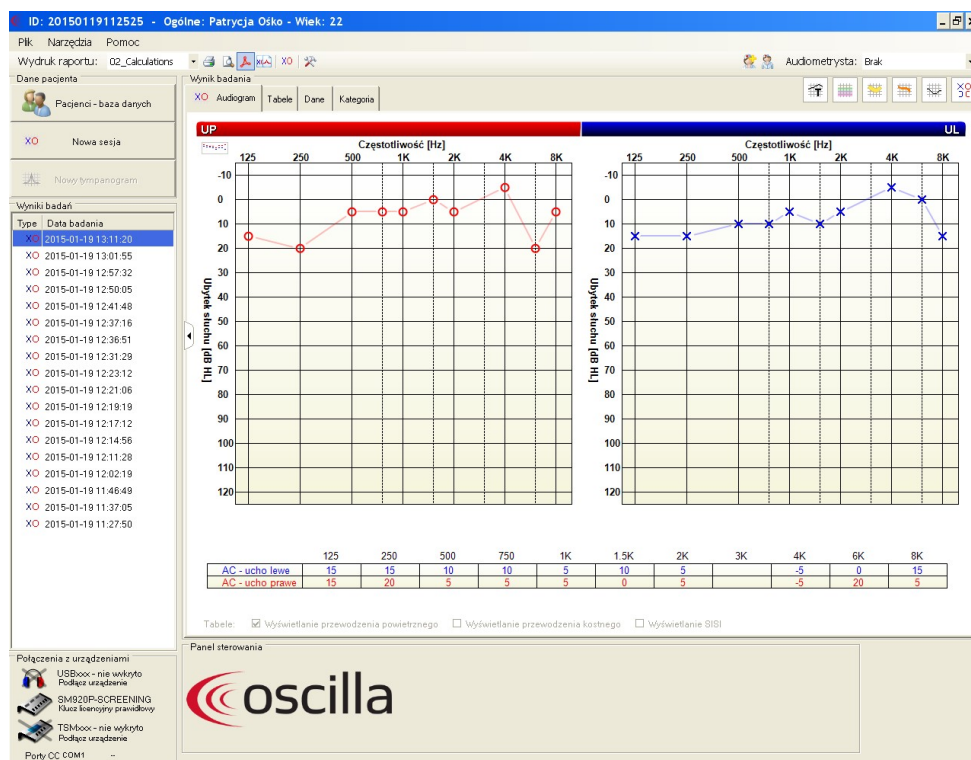
1. Right – Prawa słuchawka
2. Left – Lewa słuchawka
3. Response – Przycisk odpowiedzi pacjenta
4. Serial – Podłączenie do PC
5. On/off – Włącznik włącz/wyłącz
6. Power – Gniazdo zasilacza

Oprogramowanie Audio Console 3.3.8.

Audio Console jest specjalistycznym oprogramowaniem w pełni kompatybilnym z audiometrem Oscilla SM920-P. Jego główne funkcje to tworzenie baz danych pacjentów oraz prezentacja i zarządzanie wynikami pomiarów pochodzących z audiometru.

W przypadku bazy danych pacjentów możemy dodawać nowych pacjentów lub ich usuwać, a także edytować dane już istniejących osób. Ponadto możemy wybrać jakie informacje o pacjentach chcemy mieć w naszym systemie.

Po wyborze pacjenta przechodzimy do historii wyników jego badań, które przedstawione są w postaci wykresów i tabel (rys. 4.4). W prawym górnym rogu są ikony, dzięki którym możemy nanieść na audiogramy m.in. zakresy ubytków słuchu, „banan mowy” czy normę dla wieku pacjenta. Funkcje te znacznie ułatwiają interpretację uzyskanych wyników.



Rys.4.4. Zrzut ekranu z profilu pacjenta w oprogramowaniu Audio Console

Literatura

1. Adamczewski I.: *Ćwiczenia laboratoryjne z biofizyki i fizyki medycznej*, PZWL, Warszawa 1968, s. 70-79.
2. Beier W.: *Biofizyka – wprowadzenie do fizycznej analizy podstawowych struktur i procesów biologicznych*, Wydawnictwo PWN, Warszawa 1968, s. 291-326.
3. *Biofizyka – podręcznik dla studentów*, F. Jaroszyk (red), PZWL, Warszawa 2011, s. 457-534.
4. Everest F.A.: *Podręcznik akustyki*, Wyd. Sonia Draga, Katowice 2012, s. 17-71.
5. Jędrzejczak W.: *Fizyczne mechanizmy działania narządu słuchu*, „Delta” 2006, nr 10, s. 1-3.
6. Kasperczuk A.: *Modele badań przesiewowych słuchu u noworodków – doświadczenia różnych krajów*, „Nowa Audiofonologia” 2013, nr , s.50-55.
7. Konturek S.J.: *Fizjologia Człowieka*, Wyd. ELSEVIER, Wrocław 2013, s. 645-653.
8. Makarewicz R.: *Dźwięki i fale*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2011, s. 23-104.
11. Pilawski A.: *Podstawy biofizyki*, PZWL, Warszawa 1985, s. 237-255.
13. Socka J., Alchimowicz M., Białłowicz J.: *Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki*, Wyd. Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn 2002, s.128-132.
14. Zimmermann R.: *Biomedyczne przyrządy pomiarowe*, WKiŁ, Warszawa 1969, s. 502-521.

15. <http://www.eioba.pl/a/1jjm/hi-fi-komendium-wiedzy>
16. <http://www.marekczeszek.com/sitemap/adrem/adrem-10/adrem-nnnn-wykl-text.htm>
17. http://www.katowice.mavit.pl/audiologia/funkcje_ucha
18. <https://sound.eti.pg.gda.pl/student/materialy.html>
19. http://barwydzwieku.blox.pl/tagi_b/537632/audiometria-tonalna.html
20. <http://www.medel.com/pl/hearing-loss/>
21. http://hearcom.eu/main/usertrials/rehabilitationstage/whichroute/MenuBprivateroute/assessmentprivate/PTAprivate_pl.html
22. <http://www.dydaktyka.ib.pwr.wroc.pl/materialy/ETP002041L%20Elektroniczna%20aparatura%20medyczna/Cwiczenie%209.pdf>
23. <http://slideplayer.pl/slide/415653/>
24. https://www.e-audiologia.pl/index.jsp?stan=sloownik¶m=audiometria_tonalna
25. <http://m-luczak.pl/Badania.html#tonalna>
26. <http://156.17.30.104/dydaktyka/Audiologia/Cw%20nr%203%20Audiometria%20nadprogowa.pdf>
27. <http://www.programyzdrowotne.pl/proramyprofilaktyczne/sluch/Halaspodstawowepojecia/PercepcjaDzwiekow/Default.aspx>
28. <http://poradnik-logopedyczny.pl/profilaktyka-logopedyczna/anatomia/6/metdoy-i-systemy-badania-sluchu.html>