

Laboratorium

Wibroakustyczne Diagnozowanie Maszyn i Urządzeń

Instrukcja do ćwiczenia nr 2

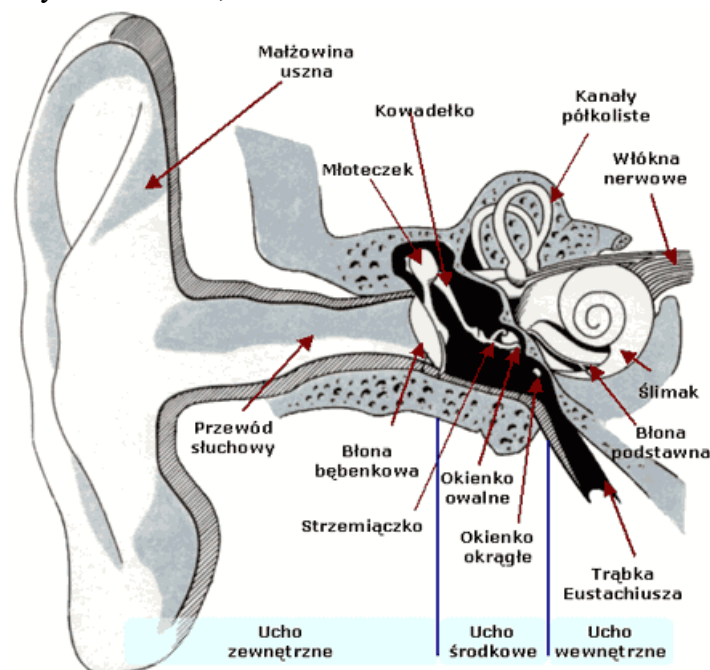
AKUSTYKA PSYCHOFIZJOLOGICZNA, SZKODLIWE
ODDZIAŁYWANIE DŹWIĘKU NA ORGANIZM CZŁOWIEKA,
PERCEPCJA DŹWIĘKU, POMIARY DLA SŁUCHAWEK
DOUSZNYCH, IDENTYFIKACJA DŹWIĘKÓW TONALNYCH
ORAZ SZUMÓW.

Opracowanie: P. Osiński, K. Leszczyński

Psychoakustyka jest to interdyscyplinarna dziedzina łącząca przede wszystkim naukę o akustyce i psychologii, ale także anatomię, neuropsychologię oraz fizjologię. Działem akustyki zajmującym się psychoakustyką jest akustyka słuchu, z kolei psychologii jest to psychologia poznawcza. Psychoakustyka koncentruje swe badania między innymi wokół relacji pomiędzy wartością wrażenia, a parametrami fizycznymi bodźców. Reakcja organizmu nie jest efektem działania samego bodźca, ale wywołana jest sekwencją subiektywnego wrażenia. Wiedza na temat wpływu dźwięku na nastrój człowieka w psychoakustyce jest konsekwencją prowadzonych badań w tej dziedzinie. Skupiają się one przede wszystkim na podstawowych właściwościach i samym funkcjonowaniu narządu słuchu, jego struktury oraz metod jego badań. Oprócz tego opracowywane są układy korygujące ubytki słuchu, a także ciągle jest rozwijana i ulepszana technologia rejestracji, transmisji, przetwarzania i generowania fal dźwiękowych. Wiedza o budowie i fizjologii ucha wykorzystywana jest także w celach tworzenia nowych systemów automatycznego rozpoznawania mowy.

Narząd słuchu

Ludzkie ucho (rys. 1) składa się z trzech części – zewnętrznej, środkowej i wewnętrznej. Dźwięki z otoczenia zbierane są przez ucho zewnętrzne składające się z małżowiny i zewnętrznego kanału słuchowego. Dźwięk kierowany jest kanałem do ucha środkowego i dociera do błony bębenkowej. Jest ona okrągłą, elastyczną membraną, która zaczyna wibrować pod wpływem fal dźwiękowych. Ruch błony bębenkowej przekazuje falę do ucha środkowego, w którym znajdują się trzy małe kosteczki słuchowe: młoteczek, kowadełko i strzemiączko. Są to najmniejsze kości organizmu ludzkiego. Stanowią one pomost od błony bębenkowej aż do wejścia do ucha wewnętrznego. Ich działanie wzmacnia wibracje zanim wejdą one przez okienko owalne do ucha wewnętrznego. W uchu wewnętrznym znajduje się ślimak, zwinięty kanał o charakterystycznym kształcie, częściowo wypełniony wodnistymi płynami. Kiedy fale dźwiękowe wprawiają w wibracje okienko owalne, płyny zaczynają drgać wprawiając w ruch włosowate komórki czuciowe w narządzie Cortiego. One natomiast przetwarzają drgania na impulsy elektryczne, które następnie przesyłane są do nerwu słuchowego i dalej do mózgu. Cały proces od momentu dotarcia fali dźwiękowej do ucha, aż do trafienia sygnału do świadomości mija minimum 10-15 ms. Dla niskich częstotliwości czas ten potrafi się wydłużyć nawet do 0,1 s.



Rys. 1. Budowa ludzkiego narządu słuchu [1]

Układ słuchowy człowieka posiada zdolność odbioru sygnałów akustycznych na drodze przewodnictwa kostnego. Zdolność ta jest najlepiej rozwinięta u ludzi z wrodzonymi lub nabytymi wadami ucha zewnętrznego i środkowego. Dowodem na to, że wibracje ślimaka nie pochodzą tylko od kosteczek jest inne postrzeganie własnego głosu na nagraniu. Gdy mówimy, słyszymy swój głos w tym samym momencie od wewnątrz i z zewnątrz. Złożenie tych dźwięków tworzy nasze wrażenie słuchowe na temat własnego głosu.

Możliwość interpretacji dźwięku realizowana jest dzięki temu, że kiedy dźwięk wprawia w błąd podstawową w ślimaku w wibracje, nie każda jej komórka włosowata się porusza. Aktywne są tylko wybrane komórki w zależności od częstotliwości dźwięku. Na jednym końcu ślimaka błona podstawowa jest niemal sztywna, wibruje tylko pod wpływem krótkich fal dźwięków o wysokiej częstotliwości, na drugim zaś jest bardziej sprężysta, drga tylko pod wpływem długich fal o niskiej częstotliwości. Lokalizacja źródła dźwięku odbywa się już w mózgu, dzięki danych otrzymywanych z obu uszu. Dźwięk nadchodzący do obojga uszu jednocześnie i z tym samym poziomem będzie oznaczał, że źródło jest na wprost.

Szkodliwe oddziaływanie hałasu na organizm ludzki

Hałas to dźwięk o dowolnym charakterze akustycznym, niepożądany w danych warunkach przez daną osobę. Narażenie na hałas skutkuje zmianami fizjologicznymi i patologicznymi. Do tych pierwszych zaliczyć można zagłuszenie innych pożądaných bodźców, ograniczenie orientacji przestrzennej oraz chwilowe ubytki słuchu. Do zmian patologicznych należą nieodwracalne ubytki słuchu, głuchota, pobudzenie, zmęczenie, znużenie depresja, dekoncentracja, a także zaburzenia krążenia, pracy serca oddychania i pracy gruczołów dokrewnych. [2]

Oprócz dźwięków hałasowi towarzyszą także inne drgania mechaniczne, np. o niskiej częstotliwości silnie oddziałujące na narządy wewnętrzne, ultradźwięki i wibracje rozchodzące się w ciałach stałych i przenoszące się na człowieka, który ma z nimi styczność.

Hałas można podzielić na ustalony, którego poziom zmienia się maksymalnie o 5 dB, nieustalony, czyli zmienny powyżej 5 dB i impulsowy – bardzo niebezpieczny, złożony z pojedynczych dźwięków. [2]

Długotrwała ekspozycja na hałas sprawia, że organizm się do niego adaptuje – nie zmienia się jednak jego negatywny wpływ. [2]

Hałas jest czynnikiem stresogennym, nie tylko powoduje rozdrażnienie i problemy z koncentracją ale pobudza układ wydzielniczy do produkowania hormonów stresu- adrenaliny, noradrenaliny i kortyzolu. Takie zaburzenia w produkcji hormonów mogą wpłynąć na cały organizm. Pojawiają się problemy z układem krążenia jak wzrost gęstości krwi i jej ciśnienia, wzrost poziomu cukru, co może zaburzać metabolizm. [2]

Osoby, które mają długotrwałą styczność z hałasem, często mają podwyższone ciśnienie krwi, szczególnie skurczowe. Nadciśnienie tętnicze jest czynnikiem ryzyka zawału serca i udaru. Poza tym narażone są również naczynia krwionośne, które mogą się skurczyć co powoduje zmniejszenie dopływu krwi do tkanek. [2]

Układ nerwowy reaguje na nadmierny hałas wzrostem ciśnienia wewnątrzczaszkowego, ale też obniżeniem nastroju, drażliwością, kłótlivością, znużeniem. Ze strony układu pokarmowego mogą pojawić się problemy z metabolizmem, wzmożone tycie, wrzody żołądka, wzmożone wydzielanie kwasów trawiennych. Oszacowano, że przyspieszenie starzenia związane z działaniem hałasu skraca życie nawet o 10 lat. [2]

Mimo wszystko, hałas działa jednak przede wszystkim na słuch. Zmiany mogą mieć charakter przejściowy lub trwały, częściowy lub całkowity. Skutki oddziaływania hałasu na słuch zależą przede wszystkim od poziomu ciśnienia akustycznego hałasu i czasu jego ekspozycji. Skutkiem długotrwałego narażenia na hałas jest nieodwracalne uszkodzenie

komórek rzęskowych znajdujących się w ślimaku. W konsekwencji tego procesu dochodzi do przesunięcia progu słyszenia powodującego, że część sygnału mowy ludzkiej znajduje się poza obszarem dźwięków słyszalnych. Dochodzą do tego problemy w ocenie głośności dźwięków, utrata zdolności rozróżniania wysokości i określania kierunku skąd dochodzi dźwięk.

Obecnie w piśmiennictwie [3], pochodzącym głównie ze środowiska pozamedycznego, coraz powszechniej pisze się o skutkach narażenia na infradźwięki i hałas niskoczęstotliwościowy (o poziomach powyżej 90 – 110 dB i częstotliwościach z zakresu poniżej 500 Hz) w postaci tzw. choroby wibroakustycznej (VAD, vibroacoustic disease). Pojęcie to wprowadził do literatury zespół portugalskich badaczy, gdy w wyniku wieloletnich badań zaobserwowali wśród personelu technicznego lotniczych zakładów produkcyjno-naprawczych znacznie częstsze, w stosunku do populacji generalnej, występowanie padaczki (10% do 0,2%). Według odkrywców VAD jest chorobą całego organizmu wywołaną ekspozycją na hałas niskoczęstotliwościowy do 500 Hz, polegającą na nadmiernym rozroście substancji międzykomórkowej, co przejawia się zgrubieniem struktur sercowo-naczyniowych oraz zwłóknień w płucach.

Rozwój choroby jest związany z czasem ekspozycji, a nie parametrami hałasu. Autorzy prowadząc badania, zdefiniowali chorobę wibroakustyczną i jej poszczególne etapy opisane w tabeli 1.

Badania wpływu infradźwięków oraz dźwięków niskoczęstotliwościowych na człowieka są nadal fragmentaryczne, zwłaszcza badania skutków długotrwałej ekspozycji zawodowej czy w środowisku komunalnym.

Tabela 1. Stadia i typowe objawy choroby wibroakustycznej [3]

Stadium choroby wibroakustycznej	Czas pracy w narażeniu na hałas	Objawy
I etap (łagodny)	od 1 do 4 lat	nieznaczne wahania nastroju niestrawność i zgaga infekcje gardła i jamy ustnej zapalenie oskrzeli
II etap (łagodny)	od 4 do 10 lat	bóle w klatce piersiowej wyraźne wahania nastroju bóle pleców, zmęczenie, grzybicze, wirusowe i pasożytnicze infekcje skóry zapalenie śluzówki żołądka krwawienie z dróg moczowych zapalenie spojówek alergię
III etap (ostry)	powyżej 10 lat	zaburzenia psychiczne krwotoki żyłaki kończyn górnych i hemoroidy wrzody dwunastnicy spastyczne zapalenie okrężnicy pogorszenie ostrości widzenia bóle głowy intensywne bóle mięśni zaburzenia neurologiczne

Percepcja dźwięku

Percepcja jest to proces aktywnej interpretacji danych zmysłowych z wykorzystaniem wskazówek kontekstu, nastawienia i wcześniejszej wiedzy, dzięki percepcji dochodzi do rozpoznania obiektu. Zatem percepcja obejmuje dwa procesy: wrażenie (percepcję sensoryczną) i spostrzeżenie. Dzięki niej odbieramy bodźce z otoczenia. W zależności od charakteru bodźców można wyróżnić percepcję wzrokową, słuchową, smakową, węchową, dotykową. [4]

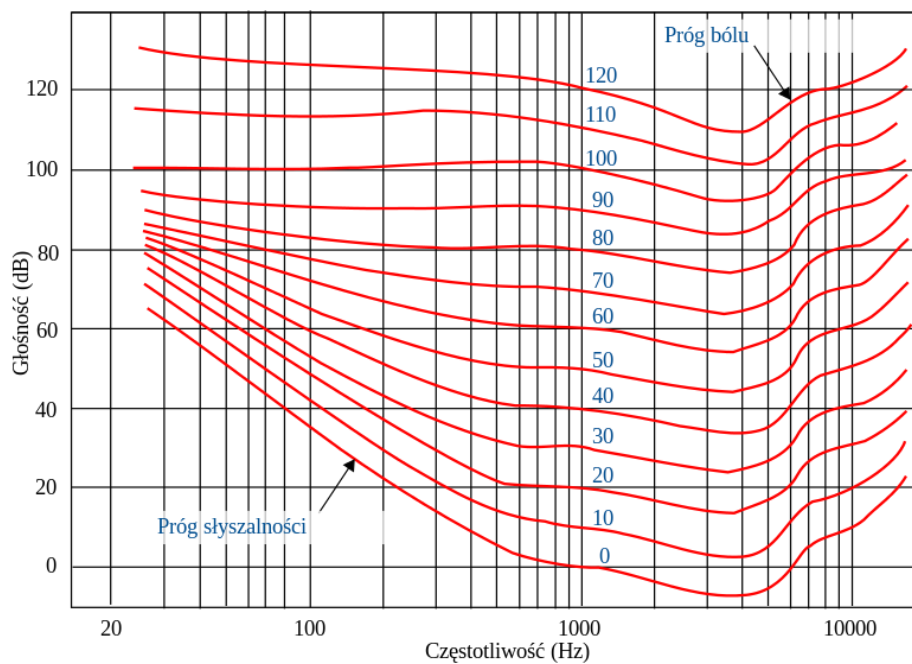
Skalę natężenia dźwięków człowiek dopasował do swojego progu słyszalności, przy konstruowaniu skali wrażeń słuchowych za wartość początkową przyjmuje się umowną

najniższą wartość bodźca rejestrowanego przez zmysły ludzkie i oznaczono tę wartość jako 0 dB. Jest to wielkość proporcjonalna do logarytmu ciśnienia akustycznego wywieranego na membranę, dlatego właśnie stosuje się skalę decybelową. Natężenie dźwięku jest często utożsamiane z głośnością, w konsekwencji czego chcąc uzyskać na pokrętle głośności skalę liniową należy zastosować potencjometr logarytmiczny. Natężenie jednak nie jest tym samym co głośność, głośność jest wartością subiektywną. Jednostką głośności jest son, przyjmuje się, że 1 son odpowiada tonowi o częstotliwości 1000 Hz i natężeniu 40 dB powyżej progu słyszalności, 1000 Hz i 30 dB to już 0.5 sona, a 50 dB to 4 sony. Natomiast poziom głośności wyrażany jest w fonach.

Wrażenie głośności zależy od częstotliwości dźwięku. W przypadku tonów prostych, dźwięki o tym samym poziomie dźwięku, ale o różnych częstotliwościach nie brzmią tak samo głośno. Opisują to izofony (rys. 2), czyli krzywe jednakowej głośności.

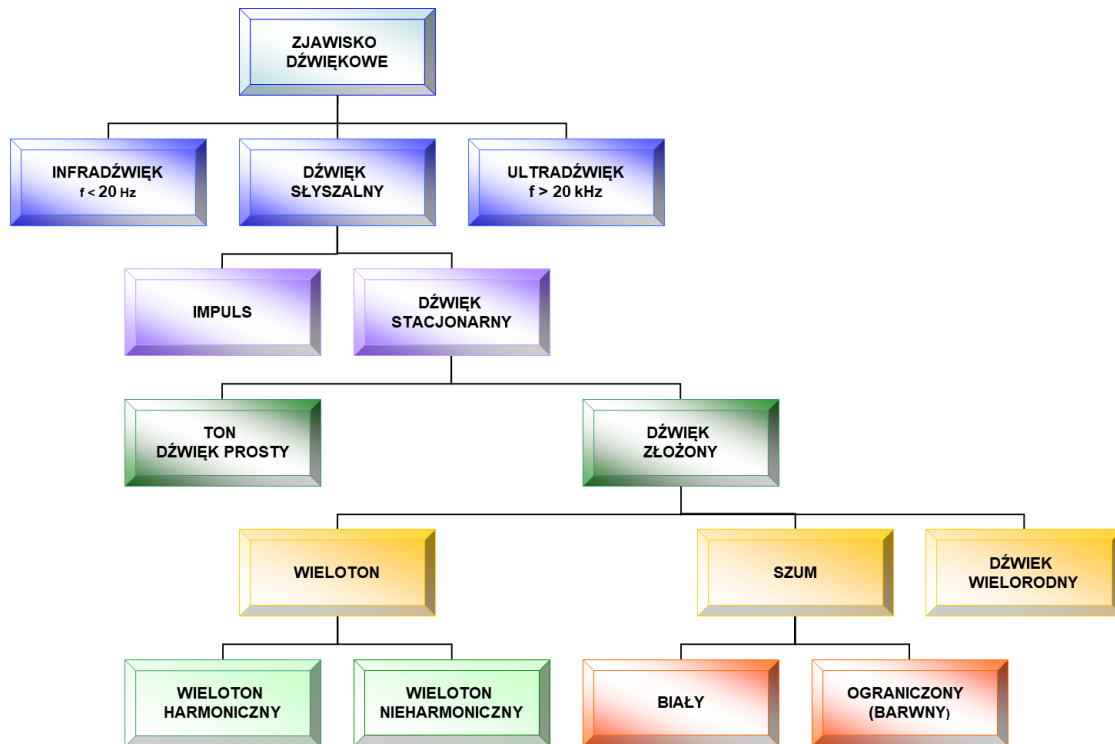
Ludzki układ słuchowy jest szczególnie wrażliwy na dźwięki o średniej częstotliwości. Maksimum czułości występuje przy ok. 4000 Hz. Natomiast lokalne maksimum przy ok. 13 kHz. Częstotliwości te są związane z dwoma pierwszymi częstotliwościami rezonansowymi kanału słuchowego.

Mierniki poziomu dźwięku wyposażone są w krzywe korekcyjne (opisane w ćwiczeniu 1), oparte na izofonach. Krzywe te uwzględniają aspekty głośności w zależności od częstotliwości i mają przebieg odwróconych izofon (np. krzywa korekcyjna A jest zbliżona do izofony 40). W rzeczywistości funkcje te są jedynie zbliżone kształtem do izofon.



Rys. 2. Izofony [5]

Zjawiska dźwiękowe, czyli „zaburzenie środowiska sprężystego rozchodzące się w sposób falowy prowadzące do wytworzenia wrażania słuchowego” [2] można podzielić zgodnie z graficznym przedstawieniem na rysunku 3.



Rys. 3. Podział dźwięków

Infradźwięki, dźwięki słyszalne i ultradźwięki

Podział fal dźwiękowych na infradźwięki, dźwięki słyszalne i ultradźwięki ma swoje korzenie w historycznych już badaniach wrażliwości narządu słuchu w funkcji częstotliwości, gdy skalę dźwiękową, z uwagi na ówczesne możliwości aparatury generującej sygnały akustyczne, podzielono na dźwięki słyszalne od 20 do 20 kHz i dźwięki niewywołujące u człowieka wrażenia słuchowego. Zaliczenie dźwięków o częstotliwościach <20 Hz do dźwięków niesłyszalnych było podyktowane także i tym, że badane osoby określały słyszenie dźwięków z tego zakresu, nie jako słyszenie tonów w „normalnym” sensie, lecz raczej jako odczucie „ucisku” w uszach czy dudnienie, buczenie, a ponadto sygnały o niskich częstotliwościach najpierw były odbierane przez receptory drgań. Ponadto, zarówno w przypadku dźwięków <20 Hz, jak i dźwięków >20 kHz problemem były, ograniczone wówczas, technicznie możliwości wytworzenia dźwięków o pożądanym parametrach. Dźwięki o częstotliwości poniżej 20 Hz nazywa się infradźwiękami (w niektórych pracach za górną granicę infradźwięków przyjęto częstotliwość 16 Hz), a dźwięki o częstotliwościach powyżej 20 kHz nazwano ultradźwiękami (w niektórych pracach za dolną granicę ultra-dźwięków przyjęto częstotliwość 16 kHz) [3].

Impuls

Dźwięk impulsowy to zdarzenie akustyczne cechujące się wysokim poziomem ciśnienia akustycznego, trwające bardzo krótko, nierzadko rzędu tysięcznych części sekundy [6].

Dźwięk stacjonarny

Jest to zjawisko dźwiękowe trwające na tyle długo, aby narząd słuchu zdołał się przystosować do jego odbioru bez ryzyka jego uszkodzenia.

Ton – dźwięk prosty

Jest to fala sinusoidalna zawierająca tylko jedną częstotliwość.

Dźwięk złożony

Składa się z połączenia wielu tonów.

Wieloton

Wielotony są dźwiękami składającymi się z wielu tonów składowych. Dzielą się na:

- wielotony harmoniczne – w widmie dźwięku częstotliwości składowych są wielokrotnością pewnej częstotliwości, a kolejne składowe nazywa się harmonicznymi dźwięku;
- wielotony nieharmoniczne – częstotliwości tonów składowych tego typu dźwięków nie są powiązane ze sobą tak prostymi zależnościami jak tony harmoniczne. Bardzo często tony nieharmoniczne występują w widmach dźwięków wydawanych przez instrumenty perkusyjne.

Szum

Jest to dźwięk o ciągłym widmie, nie występują dźwięki impulsowe. Szumy można podzielić na:

- Szum biały – szum szerokopasmowy o takiej charakterystyce widmowej, że poziom ciśnienia akustycznego dla każdej częstotliwości jest taki sam, konsekwencją tego jest wzrost poziomu dźwięku dla coraz wyższych oktaw [7];
- Szum barwny – inny szum, niż biały, np. różowy, czyli szum szerokopasmowy o takiej charakterystyce widmowej, że poziom dźwięku dla każdego pasma oktawowego (lub tercjowego) jest taki sam [7].

Dźwięk wielorodny

Zjawisko dźwiękowe, w którym występują dźwięki o różnych poziomach, różnych częstotliwościach oraz różnych czasach trwania.

Na podstawie doświadczenia spostrzegany dźwięk charakteryzuje się następującym szeregiem cech subiektywnych: wysokością, głośnością, barwą, trwaniem, gęstością, rozciągnięciem, objętością tonalnością, wokalnnością, jasnością, wrażeniami wibracyjnymi.

Przeciętny człowiek jest w stanie rozróżnić dźwięki różniące się o 1/4 tonu, profesjonalny muzyk 1/16 tonu, a nawet mniejsze. Klawisze fortepianu różnią się od siebie o 1/2 tonu.

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. Dźwięki zawierające duże częstotliwości mają „ostrą” barwę, a małe „łagodną”.

Natomiast zmiany wysokości wywołują wrażenie melodii. Wysokość dźwięku wyraża się w melach. Dla sygnałów sinusoidalnych (tonów) wysokość jest ściśle związana z ich częstotliwością: im większa częstotliwość, tym większa wysokość. Dla określenia wysokości dźwięku złożonego ma znaczenie zarówno składowa podstawowa częstotliwości jak i częstotliwości poszczególnych składowych.

Na percepcje dźwięków wpływają także ich częstotliwości i sekwencje nadawania. Zjawiska te nazywane są maskowaniem. Wyróżniamy:

- Maskowanie sąsiednich częstotliwości (maskowanie jednoczesne): ciche dźwięki o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości dźwięku głośniego nie są słyszalne;
- Maskowanie dźwięków następujących (maskowanie pobodźcowe): głośny dźwięk potrafi zagłuszyć cichsze dźwięki następujące zaraz po nim;
- Maskowanie dźwięków poprzedzających (maskowanie wsteczne): cichy dźwięk poprzedzający w krótkim czasie dźwięk głośny nie jest słyszalny.

Słuch jest zmysłem, który tak jak wzrok jest podatny na różnego rodzaju iluzje. Opierają się one głównie na fakcie, że mózg ludzki w tym co odbiera szuka znaczenia, próbuje dopasować dany dźwięk do czegoś co już zna. Dla przykładu, nawet gdy podczas oglądania

osoby mówiącej powycina się końcówki wyrazów wypowiedzianych przez nią, najprawdopodobniej cała wypowiedź będzie zrozumiała. Efektem takiego „zgadywania dźwięków” przez mózg ludzki jest również słyszenie znanych słów w swoim języku w zagranicznych piosenkach przez osoby nieznające oryginalnego języka utworu. [4]

Głośniki

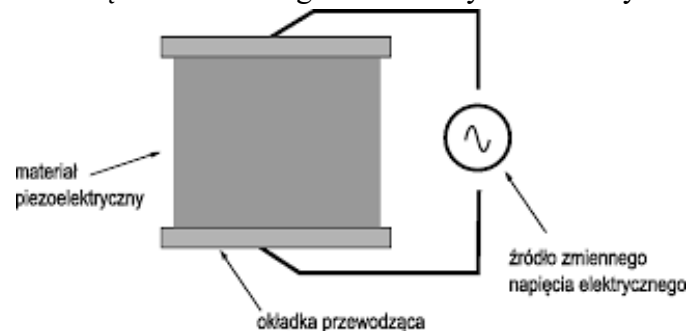
Głośnik jest to przetwornik elektroakustyczny przetwarzający energię elektryczną na energię fali akustycznej. Idealny głośnik przekształca zmienne napięcie elektryczne o odpowiedniej częstotliwości na falę akustyczną proporcjonalnie i liniowo.

Niektóre rodzaje głośników z podziałem ze względu na sposób działania:

- Piezoelektryczne,
- Elektrostatyczne,
- Izodynamiczne,
- Jonowe/plazmowe,
- Elektromagnetyczne,
- Magnetoelektryczne:
 - Stożkowe,
 - Kopułkowe,
 - Wstęgowe,
 - Tubowe.

Piezoelektryczne

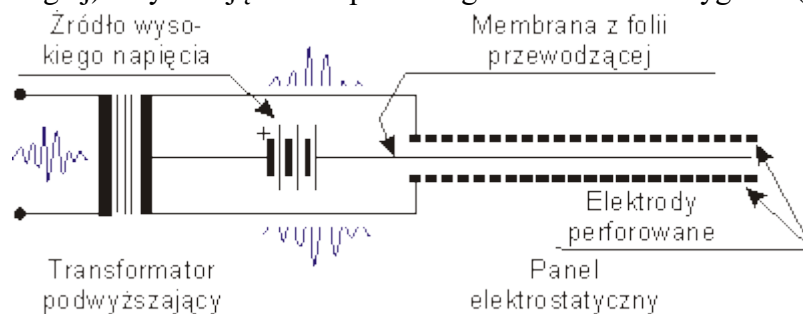
Zmiana pola elektrycznego wywołuje zmianę wymiarów materiału piezoelektrycznego (rys. 4). Konstrukcje takie są stosowane w głośnikach wysokotonowych i ultradźwiękowych.



Rys. 4. Schemat działania głośnika piezoelektrycznego [8]

Elektrostatyczne

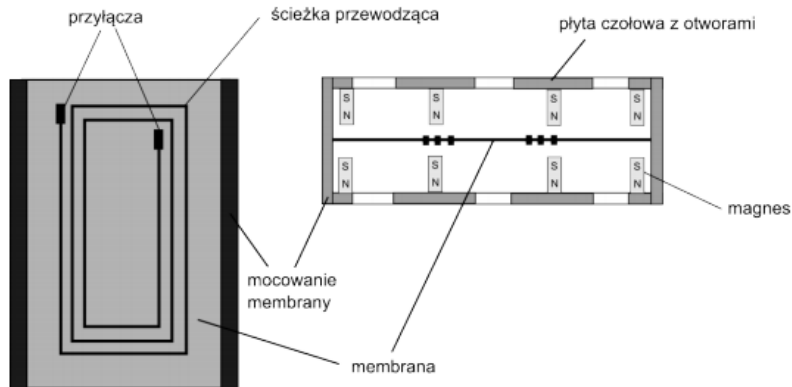
Na naelektryzowaną membranę z cienkiej folii (mającą napyloną warstwę metaliczną z jednej lub dwóch stron, bądź będącą elektretem) oddziałują dwie perforowane elektrody, umieszczone z obu stron folii (jedna elektroda ma odwróconą fazę sygnału o 180 stopni w stosunku do drugiej). Wywołują w ten sposób drgania folii w takt sygnału (rys. 5).



Rys. 5. Schemat działania głośnika elektrostatycznego [9]

Izodynamiczne

Posiadają membranę z materiału przewodzącego prąd elektryczny (metal lub tworzywo z nałożoną warstwą metalu) albo przymocowany do jej powierzchni (np. wtopiony w nią) układ przewodników o odpowiedniej geometrii (rys. 6). Membrana taka jest umieszczana w dostatecznie silnym polu magnetycznym.



Rys. 6. Schemat budowy głośnika izodynamicznego [10]

Jonowe/plazmowe

Zwane również bezmembranowymi – funkcję membrany pełni łuk elektryczny wytwarzający plazmę (rys. 7). Jego układ wytwarza wysokie napięcie elektryczne i łuk elektryczny za pomocą iskrownika. Łuk elektryczny modulowany sygnałem elektrycznym, podawanym z zewnętrznego źródła, wytwarza plazmę, która powoduje zmiany gęstości powietrza. Zmieniające się natężenie prądu płynącego przez łuk elektryczny, powoduje zmiany ciśnienia powstające wskutek zmian temperatury łuku elektrycznego wytwarzającego plazmę. Główną zaletą głośników plazmowych jest odtwarzanie częstotliwości sięgających nawet 100 kHz. Wadą głośników plazmowych jest wytwarzanie ozonu, który w dużych ilościach jest szkodliwy dla zdrowia oraz wysokie koszty.



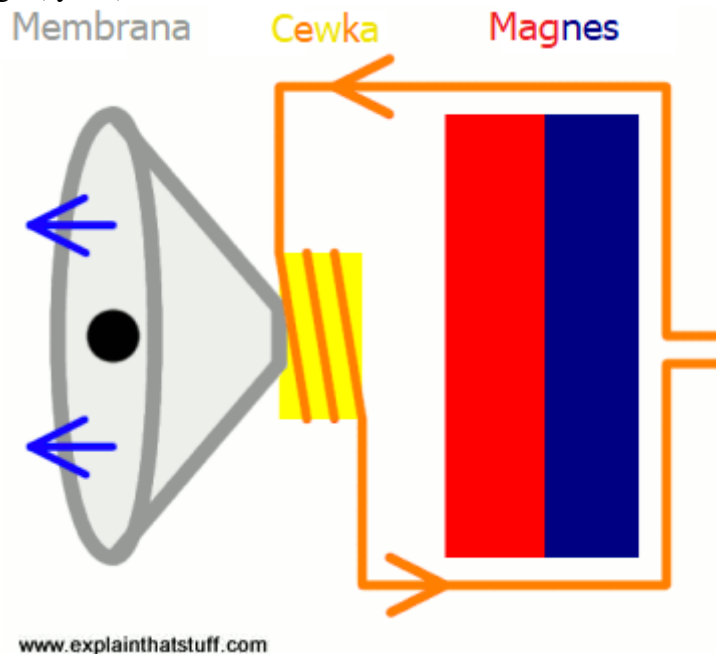
Rys. 7. Głośnik plazmowy [11]

Elektromagnetyczne

Przepływ prądu o częstotliwości akustycznej powoduje powstanie zmiennego pola magnetycznego. Pole to magnesuje rdzeń ferromagnetyczny połączony z membraną. Przyciąganie i odpychanie rdzenia powoduje drgania membrany.

Magnetoelektryczne – stożkowe

W polu magnetycznym magnesu umieszcza się cewkę, w której płynie prąd elektryczny. Oddziaływanie magnesu i przewodnika z prądem wywołuje ruch przewodnika, do którego przymocowana jest membrana. Sztywne połączenie cewki z membraną zapewnia jej ruch, a całość jest odpowiednio zawieszona. Cewka musi poruszać się w szczelinie magnesu bez ocierania się o niego (rys. 8).



Rys. 8. Schemat budowy głośnika magnetoelektrycznego ze stożkową membraną [12]

Głośnik stożkowy składa się z następujących elementów:

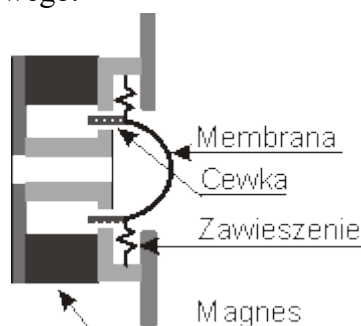
- Kosz: wykonany jest najczęściej z blachy prasowanej, tworzyw sztucznych lub z włókna szklanego. Służy on do zamocowania i wycentrowania elementów układu magnetycznego i drgającego. Ważną cechą tego elementu jest sztywność.
- Magnes: wykonany jest ferrytu. Magnes wpływa na sprawność głośnika (im większy tym większa sprawność). Wewnątrz magnesu znajduje się szczelina powietrzna oraz rdzeń nabiegunka. W szczelinie powietrznej porusza się cewka, i powinna ona być jak najwęższa, ponieważ w znacznym stopniu wpływa to na sprawność głośnika.
- Cewka: jest to nawinięty na karkas drut wykonany z takich materiałów jak miedź lub aluminium. Może mieć przekrój okrągły, prostokątny, kwadratowy lub sześciokątny.
- Karkas: łączy cewkę z membraną. Wykonuje się go z materiałów lekkich i w miarę dobrze odprowadzających ciepło. Są to najczęściej papier, aluminium lub tworzywo sztuczne.
- Zawieszenie: głośnik membranowy stożkowy posiada dwa resory. Ten widoczny zewnętrzny to zawieszenie membrany. Ma za zadanie utrzymać membranę w możliwie stałym współczynniku sprężystości w całym zakresie wychylenia. Sztywność decyduje o wartości wychylenia maksymalnego. Wykonany jest najczęściej z gumy lub pianki.
- Drugi resor (wewnętrzny), ma za zadanie utrzymać karkas cewki centralnie w szczelinie powietrznej. Jest wykonywany z tkaniny impregnowanej.
- Membrana to część najbardziej charakterystyczna w budowie głośnika i zarazem najbardziej dla słuchacza widoczna. Membrana wypycha cząstki powietrza. Powinna spełniać dwa podstawowe wymagania, które ze względu na sprzeczność, są razem nie do spełnienia, czyli lekkość i sztywność. Materiał z jakiego jest wykonywana to papier o długich włóknach, polipropylen, kevlar, utwardzana piankę, aluminium oraz kombinacje tych materiałów

tworząc tzw. strukturę kanapkową . Najczęściej produkuje się membrany papierowe powlekane polipropylenem, dzięki czemu są tanie i w miarę lekkie.

- Pokrywa przeciwpyłowa: chroni przed zanieczyszczeniem, i odprowadza nadmiar ciepła z układu magnetycznego. Wykonuje się ją z papieru, tkaniny, tworzywa sztucznego i aluminium.

Magnetoelektryczne – kopułkowe

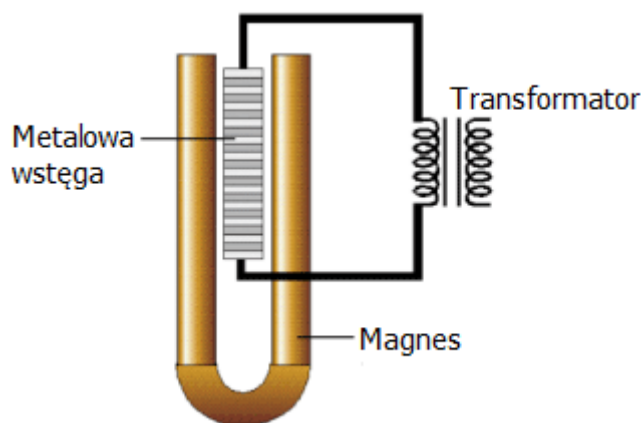
Są to najczęściej spotykane przetworniki wysokotonowe ze względu na umiarkowaną cenę i dobrą jakość odtwarzania. Budowa i sposób działania są podobne do głośnika stożkowego, z tą różnicą, że nie ma stożkowej membrany, tylko kopułową realizującą również funkcję ochrony przed pyłkami (rys. 9). Membrana nie posiada w tym przypadku dodatkowego zawieszenia. Kopułkę wykonuje się z jedwabiu lub innej tkaniny, impregnowanej i pokrywanej sprężystym materiałem tłumiącym. Może ona być z innych materiałów: stopu aluminium czy tytanu. Mały rozmiar kopułki sprawia, że kąt promieniowania dźwięku jest znacznie większy niż w przypadku głośnika stożkowego.



Rys. 9. Schemat budowy głośnika magnetoelektrycznego – kopułkowego [9]

Magnetoelektryczne – wstępowe

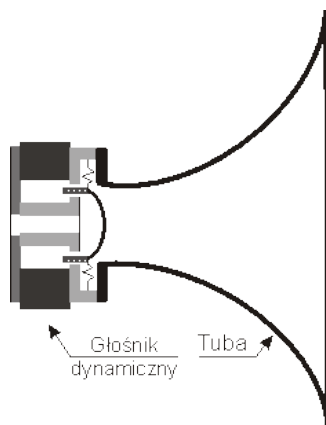
Głośniki, w których funkcję membrany spełnia bardzo cienka folia metalowa (na przykład z aluminium) zamocowana w polu magnetycznym (rys. 10). We współczesnych głośnikach folia jest karbowana i ma postać rozciągniętej harmonijki umieszczonej pomiędzy magnesami. Prąd sygnału audio płynący przez metalową membranę powoduje jej ruch w polu magnetycznym.



Rys. 10. Schemat działania głośnika magnetoelektrycznego – wstęgowego [13]

Magnetoelektryczne – tubowe

Głośniki te składają się z magnesu trwałego, cewki poruszającej się w jego polu i membrany wraz z zawieszeniem oraz tuby (rys. 11). Stosowane są zwykle jako wysokotonowe i średniotonowe ze względu na ograniczenie rozmiaru tuby.



Rys. 11. Schemat budowy głośnika magnetoelektrycznego – tubowego [9]

Głośniki powinny być wyposażone w obudowy. Głośnik bez obudowy promieniuje słabo albo w ogóle nie promieniuje tonów niskich. Zagęszczanie i rozrzedzanie powietrza jest na tyle wolne, że wzajemnie się znosi. Kolejną sprawą jest ukierunkowanie fali akustycznej wytwarzanej przez głośnik. Odpowiednio ukształtowana obudowa jest w stanie skierować dźwięk w wymaganym kierunku. Obudowa powinna zapewnić zróżnicowanie drogi fali dźwiękowej między przednią i tylną ścianą membrany. Do budowy obudów wykorzystuje się na ogół drewno, płyty wiórowe (płyty MDF, HDF). Istotną cechą materiału jest jego duża gęstość oraz masa. Musi się również charakteryzować dużym tłumieniem wewnętrznym.

Obudowa zamknięta

Obudowa zamknięta jest to najprostsza konstrukcja obudowy (rys. 12). Występuje tam całkowita separacja przedniej części membrany od tylnej. Obudowy te powinny być ciężkie i dobrze wytłumione. Odpowiednie wytłumienie obudowy powinno sprawić, aby głośnik przenosił wszystkie częstotliwości jednakowo, czyli ani nie tłumił, ani nie wzmacniał żadnej z nich.



Rys. 12. Schemat budowy obudowy zamkniętej [14]

Obudowa typu Bassreflex

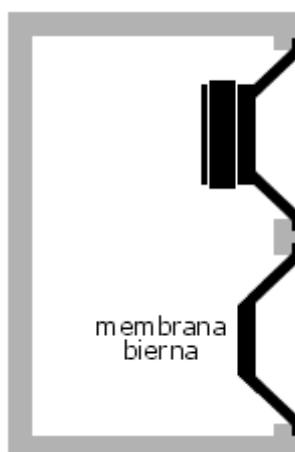
Obudowa ta wykorzystuje nie tylko promieniowanie przedniej strony membrany głośnika, ale również i jej tylną stronę. W tym przypadku obie strony promieniują fale w przeciwfazie, a więc znosiłyby się nawzajem, aby temu zapobiec w obudowie zamkniętej wykonuje się otwór. Może być on prosty lub tunelowy (otwór rurowy). Jest on umieszczony z tyłu lub z przodu kolumny (rys. 13).



Rys. 13. Schemat budowy obudowy typu Bassreflex [14]

Obudowa z membraną bierną

Obudowa z membraną bierną (rys. 14) eliminuje zabarwienia dźwięku powstające w otworze/tunelu bassrefleksu. Stosuje się ten typ, gdy głębokość głośnika jest mniejsza niż wymagana długość tunelu bassrefleksu. Bierna membrana jest to element zbliżony wyglądem do głośnika. Różni się jednak tym, że nie posiada magnesu i cewki.



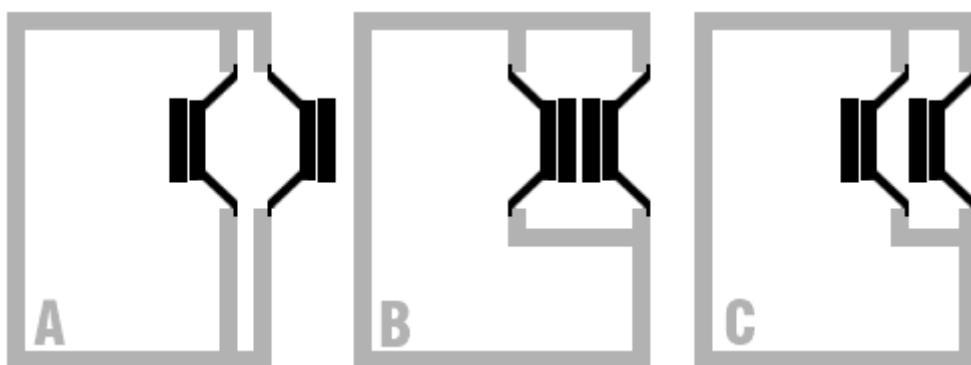
Rys. 14. Schemat budowy obudowy z membraną bierną [14]

Obudowa isobaric (compound)

Obudowa isobaric (compound) pokazana na rysunku 15 wykorzystuje dwa głośniki niskotonowe pracujące synchronicznie z małą, szczelnie zamkniętą objętością powietrza pomiędzy ich membranami. Para głośników w takiej konfiguracji może być montowana w różnych rodzajach obudów, jak obudowa zamknięta, obudowa bassreflex czy obudowa z filtrem akustycznym. Możliwe są trzy układy głośników:

- naprzeciwko siebie (membrana do membrany),
- tyłami do siebie (magnes do magnesu),
- tyłem do przodu (membrana do magnesu).

W układzie z membraną do magnesu głośniki są podłączone w fazie, tak aby membrany obydwu poruszały się synchronicznie w tym samym kierunku. W dwóch pozostałych konfiguracjach głośniki są podłączone w przeciwfazie aby uzyskać ten sam efekt. Zmniejszenie wymiarów obudowy to największa korzyść z zastosowania konfiguracji isobaric/compound. Wady tego układu to zwiększona komplikacja obudowy i możliwe kłopoty ze zmieszczeniem odpowiedniego tunelu w obudowie typu bassreflex, a także koszt drugiego głośnika.



Rys. 15. Schemat budowy obudowy isobaric [14]

Obudowa pasmowoprzepustowa

Tego typu obudowy stosuje się wyłącznie do budowy subwooferów, dlatego że charakterystyka tak otrzymanego zestawu głośnikowego jest stosunkowo wąska i umiejscowiona w dolnym zakresie pasma częstotliwości słyszalnych. Głośnik jest zamocowany w przegrodzie, która dzieli obudowę na dwie komory. Jedną szczelnie zamkniętą, a drugą z wyprowadzonym kanałem bassreflex (rys. 16). W ten sposób jedna strona membrany pracuje tak, jak w obudowie zamkniętej, zaś druga – w odbudowie z otworem.



Rys. 16. Schemat budowy obudowy pasmowoprzepustowej [14]

Pasmo przenoszenia jest to zakres częstotliwości dźwięku, jaki jest w stanie wyemitować kolumna głośnikowa lub głośnik. Górna wartość pasma przenoszenia z reguły osiąga granicę 20kHz (przyjmuje się to za górną granicę pasma słyszanego przez człowieka). W związku z powyższym, głośniki można podzielić na:

- Superniskotonowe (subwoofery),
- Niskotonowe (woofery),
- Średnionowe,
- Wysokotonowe,
- Szerokopasmowe.

Podstawowe parametry głośników to:

- Sprawność – stosunek mocy mechanicznej wytworzonej fali akustycznej do dostarczonej mocy elektrycznej. W obudowie zamkniętej wynosi od 0,5 do 2%. Większość mocy jest tracona w postaci ciepła. Konstrukcje estradowe mają sprawność na poziomie ok. 14%, a tubowe 20-50%.
- Moc znamionowa – moc, którą głośnik może być obciążony w sposób ciągły nie powodując uszkodzenia głośnika ani nadmiernych zniekształceń dźwięku. Brak normalizacji warunków pomiarów mocy znamionowej prowadzi często do sytuacji, gdy deklarowana moc znamionowa nie jest osiągalna, ponieważ wcześniej głośnik zaczyna zniekształcać dźwięk, czyli membrana wychyla się poza dopuszczalny zakres.

- Moc muzyczna – maksymalna moc krótkotrwałego (2s.) tonu o częstotliwości z zakresu od 250 Hz do dolnej częstotliwości granicznej, która nie spowoduje uszkodzenia głośnika ani nie spowoduje zbyt dużych zniekształceń.
- Efektywność – określa, jaki będzie poziom dźwięku w określonym punkcie oddalonym o 1 metr od zestawu głośnikowego, przy doprowadzeniu określonego sygnału. Im wyższa efektywność tym głośniej zagra zestaw głośnikowy przy takich samych parametrach sygnału. Efektywność daje ogólne pojęcie o tym jak sprawnie zestaw głośnikowy przetwarza energię elektryczną na energię akustyczną. W typowych warunkach (średni pokój i wzmacniacz o mocy 30 W lub więcej) efektywność rzędu 88–90 dB jest zadowalająca.
- Impedancja – zależność między natężeniem prądu i napięciem w obwodach prądu zmiennego. Jest uogólnieniem oporu elektrycznego.
- Impedancja znamionowa – najmniejsza wartość impedancji dla częstotliwości powyżej częstotliwości rezonansu. Jest to oporność głośnika dla prądu zmiennego. Większość impedancji stanowi rezystancja drutu cewki głośnika, stąd też straty na ciepło i niska sprawność głośników. Impedancja znamionowa przyjmuje zawsze konkretną wartość. Najczęściej jest to 8 Ω lub 4 Ω, rzadziej 6 Ω. Rzeczywista impedancja nie jest stała i zmienia się w zależności od częstotliwości, w większości zestawów głośnikowych mocno odbiega w swoich maksimach i minimach od wartości nominalnej. Parametr ten wpływa na techniczne dopasowanie zestawów głośnikowych i wzmacniacza. Jeśli do wzmacniacza dołączymy głośniki o zbyt małej impedancji można doprowadzić nawet do przegrzania lub spalenia końcówki mocy wzmacniacza.
- Częstotliwość rezonansowa – punkt, w którym masa poruszających się elementów ruchomych głośnika równoważy sztywność elementów zawieszenia. Parametry, które mają największy wpływ na częstotliwość rezonansu głośnika, to masa elementów ruchomych, a także sztywność elementów zawieszenia.
- Rezystancja uzwojenia cewki – przy przepływie prądu stałego, mierzona za pomocą omomierza. Wynik takiego pomiaru jest niemal zawsze niższy niż nominalna impedancja głośnika.
- Induktancja cewki – mierzona w milihenrach (mH). Pomiar dokonuje się przy częstotliwości 1 kHz. Wzrostowi częstotliwości towarzyszy wzrost impedancji powyżej R_e , ponieważ cewka zachowuje się jak induktor. W konsekwencji impedancja głośnika nie jest stałą rezystancją i można ją odwzorować jako krzywą, której przebieg zmienia się w funkcji częstotliwości sygnału wejściowego.
- Dobroć elektryczna Q_{es} – jest to wskaźnik tłumienia systemu elektrycznego (cewki i magnes). Przeciwnie działające siły zawieszenia mechanicznego i elektrycznego pozwalają amortyzować ruchy membrany.
- Dobroć mechaniczna Q_{ms} – jest wskaźnikiem tłumienia mechanicznego systemu zawieszenia. Te elementy można traktować na podobieństwo sprężyn.
- Dobroć wypadkowa Q_{ts} – jest to charakterystyka częstotliwościowa i drganiowa układu przy częstotliwości rezonansowej. Jest odwrotnie proporcjonalna do tłumienia:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{es} \cdot Q_{ms}}{Q_{es} + Q_{ms}}$$
 - $\leq 0,4$ - obudowa z otworem,
 - $0,4 - 0,7$ - obudowa zamknięta,
 - $\geq 0,7$ - wolna przestrzeń lub nieograniczona przegroda.
- Skuteczność – jeden z najbardziej użytecznych parametrów, jakie producenci podają w specyfikacjach głośników. Informuje on nas o efektywności danego przetwornika oraz o głośności dźwięku, jaką możemy uzyskać przy określonej mocy wejściowej. Producenci

wyliczają tę skuteczność różnymi metodami. Z tej też przyczyny często niemożliwe jest dokładne porównanie skuteczności różnych przetworników.

Ćwiczenia laboratoryjne

Część laboratoryjna polega na zidentyfikowaniu i porównaniu głośności dźwięków tonalnych oraz szumów wybranych przez prowadzącego.

Kolejna część to pomiary słuchawek dousznych i dokanałowych przyniesionych przez studentów na zajęcia. Pomiar polega na odtworzeniu na słuchawkach wybranych dźwięków lub muzyki przy parametrach jakie są najczęściej używane przez użytkownika. Słuchawki należy umieścić w otworach nasadki nałożonej na mikrofon sonometru (rys. 17). Następnie należy przeprowadzić pomiary wybranych wielkości akustycznych (można sobie pomóc instrukcją obsługi sonometru umieszczonej w instrukcji do ćwiczenia 1).



Rys. 17. Nasadka do pomiaru słuchawek

Literatura

- [1] https://m.ciop.pl/CIOPPortalWAR/file/47096/bezp_halas_Rys_1_5m
- [2] Engel Z., Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem, PWN, 1993.
- [3] Pawlas K.: Wpływ infradźwięków i hałasu o niskich częstotliwościach na człowieka. „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy” 2009, nr 2. s. 27-64.
- [4] Ozimek E., Dźwięk i jego percepcja. Aspekty fizyczne i psychofizyczne, PWN, 2018.
- [5] <https://www.wikiwand.com/pl/Izofona>
- [6] Kukulski B.: Wpływ zjawiska maskowania na odczucie uciążliwości sygnałów impulsowych. „Bezpieczeństwo Pracy: nauka i praktyka” 2016, nr 2, s. 14-16.
- [7] Kirpluk M., Podstawy akustyki, NTL-M.Kirpluk, 2014.
- [8] <https://docplayer.pl/docs-images/62/47646094/images/22-1.jpg>
- [9] <https://www.rms.pl/baza-wiedzy/742-budowa-kolumn-glosnikowych>
- [10] Dobrucki A., Przetworniki elektroakustyczne, WNT, 2007.
- [11] https://pl.wikipedia.org/wiki/Głośnik_plazmowy
- [12] <https://www.explainthatstuff.com/loudspeakers.html>
- [13] <https://i0.wp.com/www.newschoaudio.com/wp-content/uploads/2011/01/Ribbon-element-diagram.gif>
- [14] <https://www.hifi.pl/slownik/>