

Pomiary psofometryczne

część 1



W ramach cyklu Notatnik Praktyka przedstawimy szereg informacji dotyczących pomiarów psofometrycznych. Wiadomości te są niezbędne dla tych Czytelników, którzy mają jakkolwiek związek z elektroakustyką.

W artykule omówiono niezbędne podstawy teoretyczne, a także spotykane w praktyce charakterystyki.

Bardziej zaawansowani elektronicy z pewnością docenią fakt opisanie i omówienia charakterystyk różnych spotykanych w praktyce filtrów psofometrycznych.

Praktycznym uzupełnieniem części teoretycznej będzie opis modułu filtru przeznaczonego do prowadzenia dokładnych pomiarów psofometrycznych.

W numerze 8/94 Elektroniki Praktycznej zamieszczony był artykuł pt. „Miernik natężenia dźwięku”. Omówiono w nim dwa podstawowe parametry dźwięku.

Przypomnijmy, że natężeniem dźwięku nazywamy moc akustyczną przypadającą na jednostkę powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali dźwiękowej. Natężenie dźwięku oznaczane zwykle literą I (lub J) wyrażamy po prostu w watach na metr kwadratowy. Dźwięki, z jakimi mamy do czynienia w życiu mają natężenie w zakresie 10^{-12} ... 1W/m^2 .

Ponieważ przy tak dużej rozpiętości lepiej posługiwać się jakąś miarą logarytmiczną, częściej używa się pojęcia poziomu natężenia dźwięku.

W mierze logarytmicznej niezbędne jest ustalenie poziomu odniesienia - przyjęto tu wartość $I_0 = 10^{-12}$... 1W/m^2 . W ten sposób spotykane wartości poziomu natężenia dźwięku wynoszą 0...120dB (a nawet do 130...140dB). Tak określony parametr jest cechą fizyczną dźwięku i wcale nie ma bezpośredniego związku z właściwościami ucha ludzkiego.

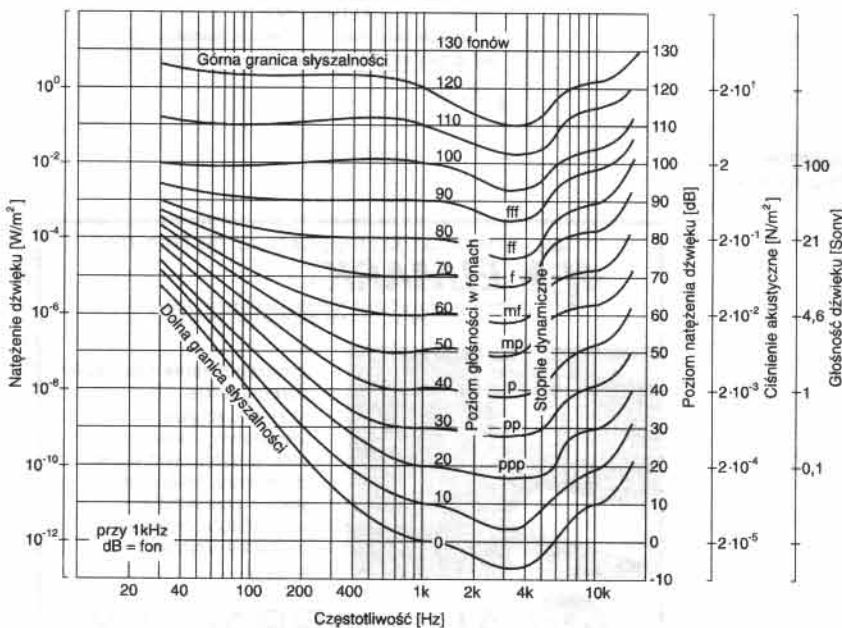
Jak wiadomo zmysł słuchu osoby młodej odbiera dźwięki w zakresie 16Hz do co najwyżej 20kHz. Z wiekiem górna granica się zmniejsza nawet do 10kHz.

Nieprzypadkowo wybrano częstotliwość „pilota” w radiowym sygnale stereofonicznym równą 19kHz. Prawie nikt takiej częstotliwości nie słyszy. Autor uczęszczając swego czasu do szkoły średniej przeprowadzał wraz z kolegami stosowne próby. Spośród znacznego grona młodych osób tylko jedna (!) potrafiła jednoznacznie wykryć dźwięk pilota stereo.

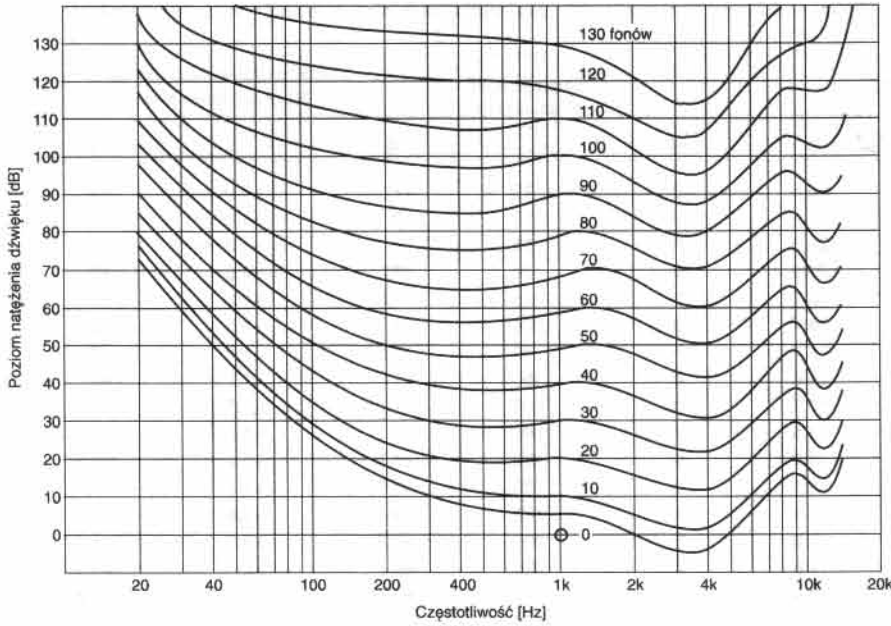
Tak więc dźwięk o częstotliwości, przykładowo, 22kHz dla przeciętnego słuchacza w ogóle nie istnieje. Wielu nie słyszy nawet sygnału o częstotliwości odchylenia poziomego w telewizorze. Także w zakresie częstotliwości słyszalnych czułość ucha ludzkiego nie jest jednakowa. Dźwięki o takim samym poziomie natężenia, ale o różnych częstotliwościach będą wywoływać wrażenie różnej głośności.

W tym momencie musimy opuścić solidny grunt zasad matematyczno-fizycznych i porozmawiać o wrażeniach subiektywnych.

Aby określić wrażliwość ucha ludzkiego na różne częstotliwości wprowadzono pojęcie poziomu głośności (oznaczanego zwykle literą L). Pierwsze badania w tym zakresie zostały opublikowane w roku 1933 przez Fletchera i Munsona. Wyznaczyli oni doświadczalnie krzywe jednakowego poziomu głośności. Badania te polegały na subiektywnym porównywaniu przez wiele osób poziomu głośności tonów badanych z poziomem głośności tonu o częstotliwości 1000Hz. Dla odróżnienia fizycznego - obiektywnego poziomu natężenia dźwięku od subiektywnego poziomu głośności jednostką poziomu głośności nazywa się fonem. Poziom głośności tonu o częstotliwości 1000Hz jest liczbowo równy poziomowi natężenia dźwięku. Otrzymane przez wspomnianych badaczy krzywe jednakowego poziomu głośności pokazano na rysunku 1. Nazywa się je krzywymi izofonicznymi lub po prostu izofonami.



Rys. 1. Krzywe izofoniczne Fletchera i Munsona



Rys. 2. Krzywe izofoniczne Robinsona i Dadsona (wg ISO)

Bardziej gruntowne badania przeprowadzone później przez Robinsona i Dadsona wykazały nieco inny przebieg tych krzywych - pokazuje je **rysunek 2**. Różnice w wynikach są znaczne, dla niektórych poziomów i częstotliwości przekraczają 10dB. Najniższa krzywa nie przebiega przez punkt odpowiadający natężeniu dźwięku o częstotliwości 1000Hz i poziomie 0dB. Badacze stwierdzili bowiem, że „statystyczne ucho” takiego dźwięku nie słyszy. Dźwięki słyszalne zaczynają się więc od poziomu głośności wynoszącego 4,2 fona.

Wyniki tych badań stały się podstawą do przyjęcia znormalizowanych krzywych izofonicznych zalecanych przez ISO (International Stan-

dardization Organisation). Celowo zamieściliśmy oba rysunki, bowiem niektórzy autorzy nadal korzystają ze „starych” krzywych Fletchera i Munsona, co w niektórych sytuacjach może prowadzić do nieporozumień. Ponadto taka sytuacja świadczy o ściśle subiektywnym charakterze uzyskanych wyników. Badania przeprowadzone w różnych grupach wiekowych dają wyniki znacznie różniące się między sobą. Niezależnie od tych rozbieżności, z analizy przebiegu krzywych izofonicznych wynikają ważne wnioski praktyczne. Przede wszystkim zauważmy, że w zakresie niskich częstotliwości krzywe jednakowej głośności są „ściśnięte”. Znaczy to, że zależnie od zakresu częstotliwości jednakowe zmiany natężenia dźwięku (wyrażone w dB) dają wrażenie różnych zmian głośności (w fonach). A więc jeśli jakiś program dźwiękowy będzie odtwarzany z poziomem innym niż oryginalny, to stosunki między głośnościami tonów o różnych częstotliwościach będą inne niż w oryginalnym. Inaczej mówiąc zmieni się barwa dźwięku. Nasuwa się więc wniosek, że odtwarzając muzykę z różnymi poziomami głośności za każdym razem powinniśmy inaczej ustawiać regulatory barwy dźwięku. Większość wzmacniaczy posiada tzw. fizjologiczną regulację głośności (filtr kontur), co w pewnym ograniczonym zakresie realizuje to zadanie.

Krzywe izofoniczne mają, jak widzimy, ścisły związek z właściwościami ucha ludzkiego, ale jakby nie do końca. Można powiedzieć, że

wywodzą się z czysto fizycznego poziomu natężenia dźwięku (przy 1kHz). Podkreślmy tu, że krzywe izofoniczne nie niosą jasnej informacji na ile jedne dźwięki wydają się głośniejsze od innych. A przecież w praktyce ważniejsze jest jak odczuwamy zmiany głośności, a jak „widzą” to jakieś bezduszne przyrządy. Dlatego przedstawimy kolejne, tym razem już ściśle subiektywne pojęcie głośności.

Do uprzednio poznanych trzech parametrów dźwięku (natężenie, poziom natężenia i poziom głośności) dodajemy kolejny: głośność dźwięku.

Głośność oznaczana jest zwykle literą S, a jej jednostką jest son. Przyjęto, że 1 son odpowiada poziomowi głośności 40 fonów. Zależność głośności (w sonach) od poziomu głośności (w fonach) została określona ściśle subiektywnie: podobnie jak przy wyznaczaniu krzywych jednakowej głośności tak i tu badaniom poddano wiele osób, które określały na ile jeden dźwięk wydaje im się głośniejszy od drugiego.

Rysunek 3 pokazuje tę zależność zgodnie z zaleceniami ISO.

Za pomocą tego parametru (głośności) wreszcie możemy porównywać o ile jeden dźwięk jest głośniejszy od drugiego.

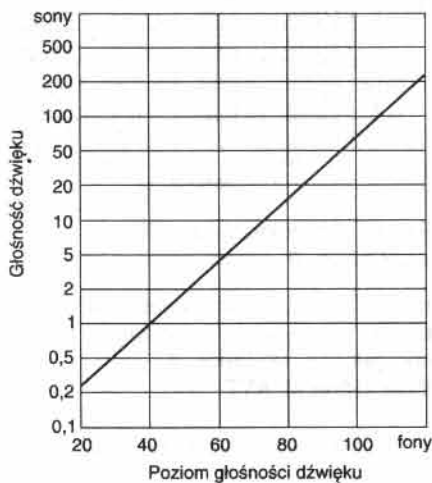
Na rysunku 1 jedna ze skal osi pionowej wyraża zależność głośności tonu o częstotliwości 1000Hz od natężenia dźwięku. I dopiero teraz widać to, co wielokrotnie powtarzamy: że czułość ucha ludzkiego rzeczywiście ma charakter w przybliżeniu logarytmiczny.

Nie będziemy się dalej zagłębiać w różne aspekty obszernego zagadnienia głośności. Bardziej ciekawi Czytelnicy zechcą sami przeanalizować zależność głośności od natężenia dźwięku przy różnych częstotliwościach.

My podamy jeszcze tylko jeden wykres przedstawiający zależność głośności od czasu trwania impulsu dźwiękowego. Wiadomo, że krótkie impulsy wydają się cichsze. **Rysunek 4** pokazuje o ile należy zwiększyć poziom natężenia dźwięku krótkich impulsów dźwiękowych aby uzyskać wrażenie jednakowej głośności. Zależność ta będzie przydatna choćby przy konstruowaniu sygnalizatorów i syren alarmowych.

Powróćmy teraz do krzywych jednakowej głośności z rysunku 2.

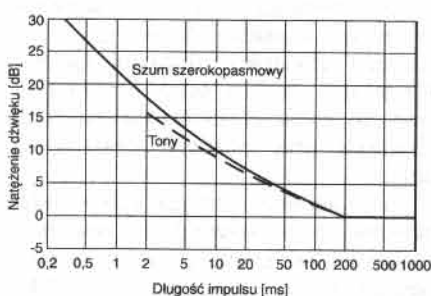
Pokazują one zależność czułości przeciętnego ucha ludzkiego od częstotliwości. Możemy powiedzieć, że nasze ucho stanowi pewnego



Rys. 3. Zależność głośności od poziomu głośności

Tab. 1. Charakterystyki częstotliwościowe filtrów ważonych i odchyłki dopuszczalne dla różnych klas przyrządów

Wartości względne, dB					Częstotliwość znamionowa Hz	Dopuszczalne odchyłki, dB dla przyrządów klasy:		
A	B	C	D	LIN		0	1	2
-70,40	-38,2	-14,3	-26,6	0	10	+2; -∞	+3,0; -∞	+5
-63,40	-33,2	-11,2	-24,6	0	12,5	+2; -∞	+3,0; -∞	+5
-56,70	-28,5	-8,5	-22,6	0	16	+2; -∞	+3,0; -∞	+5
-50,50	-24,2	-6,2	-20,6	0	20	±2	±3,0	±3
-47,70	-20,4	-4,4	-18,7	0	25	±1,5	±2,0	±3
-39,40	-17,1	-3,0	-16,7	0	31,5	±1	±1,5	±3
-34,60	-14,2	-2,0	-14,7	0	40	±1,5	±1,5	±2
-30,20	-11,6	-1,3	-12,8	0	50	±1	±1,5	±2
-26,20	-9,3	-0,8	-10,9	0	63	±1	±1,5	±2
-22,50	-7,4	-0,5	-9,0	0	80	±1	±1,5	±2
-19,10	-5,6	-0,3	-7,2	0	100	±0,7	±1,5	±1,5
-16,10	-4,2	-0,2	-5,5	0	125	±0,7	±1,5	±1,5
-13,40	-3,0	-0,1	-4,0	0	160	±0,7	±1,5	±1,5
-10,90	-2,0	0	-2,6	0	200	±0,7	±1,5	±1,5
-8,80	-1,3	0	-1,6	0	250	±0,7	±2	±1,5
-6,60	-0,8	0	-0,8	0	315	±0,7	±2	±1,5
-4,80	-0,5	0	-0,4	0	400	±0,7	±2,5	±1,5
-3,20	-0,3	0	-0,3	0	500	±0,7	±3	±1,5
-1,90	-0,1	0	-0,5	0	630	±0,7	±4	±1,5
-0,80	0	0	-0,6	0	800	±0,7	±5	±1,5
0	0	0	0	0	1000	±0,7	±1,0	±1,5
+0,60	0	0	2,0	0	1250	±0,7	±1,0	±1,5
+1,00	0	-0,1	4,9	0	1600	±0,7	±1,0	±1,5
+1,20	-0,1	-0,1	7,9	0	2000	±0,7	±1,0	±1,5
+1,30	-0,2	-0,2	10,4	0	2500	±0,7	±1,0	±2
+1,20	-0,4	-0,4	11,6	0	3150	±0,7	±1,0	±2
+1,00	-0,7	-0,7	11,1	0	4000	±0,7	±1,0	±2,5
+0,50	-1,2	-1,2	9,6	0	5000	±1	±1,5	±3
-0,10	-1,9	-1,9	7,6	0	6300	+1; -1,5	±1,5; -2,0	±4
-1,10	-2,9	-2,9	5,5	0	8000	+1; -2,0	±1,5; -3,0	±5
-2,50	-4,3	-4,3	3,4	0	10000	+2; -3,0	+5; -4,0	±5; -∞
-4,30	-6,1	-6,2	1,4	0	12500	+2; -3,0	+3,0; -6,0	±5; -∞
-6,60	-8,4	-8,5	-0,7	0	10000	+2; -3,0	+3,0; -∞	±5; -∞
-9,30	-11,1	-11,2	-2,7	0	20000	+2; -3,0	+3,0; -∞	±5; -∞



Rys. 4. Wpływ czasu trwania impulsu dźwiękowego na jego głośność

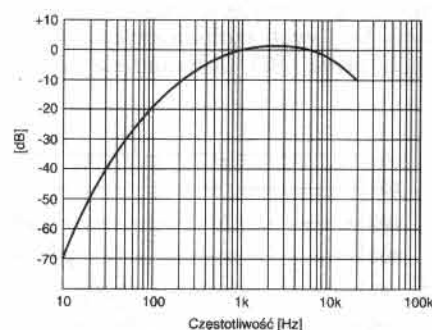
rodzaju filtr pasmowoprzepustowy. Jaka jest charakterystyka częstotliwościowa takiego filtra? Oczywiście zależy ona od natężenia dźwięku, nie możemy więc mówić o jednej charakterystyce, tylko o rodzinie charakterystyk.

Tymczasem przy pomiarach akustycznych zależy nam na tym, aby

wskazanie przyrządu pomiarowego było zgodne z naszym subiektywnym odczuciem, w przeciwnym wypadku uzyskane wyniki nie będą mieć większego związku z życiem.

Tak więc przy pomiarach dźwięków o różnym poziomie charakterystyka częstotliwościowa używanego przyrządu pomiarowego powinna odpowiadać charakterystyce czułości ludzkiego ucha. Jak się przekonaliśmy, nie jest to wcale takie proste.

W elektroakustyce najczęściej podaje się charakterystykę amplitudowo-częstotliwościową filtrów w odniesieniu do umownie przyjętej częstotliwości środkowej równej 1000Hz tak, że czym większe tłumienie, tym charakterystyka przebiega niżej. Tymczasem charakterystyki czułości ucha ludzkiego (rysunki 1 i 2) narysowano jakby odwrotnie. Jeśli chcielibyśmy przedstawić charakterystykę filtra odwzorowującego właściwości ucha



Rys. 5. Charakterystyka filtra ważonego A

przy jakimś poziomie natężenia dźwięku, to wyglądałaby ona mniej więcej tak jak na rysunku 5.

Piotr Górecki, AVT

Dokończenie artykułu w EP11/95.