

LABORATORIUM ELEKTROAKUSTYKI

ĆWICZENIE NR 2

Pomiary i analiza ciśnienia akustycznego

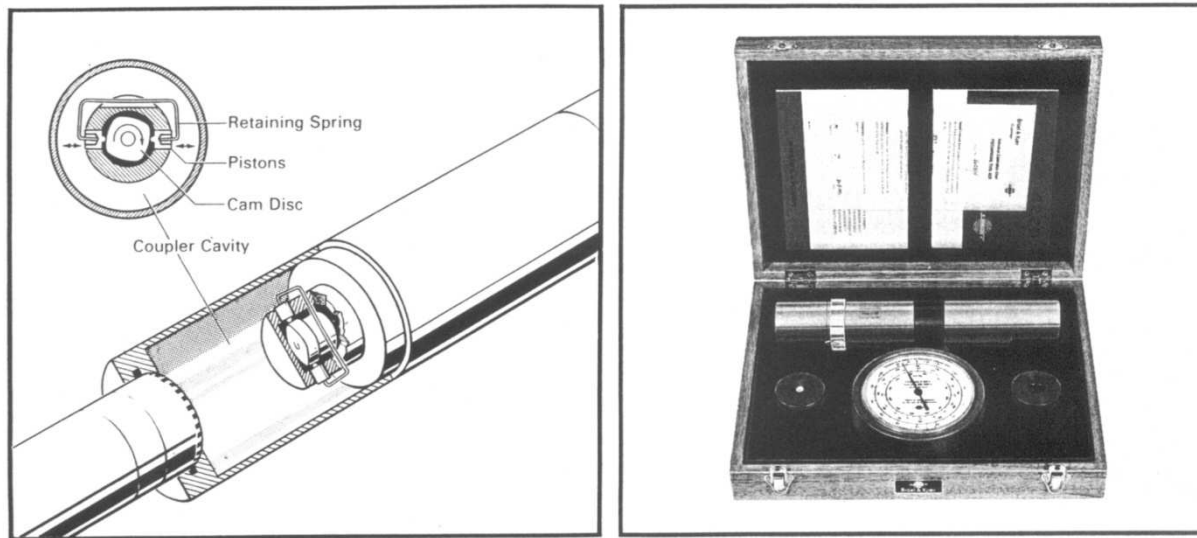
Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie sposobu pomiaru i analizy widmowej przebiegów akustycznych, jak też budowy i parametrów elektroakustycznych przyrządów stosowanych w tych pomiarach.

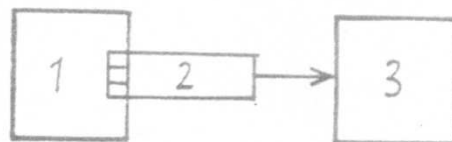
1. Zadania laboratoryjne

1.1. MIKROFONY POMIAROWE

1.1.1. Pomiar skuteczności mikrofonów z wykorzystaniem pistonfonu

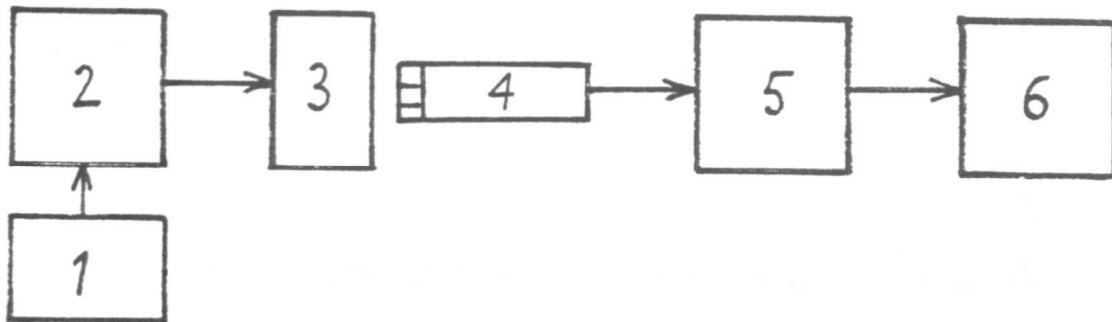


Rys.1. Pistonfon stosowany do wzorcowania torów z mikrofonami pomiarowymi.



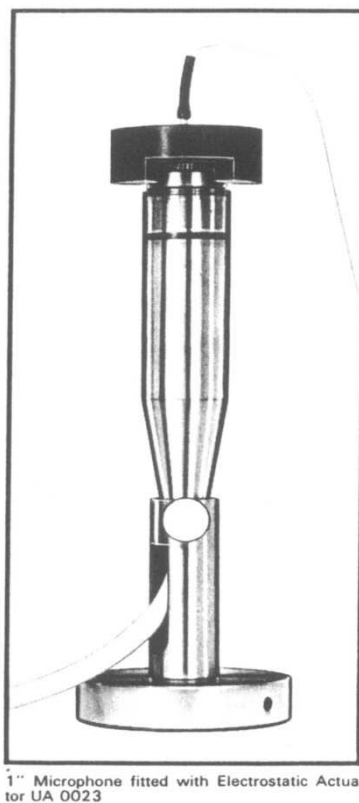
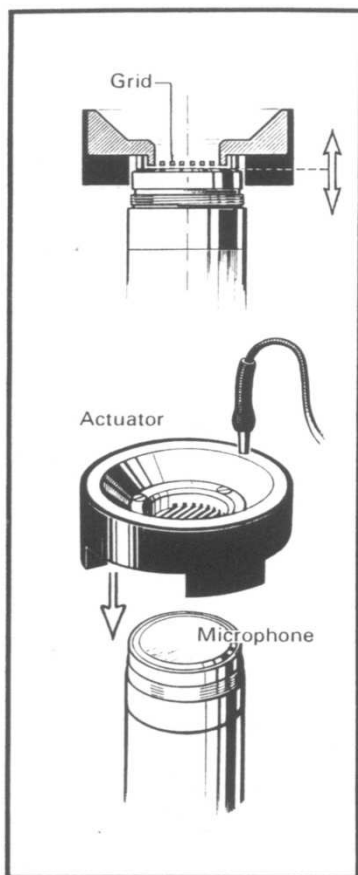
Rys.2. Układ do wzorcowania toru miernika poziomu dźwięku pistonfonem:
1 – pistonfon, 2 – badany mikrofon + przedwzmacniacz, 3 – wzmacniacz pomiarowy

- A. Wykonać wzorcowanie toru pomiarowego (dobór wzmocnienia w zależności od skuteczności zastosowanego mikrofonu) z wykorzystaniem wewnętrznego generatora wzmacniacza. W tym celu należy:
- Ustawić tłumiki wzmacniacza na wartość **0.1 V** (*Input Section Attenuator – 0.1 V; Output Section Attenuator – 1*).
 - Włączyć generator wewnętrzny wzmacniacza (klawisz *Ref.50mV RMS*).
 - Odczytać wartość skuteczności mikrofonu nieobciążonego S_0 [mV/Pa] z jego karty kalibracyjnej (Open Circuit Sensitivity).
 - Skorygować odczytaną skuteczność mikrofonu zgodnie z wartością wzmocnienia wprowadzanego przez przedwzmacniacz typu 2619 B&K ($G = -0,2$ dB, $g = 0,98$), czyli $S = S_0 \cdot g$
 - Zmieniając śrubokrętem ustawienie potencjometru „*Sens.*” (oś potencjometru w otworze przy gnieździe „*Preamp. Input*”), wyregulować wzmocnienie toru pomiarowego tak, by wskazówka przyrządu wychyłowego wzmacniacza pokazywała wartość skuteczności mikrofonu S (na pomocniczej, czerwonej skali wskaźnika oznaczonej „*Micr. Sens.*”).
 - Wyłączyć generator wewnętrzny wzmacniacza (*Ref.50mV RMS*) przez lekkie wciśnięcie jednego z klawiszy „*Insert Volt. Cal.*” (*Int.* lub *Ext.*).
- B. W układzie pomiarowym jak na rys. 2 wykonać wzorcowanie toru pomiarowego z wykorzystaniem pistonfonu. W tym celu należy:
- Odczytać z karty kalibracyjnej pistonfonu wytwarzany przez niego poziom ciśnienia akustycznego L_p [dB] dla ciśnienia atmosferycznego 760 mmHg (1013 hPa).
 - Skorygować tę wartość zgodnie z poprawką ΔL_p [dB] wynikającą z aktualnego ciśnienia atmosferycznego (odczytaną z zewnętrznej skali barometru będącego w zestawie z pistonfonem). Poziom ciśnienia akustycznego wytwarzany dla aktualnych wartości ciśnienia atmosferycznego wynosi $L_k = L_p + \Delta L_p$ [dB].
 - Ustawić zakres pomiarowy wzmacniacza na wartość właściwą dla poziomu ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez pistonfon (L_k) (formuła Excela: =LICZBA.CAŁK($L_k / 10$)*10) (*Output Section Attenuator – 1, przetaczać Input Section Attenuator*).
- Uwaga: Wartość mierzonego przez wzmacniacz pomiarowy poziomu ciśnienia akustycznego jest sumą, ustawionego tłumikami „*Input Section Attenuator*” i „*Output Section Attenuator*”, zakresu pomiarowego (podświetlanego w okienku dolnej linijki skali wzmacniacza) i odczytu wartości wynikającej z wychylenia wskazówki miernika (górną skalą wskaźnika).
- Mikrofon umieścić w komorze pistonfonu (wsunąć aż poczujemy opór) (dla mikrofonów o średnicy $\neq 1$ założyć na pistonfon odpowiedni reduktor).
 - Włączyć pistonfon i odczytać wskazywany poziom ciśnienia akustycznego L_m [dB].
 - Obliczyć błąd podstawowy miernika jako różnicę między wskazaniem miernika L_m a poziomem ciśnienia akustycznego wytwarzanym przez pistonfon L_k ($\varepsilon = L_m - L_k$ [dB]).



Rys.3. Układ do pomiaru charakterystyki częstotliwościowej mikrofonu pobudnikiem elektrostatycznym:

1 - generator sinusoidalny systemu pomiarowego APx525, **2** – układ zasilający pobudnik elektrostatyczny (Actuator Supply), **3** – pobudnik elektrostatyczny, **4** - badany mikrofon + przedwzmacniacz, **5** - wzmacniacz pomiarowy, **6** – analizator systemu pomiarowego APx525.



1" Microphone fitted with Electrostatic Actuator UA 0023

- Włączyć generator (**Generator ON**)
 - Mierzone napięcie wyjściowe przyjąć jako napięcie odniesienia dla miary decybelowej (dBr). W tym celu należy otworzyć w panelu **Reference Levels** okienko **Set dBr**, uruchomić **Set A** i zamknąć okienko (**Close**)
 - Korzystając z funkcji **Stepped Frequency Sweep** wykreślić charakterystykę częstotliwościową badanego mikrofonu i ją zdokumentować. W tym celu należy:
 - Do podstawowej listy pomiarów **Project** dodać pomiary z przestrajaniem częstotliwości.. W tym celu należy otworzyć folder **Add Measurements** a w nim zakładkę **Sweeps** (patrz rys. 6a). Z przedstawionej tam listy pomiarów wybrać **Stepped Frequency Sweep** i dodać (**Add**) do listy pomiarów **Project**. Zamknąć okienko (**Close**).
 - W panelu **Signal Generation** ustawić **Level 40 mV**,
 - Przed uruchomieniem przestrajania (**Start**) zmienić na wykresie jednostki osi Y na **dBrA** oraz wybrać **autoskalowanie**. W tym celu nacisnąć prawy klawisz myszy, gdy kursor ustawiony jest w polu wykresu. W zakładce **Autoscale** zaznaczyć **X and Y Axis**.
 - Uruchomić przestrajanie (**Start**) (patrz rys. 7).
 - Zapisać zmierzoną charakterystykę. W tym celu nacisnąć prawy klawisz myszy, gdy kursor jest ustawiony w polu wykresu. Za pomocą polecenia **Save** zapisać wykres w wybranym katalogu.
 - Korzystając z możliwości powiększenia wykresu w zdefiniowanym obszarze (ikona z lupą u góry wykresu) przeanalizować przebieg charakterystyki w zakresie wyższych częstotliwości.
 - Korzystając z funkcji **Data** (uaktywnienie paska z tą funkcją korzystając z prawego klawisza myszy umiejscowionej w obszarze wykresu – rys.8) odczytać wartości tłumienia charakterystyki w tym zakresie częstotliwości. Wartości te należy też zapisać w arkuszu kalkulacyjnym Excel (polecenie **Export Graph Data** korzystając z funkcji **Data** – patrz rys. 8, 9). (Uwaga: Należy zapisać tylko wartości poziomu sygnału. W tym celu należy „odhaczyć” wszystkie zapisywane wartości za pomocą polecenia **Uncheck All**, a następnie zaznaczyć tylko okienko **Level**. Po zatwierdzeniu **OK**. zapisać w wybranym katalogu).
2. W sprawozdaniu wyznaczyć charakterystykę badanego mikrofonu w polu swobodnym korzystając z danych podanych w tabeli 1. W tym celu należy na zmierzony i przeniesiony na papier wykres charakterystyki ciśnieniowej mikrofonu nanieść poprawki z tabeli 1 dla podanych tam częstotliwości i zaaprosymować przebieg charakterystyki badanego mikrofonu w polu swobodnym.

1.2. Miernik poziomu dźwięku

1.2.1. Pomiary charakterystyk częstotliwościowych toru miernika poziomu dźwięku

1. Korzystając z funkcji **Stepped Frequency Sweep** wykreślić charakterystykę częstotliwościową miernika poziomu dźwięku **LIN (Z)** (patrz rys. 10) i zdokumentować ją. W tym celu należy:
 - Wyjście generatora systemu pomiarowego APx525 połączyć z gniazdem mikrofonowym miernika poziomu dźwięku, a wejście analizatora systemu pomiarowego APx525 z wyjściem zmiennoprądowym miernika poziomu dźwięku.
 - Włączyć miernik poziomu dźwięku i przełącznik filtrów korekcyjnych ustawić w pozycji **LIN**.
 - Jako wartość odniesienia (dBrA). przyjąć wartość napięcia mierzoną na wyjściu miernika dla częstotliwości $f = 1$ kHz. W tym celu należy:
 - Z listy pomiarów **Project** wybrać **Reference Levels**.
 - W okienku **Generator** w panelu **Signal Generation** ustawić **Level 40 mV, Frequency 1000 Hz**
 - Włączyć generator (**Generator ON**)
 - Za pomocą tłumika **BEREICH 1** i regulatora czułości (potencjometr oznaczony „trójkątem”) miernika poziomu dźwięku dobrać wystawienie miernika tak, by wskazówka pokazywała wartość ok. 0 dB.
 - Mierzone napięcie wyjściowe miernika poziomu dźwięku przyjąć jako napięcie odniesienia dla miary decybelowej (dBr). W tym celu należy otworzyć w panelu **Reference Levels** okienko **Set dBr**, uruchomić **Set A** i zamknąć okienko (**Close**).
 - Korzystając z funkcji **Stepped Frequency Sweep** wykreślić charakterystykę częstotliwościową toru miernika **LIN**
 - Przed uruchomieniem przestrajania (**Start**) zmienić na wykresie jednostki osi **Y** na **dBrA** oraz wybrać autoskalowanie. W tym celu nacisnąć prawy klawisz myszy, gdy kursor ustawiony jest w polu wykresu. W zakładce **Autoscale** zaznaczyć **X and Y Axis**.
 - Uruchomić przestrajanie (**Start**).
2. Powtórzyć pomiary charakterystyk dla miernika z włączonymi kolejno filtrami korekcyjnymi A, B, C, D. (aby charakterystyki dla różnych filtrów znalazły się na jednym wykresie zaznaczyć okienko **Append Graph Data**).

Mierzone charakterystyki można opisywać np. Z, A itd. korzystając z polecenia **Graph Properties** (uaktywnienie paska z tą funkcją korzystając z prawego klawisza myszy umiejscowionej w obszarze wykresu) i w zakładce **Traces** odnośnik **Label**. W zakładce tej można również edytować kolor, rodzaj i grubość linii wykresu.

3. Zapisać zmierzone charakterystyki. W tym celu nacisnąć prawy klawisz myszy, gdy kursor jest ustawiony w polu wykresu. Za pomocą polecenia **Save** zapisać wykres w wybranym katalogu.
4. Wartości te należy też zapisać w arkuszu kalkulacyjnym Excel (polecenie **Export Graph Data** korzystając z funkcji **Data** – patrz rys. 8, 9). (*Uwaga: Należy zapisać tylko wartości poziomu sygnału. W tym celu należy „odhaczyć” wszystkie zapisywane wartości za pomocą polecenia **Uncheck All**, a następnie zaznaczyć tylko okienko **Level**. Po zatwierdzeniu **OK**. zapisać w wybranym katalogu).*

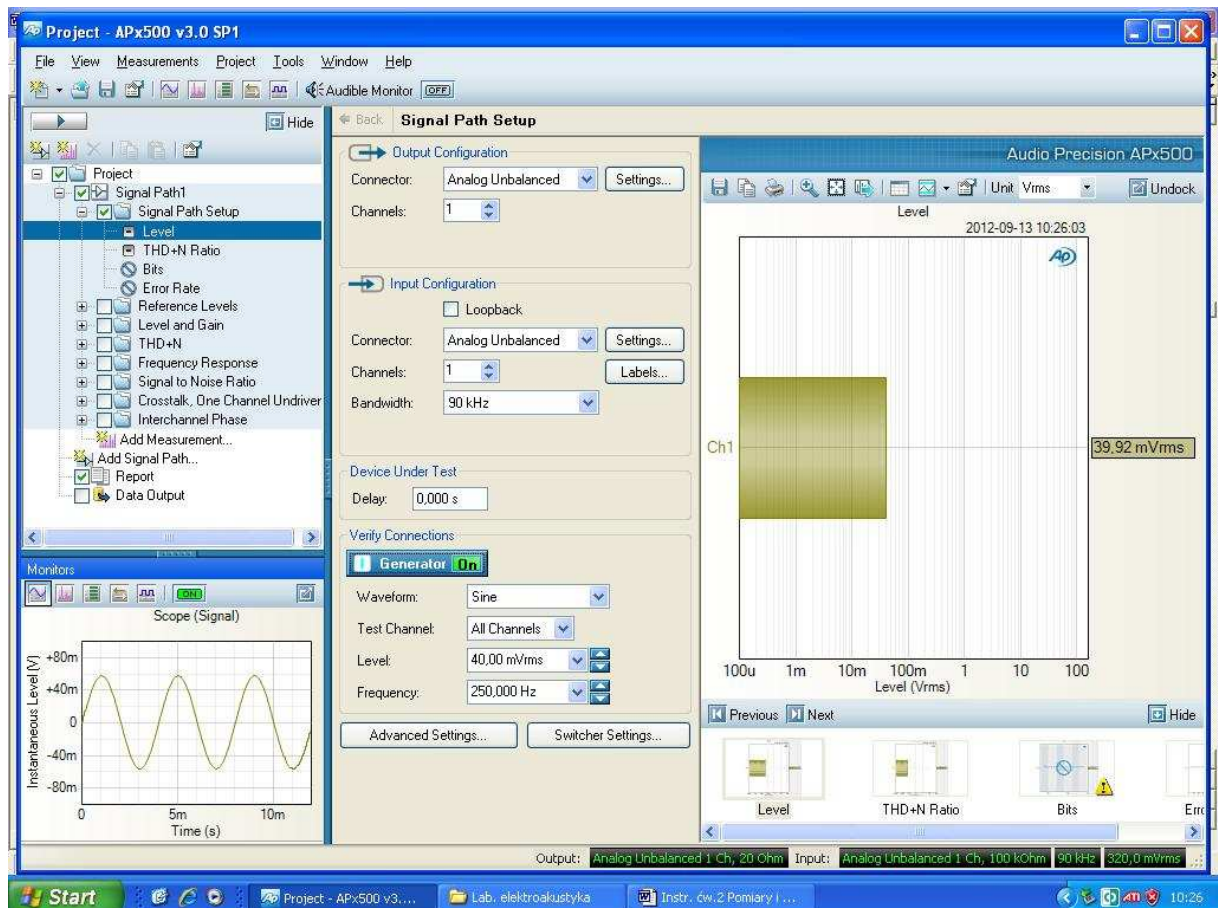
5. W sprawozdaniu należy porównać otrzymane przebiegi charakterystyk z wymaganiami normowymi podanymi w tabeli 2.

.2.2. Pomiary charakterystyk częstotliwościowych filtrów pasmowych miernika poziomu dźwięku

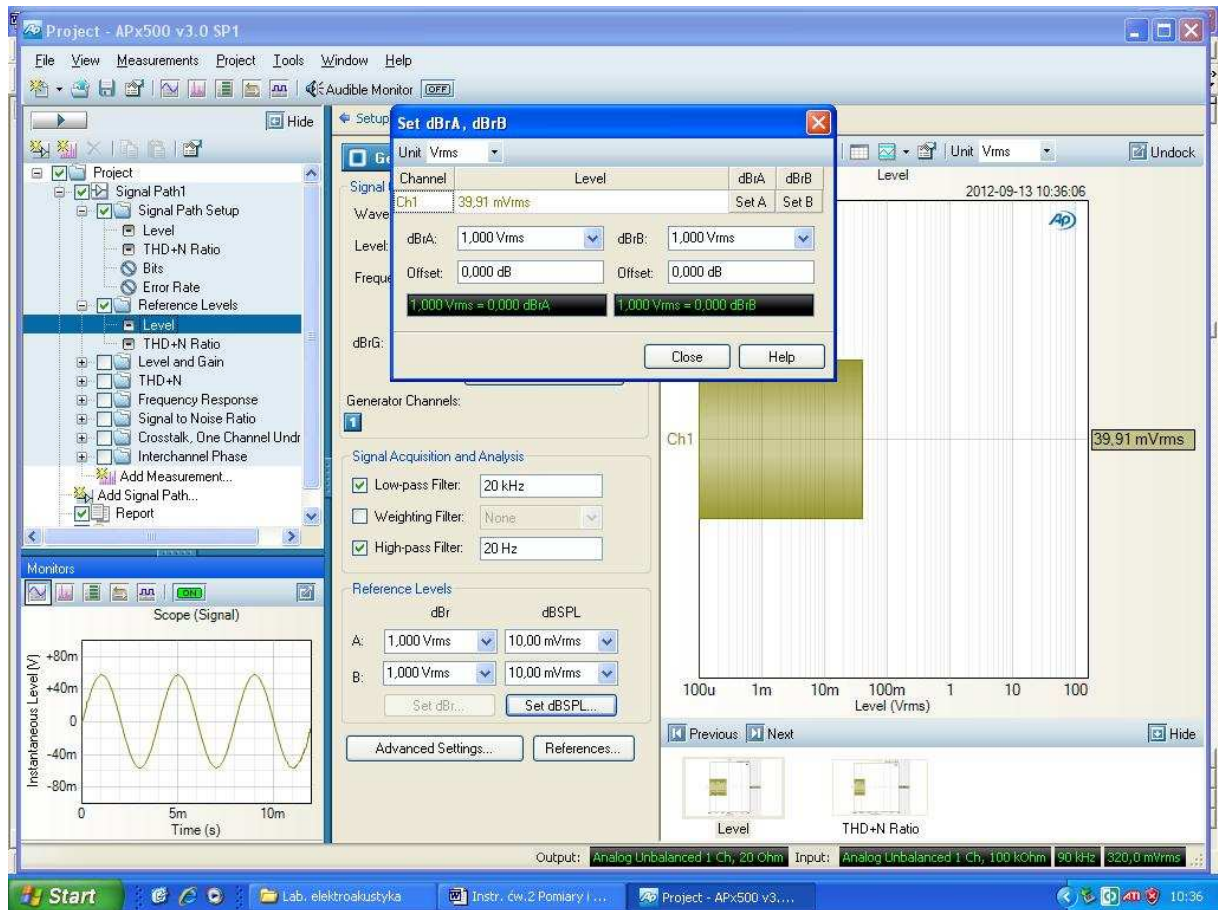
Korzystając z funkcji **Stepped Frequency Sweep** wykreślić charakterystyki częstotliwościowe wybranych filtrów pasmowych miernika poziomu dźwięku (patrz rys. 11) i je zdokumentować. W tym celu należy:

1. Przełącznik korekcji charakterystyki częstotliwościowej miernika ustawić w pozycji **OKT. FILTER**.
2. Wybrać częstotliwość środkową filtru za pomocą przełącznika **OKTAV – FILTER**.
 - Jako wartość odniesienia (dBrA). przyjąć wartość napięcia mierzona na wyjściu miernika dla częstotliwości środkowej wybranego filtru. W tym celu należy:
 - Z listy pomiarów **Project** wybrać **Reference Levels**.
 - W panelu **Signal Generation** okienka **Generator ; Frequency** – wpisać lub wybrać wartość równą częstotliwości środkowej wybranego filtru 1/1-oktawowego.
 - Włączyć generator (**Generator ON**).
 - Za pomocą tłumika **BEREICH 1** i regulatora czułości (potencjometr oznaczony „trójkątem”) miernika poziomu dźwięku dobrać występowanie miernika tak, by wskazówka pokazywała wartość ok. 10 dB.
 - Mierzone napięcie wyjściowe miernika poziomu dźwięku przyjąć jako napięcie odniesienia dla miary decybelowej (dBr). W tym celu należy otworzyć w panelu **Reference Levels** okienko **Set dBr**, uruchomić **Set A** i zamknąć okienko (**Close**)
 - Korzystając z funkcji **Stepped Frequency Sweep** wykreślić charakterystykę wybranego filtru.
 - Przed uruchomieniem przestrajania (**Start**) w panelu **Signal Generation** zmienić liczbę punktów wykresu (**Points**) na **150**, celem dokładnego zdjęcia charakterystyki, jak też ustawić zakres przestrajania: **Start Frequency** na wartość 8 razy większą od ustawionej częstotliwości środkowej wybranego filtru, a **Stop Frequency** na wartość równą 1/8 ustawionej częstotliwości środkowej wybranego filtru.
 - Zmienić na wykresie jednostki osi **Y** na **dBrA** oraz wybrać autoskalowanie. W tym celu nacisnąć prawy klawisz myszy, gdy kursor ustawiony jest w polu wykresu. W zakładce **Autoscale** zaznaczyć **X and Y Axis**.
 - Uruchomić przestrajanie (**Start**).
3. Zmierzoną charakterystykę opisać podając wartość częstotliwości środkowej, korzystając z polecenia **Graph Properties** (uaktywnienie paska z tą funkcją korzystając z prawego klawisza myszy umiejscowionej w obszarze wykresu) i w zakładce **Traces** odnośnik **Label**. W zakładce tej można również edytować kolor, rodzaj i grubość linii wykresu.
4. Zapisać zmierzoną charakterystykę. W tym celu nacisnąć prawy klawisz myszy, gdy kursor jest ustawiony w polu wykresu. Za pomocą polecenia **Save** zapisać wykres w wybranym katalogu.
5. Wartości opisujące charakterystykę należy też zapisać w arkuszu kalkulacyjnym Excel (polecenie **Export Graph Data** korzystając z funkcji **Data** – patrz rys. 8, 9). (*Uwaga: Należy zapisać tylko wartości poziomu sygnału. W tym celu należy „odhaczyć” wszystkie zapisywane wartości za pomocą polecenia **Uncheck All**, a następnie zaznaczyć tylko okienko **Level**. Po zatwierdzeniu **OK**. zapisać w wybranym katalogu.*)

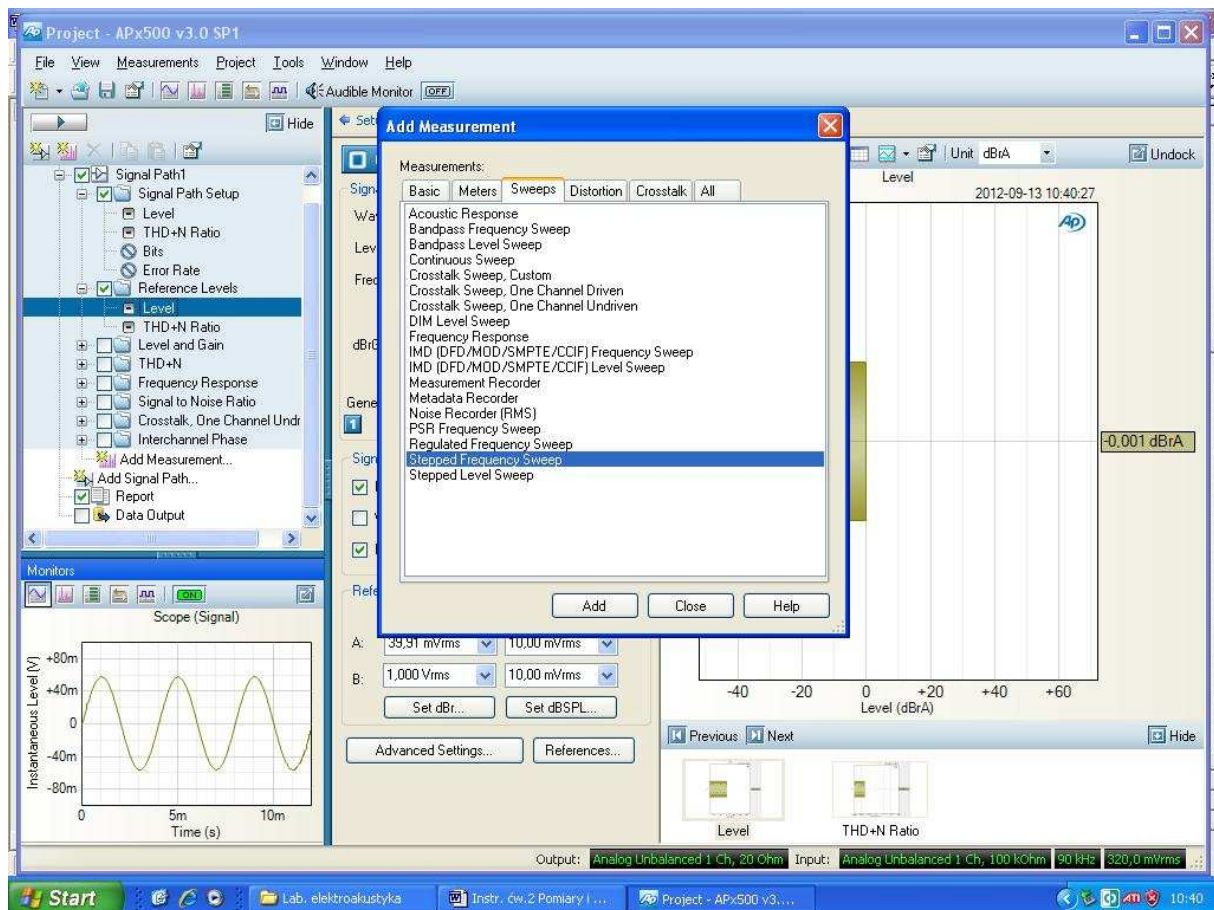
6. Powtórzyć pomiar dla filtra o innej częstotliwości środkowej.
7. W sprawozdaniu porównać otrzymane przebiegi charakterystyk z wymaganiami normowymi podanymi w tabeli 3.



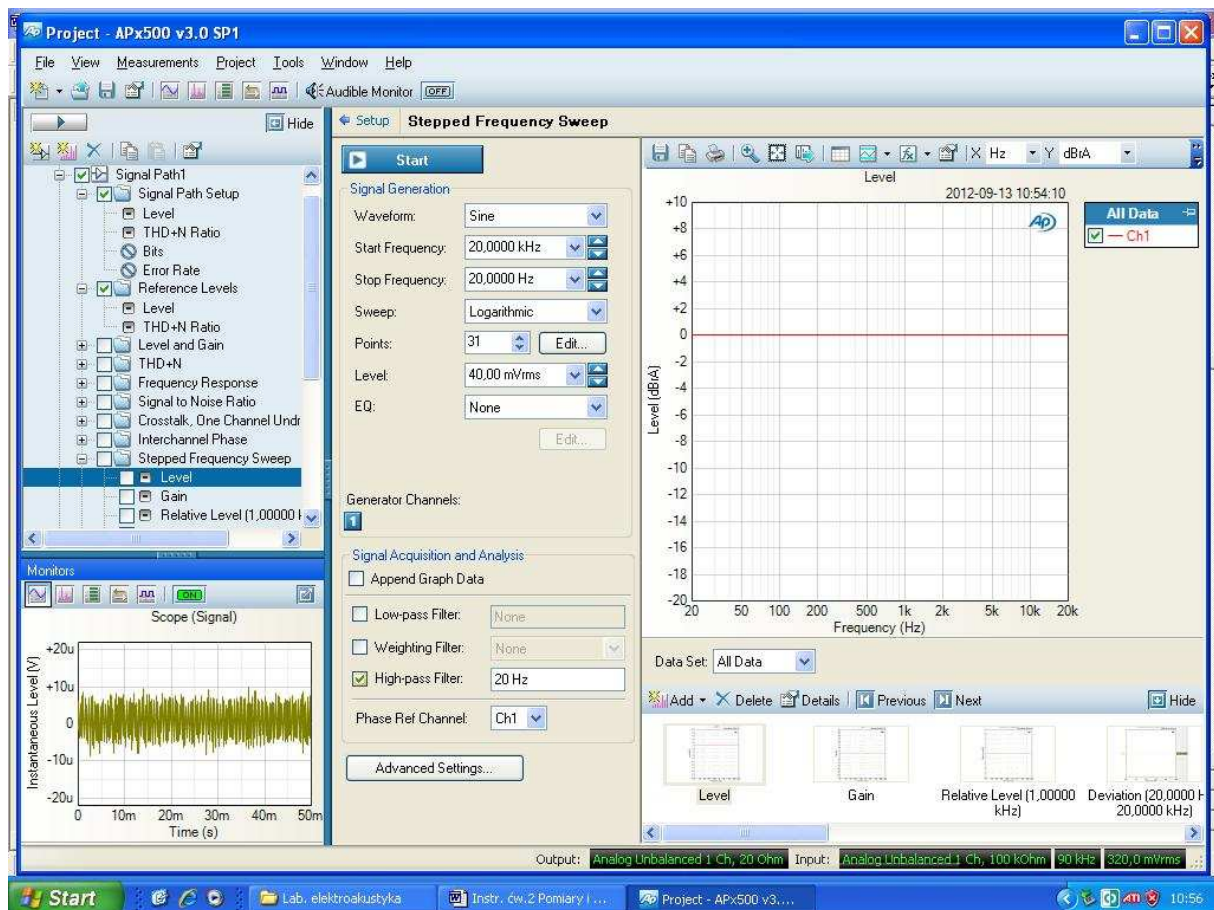
Rys.5. Połączenia i nastawy w okienku generatora systemu pomiarowego APx525.



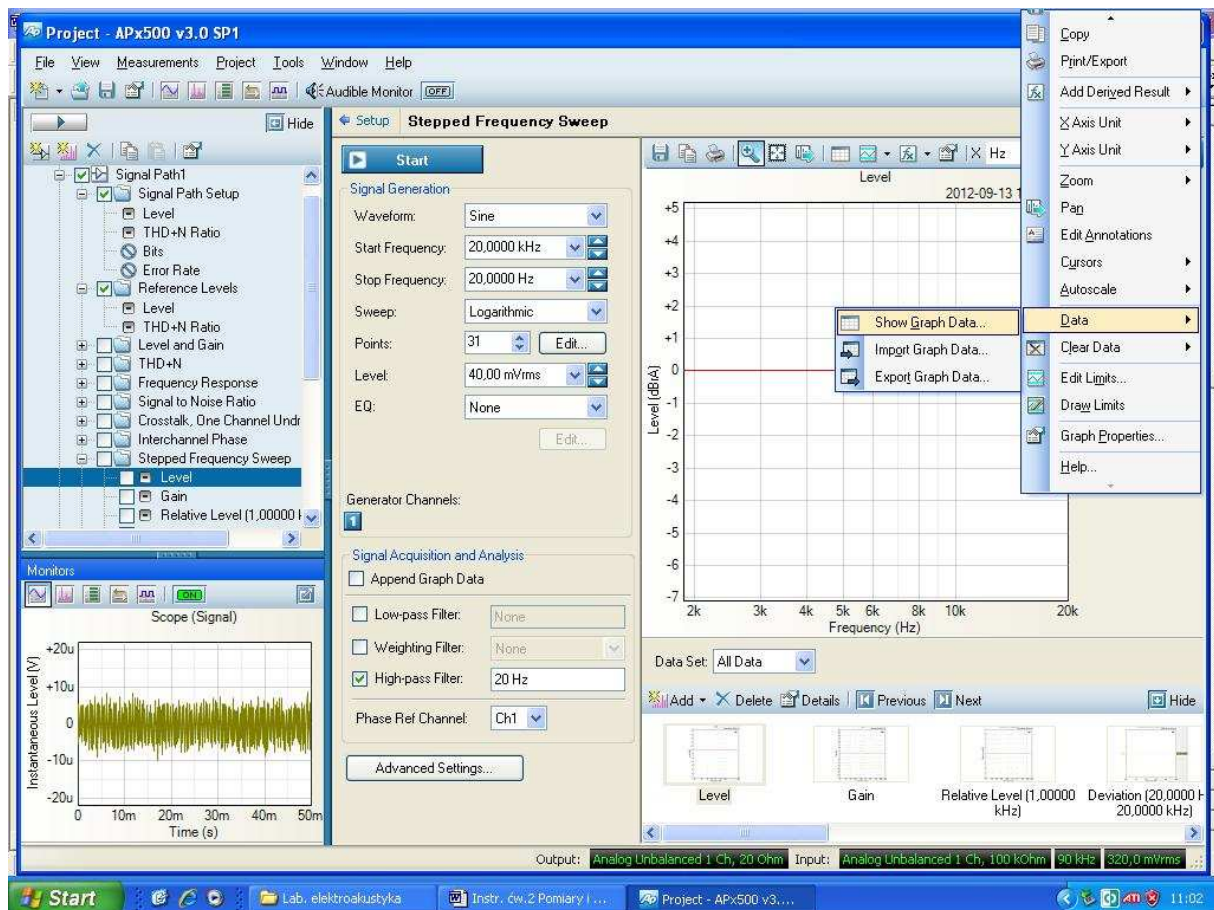
Rys. 6. Ustalenie wartości odniesienia w kanale A analizatora (dBrA).



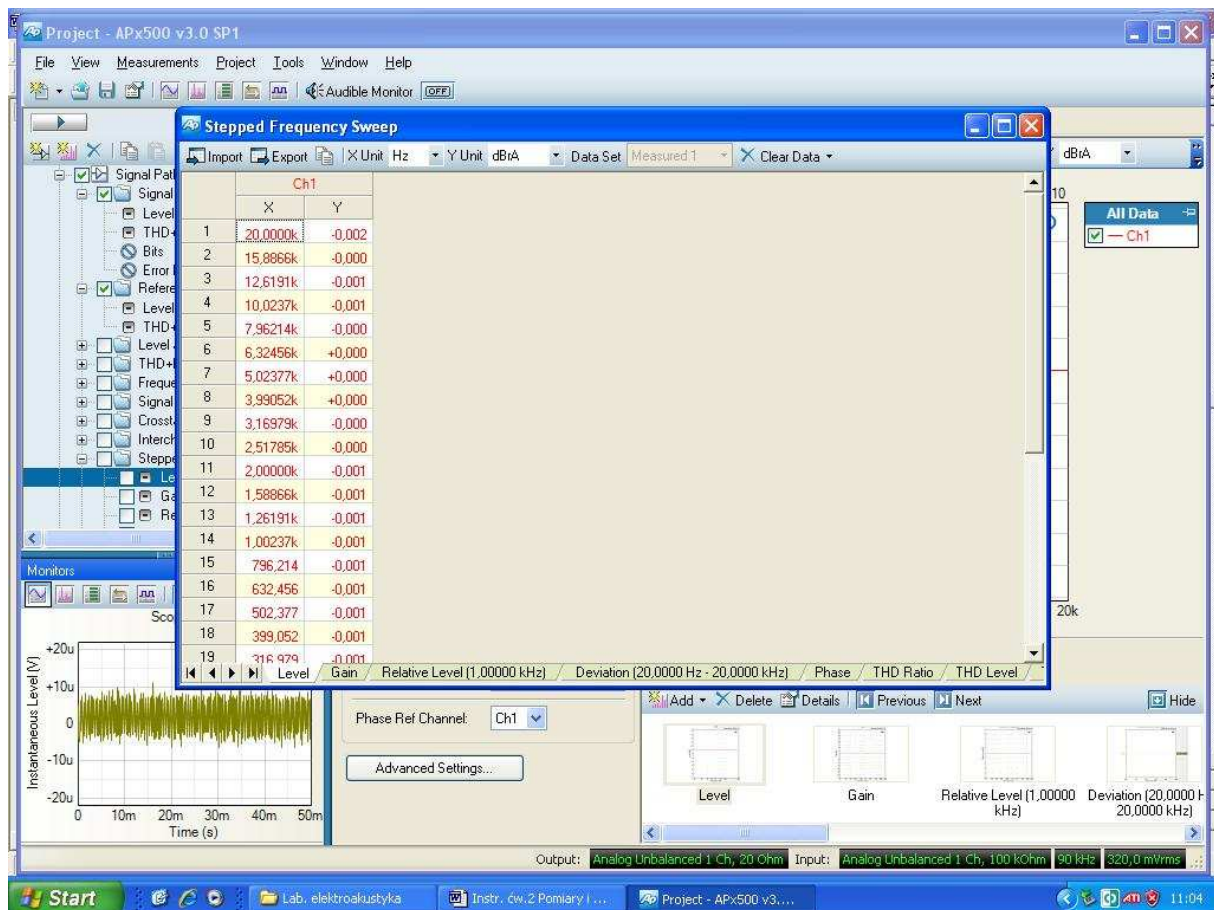
Rys. 6a. Dodanie funkcji pomiarowej Stepped Frequency Sweep



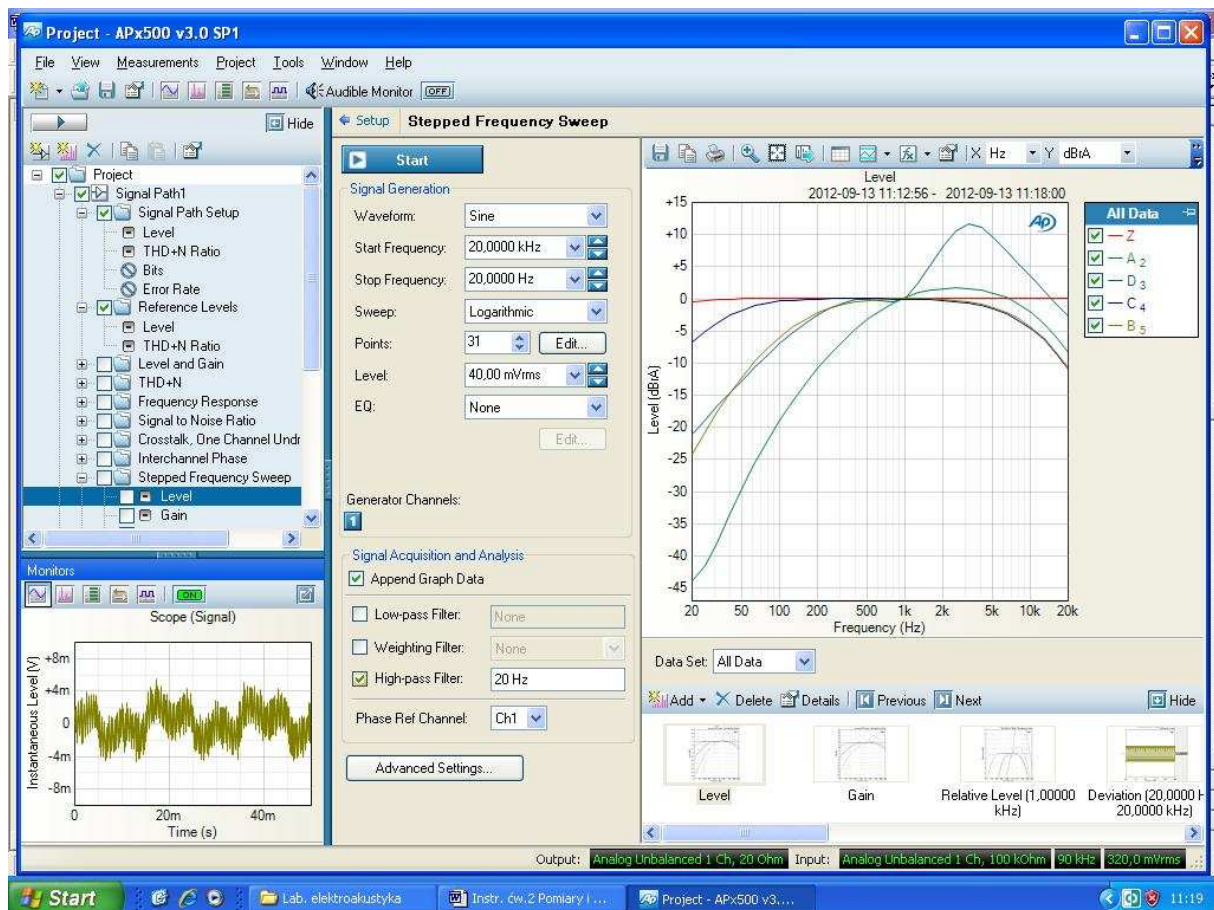
Rys. 7. Funkcja Stepped Frequency Sweep do wykreślenia charakterystyki mikrofonu.



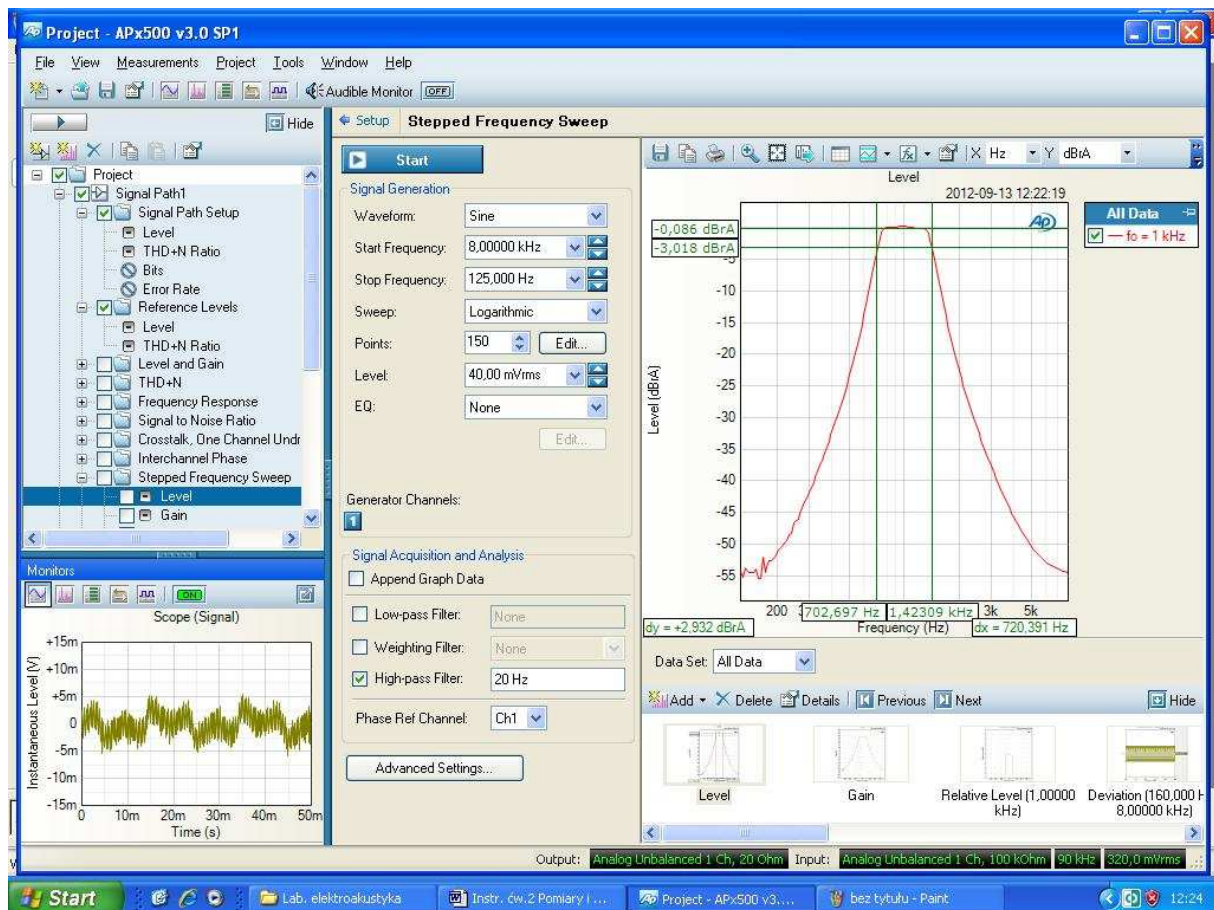
Rys. 8. Analiza przebiegu charakterystyki częstotliwościowej mikrofonu w zakresie wyższych częstotliwości.



Rys. 9. Tabela z danymi charakterystyki częstotliwościowej. Korzystając z polecenia Export Graph Data można przenieść tabelę do arkusza kalkulacyjnego Excel.



Rys. 10. Funkcja Stepped Frequency Sweep do wykreślenia charakterystyk częstotliwościowych miernika poziomu dźwięku.



Rys. 11. Funkcja Stepped Frequency Sweep do wykreślenia charakterystyk częstotliwościowych filtrów pasmowych miernika poziomu dźwięku.

Tabela 1.

Poprawki stanowiące różnicę między charakterystyką częstotliwościową skuteczności mikrofonu w swobodnym polu akustycznym i charakterystyką skuteczności ciśnieniowej dla różnych typów mikrofonów

Typ mikrofonu	Poprawki, w dB, dla wymienionych częstotliwości w kHz															
	1	2	3	4	5	7	8	10	12,5	15	16	18	20	30	40	50
B&K 4117		1,1			4,1			10,3								
B&K 4129 B&K 4176		0,5			2,0			8,0		10,5						
B&K 4131 B&K 4145		1,3			4,0			9,0		11,8		13,0				
B&K 4133		0,5			1,4			4,1		7,0		8,0		11,0		
B&K 4135		0,2			0,4			1,3		3,8		5,0		10,5	13,2	
B&K 4148		0,6			1,5			4,8		7,5		8,4				
B&K 4149		0,5			1,5			5,0		7,5		8,0	9,0			
B&K 4155		0,5			1,5			4,5		7,5			9,0			
B&K 4161	0,5	1,0			4,0			10,0		12,0		13,0	12,0			
B&K 4165		0,5			1,5			5,0		8,0			9,5			
B&K 4180	0	0,1		0,2			0,7		1,2		0,8					
B&K 4188	0,15	0,35		1,2			3,85		7,3							
RFT MK-102		1,2			3,5			8,0		12,5		15,5	16,0			
RFT MK-201		0			1,5			3,2		6,0			9,0	12,5		14,5
RFT MK-202		0,2			1,4			3,8		7,0			8,5			
RFT MK-221		0,25	0,5		1,2			4,7		7,2		9,0	10,2			
Sonopan WK-21		0,5			1,5			4,7		7,5			9,0			
Sonopan ZAA		0,6			3,7			9,5		11,7						
SV02/C4		0,5			1,5	2,5		5,0		8,0		9,0	9,5			

Tabela 2. Wartości częstotliwościowych charakterystyk korekcyjnych oraz błędy dopuszczalne uwzględniające maksymalne wartości rozszerzonej niepewności pomiaru

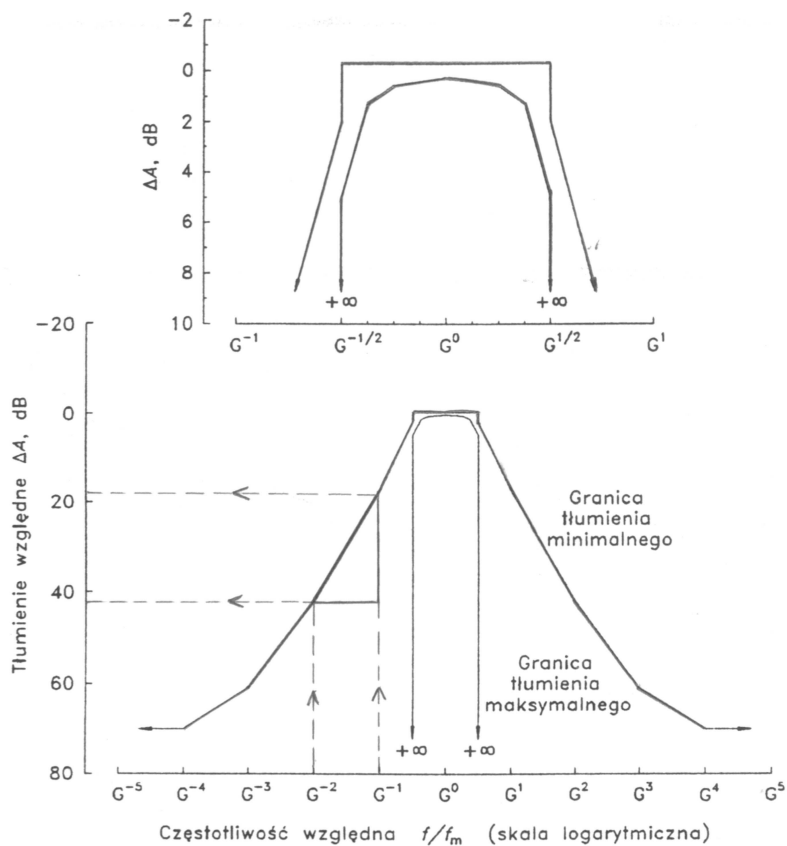
Frequency Hz	Curve A dB	Curve B dB	Curve C dB	Tolerance Limits (dB) for Curves A, B and C		Curve D dB	Tolerance Limits (dB) for Curve D	
10	-70.4	-38.2	-14.3	3	-∞	-26.5	3.5	-∞
12.5	-63.4	-33.2	-11.2	3.0	-∞	-24.5	3.5	-∞
16	-56.7	-28.5	- 8.5	3.0	-∞	-22.5	3.5	-∞
20	-50.5	-24.2	- 6.2	3.0	-3.0	-20.5	3.5	-3.5
25	-44.7	-20.4	- 4.4	2.0	-2.0	-18.5	2.5	-2.5
31.5	-39.4	-17.1	- 3.0	1.5	-1.5	-16.5	2.0	-2.0
40	-34.6	-14.2	- 2.0	1.5	-1.5	-14.5	2.0	-2.0
50	-30.2	-11.6	- 1.3	1.5	-1.5	-12.5	2.0	-2.0
63	-26.2	- 9.3	- 0.8	1.5	-1.5	-11	2.0	-2.0
80	-22.5	- 7.4	- 0.5	1.5	-1.5	- 9	2.0	-2.0
100	-19.1	- 5.6	- 0.3	1.0	-1.0	- 7.5	1.5	-1.5
125	-16.1	- 4.2	- 0.2	1.0	-1.0	- 6.0	1.5	-1.5
160	-13.4	- 3.0	- 0.1	1.0	-1.0	- 4.5	1.5	-1.5
200	-10.9	- 2.0	0	1.0	-1.0	- 3.0	1.5	-1.5
250	- 8.6	- 1.3	0	1.0	-1.0	- 2.0	1.5	-1.5
315	- 6.6	- 0.8	0	1.0	-1.0	- 1.0	1.5	-1.5
400	- 4.8	- 0.5	0	1.0	-1.0	- 0.5	1.5	-1.5
500	- 3.2	- 0.3	0	1.0	-1.0	0	1.5	-1.5
630	- 1.9	- 0.1	0	1.0	-1.0	0	1.5	-1.5
800	- 0.8	0	0	1.0	-1.0	0	1.5	-1.5
1000	0	0	0	1.0	-1.0	0	1.5	-1.5
1250	0.6	0	0	1.0	-1.0	2.0	1.5	-1.5
1600	1.0	0	- 0.1	1.0	-1.0	5.5	1.5	-1.5
2000	1.2	- 0.1	- 0.2	1.0	-1.0	8.0	1.5	-1.5
2500	1.3	- 0.2	- 0.3	1.0	-1.0	10	1.5	-1.5
3150	1.2	- 0.4	- 0.5	1.0	-1.0	11	1.5	-1.5
4000	1.0	- 0.7	- 0.8	1.0	-1.0	11	1.5	-1.5
5000	0.5	- 1.2	- 1.3	1.5	-1.5	10	2.0	-2.0
6300	- 0.1	- 1.9	- 2.0	1.5	-2.0	8.5	2.0	-2.5
8000	- 1.1	- 2.9	- 3.0	1.5	-3.0	6.0	2.0	-3.5
10000	- 2.5	- 4.3	- 4.4	2.0	-4.0	3.0	2.5	-4.5
12500	- 4.3	- 6.1	- 6.2	3.0	-6.0	0	3.5	-6.5
16000	- 6.6	- 8.4	- 8.5	3.0	-∞	- 4.0	3.5	-∞
20000	- 9.3	-11.1	-11.2	3.0	-∞	- 7.5	3.5	-∞

Uwaga: Zgodnie z najnowszą normą PN-EN 61672-1 w miernikach poziomu dźwięku stosuje się tylko charakterystyki korekcyjne A, C i Z (LIN).

Tabela 3. Wartości graniczne tłumienia względnego filtrów 1/1oktawowych ($G = 2$) i 1/3 oktawowych ($G = 2^{1/3}$) wg PN-EN 61260 (por. rys. 12)

Częstotliwość względna $f/f_m = \Omega$	Wartości graniczne minimalnego i maksymalnego tłumienia względnego dB		
	Klasa filtru		
	0	1	2
G^0	-0,15; +0,15	-0,3; +0,3	-0,5; +0,5
$G^{\pm 1/8}$	-0,15; +0,2	-0,3; +0,4	-0,5; +0,6
$G^{\pm 1/4}$	-0,15; +0,4	-0,3; +0,6	-0,5; +0,8
$G^{\pm 3/8}$	-0,15; +1,1	-0,3; +1,3	-0,5; +1,6
$<G^{-1/2}$ $>G^{-1/2}$	-0,15; +4,5	-0,3; +5,0	-0,5; +5,5
$G^{\pm 1/2}$	+2,3; +4,5	+2,0; +5,0	+1,6; +5,5
$G^{\pm 1}$	+18; + ∞	+17,5; + ∞	+16,5; + ∞
$G^{\pm 2}$	+42,5; + ∞	+42; + ∞	+41; + ∞
$G^{\pm 3}$	+62; + ∞	+61; + ∞	+55; + ∞
$\geq G^{-4}$	+75; + ∞	+70; + ∞	+60; + ∞
$\leq G^{-4}$	+75; + ∞	+70; + ∞	+60; + ∞

* Dla częstotliwości mniejszych od dolnej i większych od górnej częstotliwości granicznej pasma przepustowego wartość graniczna maksymalnego tłumienia względnego wynosi + ∞ ; patrz rysunek



Rys. 12. Granice minimalnego i maksymalnego tłumienia względnego filtrów 1/1 oktawowych ($G = 2$) i 1/3 oktawowych ($G = 2^{1/3}$) wg PN-EN 61260 (por. tabela 3).

2. Zagadnienia do przygotowania

- Wzorcowanie mikrofonowego toru pomiarowego.
- Charakterystyki częstotliwościowe mikrofonów pomiarowych.
- Poziomy wielkości akustycznych.
- Mierniki poziomu dźwięku.
- Filtry korekcyjne mierników poziomu dźwięku.
- Filtry tercjowe i oktauwowe.

Literatura

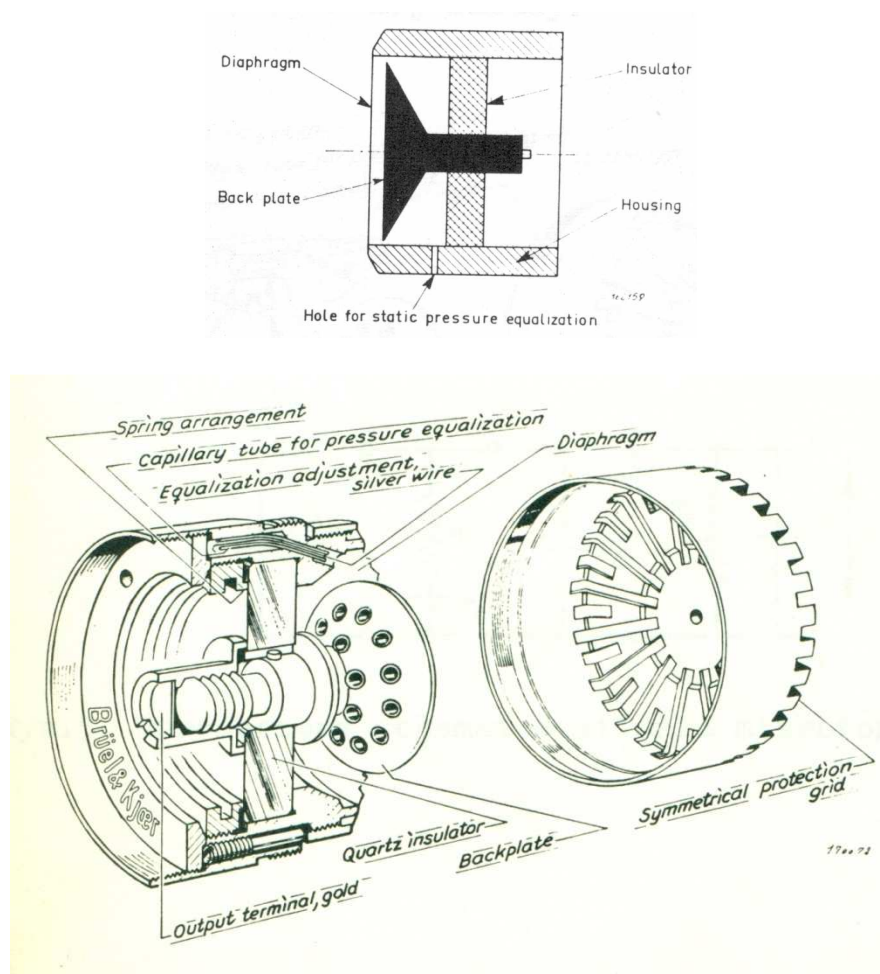
- [1] Dobrucki A., Elektroakustyka, Wykład
- [2] PN-EN 61672-1:2005. Elektroakustyka. Mierniki poziomu dźwięku. Część 1: Wymagania.
- [3] PN-EN 61672-2:2005. Elektroakustyka. Mierniki poziomu dźwięku. Część 2: Badania typu.
- [4] Żyszkowski Z., Miernictwo akustyczne. WNT, W-wa 1987, rozdz. 2.3.3.1, 2.3.3.3, 5.3.3.1
- [5] Microphones and microphone preamplifiers, Bruel & Kjaer 1976
- [6] Microphone Handbook, Vol.1: Theory, Technical Documentation Bruel & Kjaer
- [7] PN-EN 61260:2000. Elektroakustyka. Filtry pasmowe o szerokości oktawy i części oktawy.

Dodatek A

MIKROFONY POMIAROWE

1. Zasada działania mikrofonów pojemnościowych

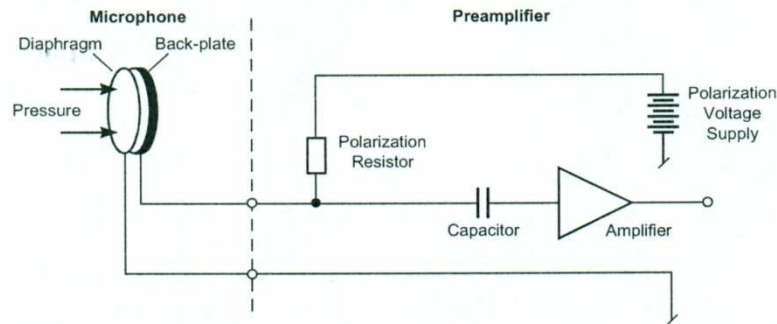
Mikrofon pojemnościowy składa się z cienkiej (ok. $5\ \mu\text{m}$), metalowej membrany rozpiętej w niewielkiej odległości (ok. $20\ \mu\text{m}$) od sztywnej tylnej płyty (elektrody stałej) (patrz rys.A.1).



Rys.A.1. Idea budowy mikrofonu pojemnościowego i rozwiązanie praktyczne.

Te dwa elementy (membrana i elektroda stała) są od siebie odizolowane elektrycznie tworząc okładki kondensatora. W objętości mikrofonu za membraną panuje praktycznie tylko ciśnienie atmosferyczne, gdyż powietrze tam występujące ma połączenie z atmosferą zewnętrzną jedynie poprzez otwór (rurkę) wyrównywania ciśnienia statycznego. Układ wyrównywania ciśnienia statycznego ma dla częstotliwości akustycznych bardzo dużą impedancję akustyczną. Wielkość wychylenia membrany zależy od różnicy ciśnień występujących po obu jej stronach. Ciśnienie zewnętrzne jest sumą ciśnienia atmosferycznego i ciśnienia akustycznego związanego z polem dźwiękowym. Ciśnienie wewnętrzne jest równe ciśnieniu atmosferycznemu. Zmiany ciśnienia spowodowane falami dźwiękowymi powodują przemieszczanie membrany i przez to zmieniają pojemność mikrofonu z częstotliwością

równą częstotliwości fal dźwiękowych. Zmiany pojemności są przetwarzane na zmiany napięcia. Najczęściej stosuje się prostą metodę konwersji wykorzystującą stały ładunek elektryczny, który jest gromadzony w tak utworzonym kondensatorze przez dostarczenie napięcia stałego poprzez przedwzmacniacz mikrofonowy z zewnętrznego źródła napięcia (mikrofony z polaryzacją zewnętrzną) lub trwałą polaryzacją elektryczną (mikrofony z polaryzacją wewnętrzną, tzw. mikrofony elektretowe). Zasada przetwarzania mikrofonów pojemnościowych z polaryzacją zewnętrzną jest zilustrowana na rys.A.2.



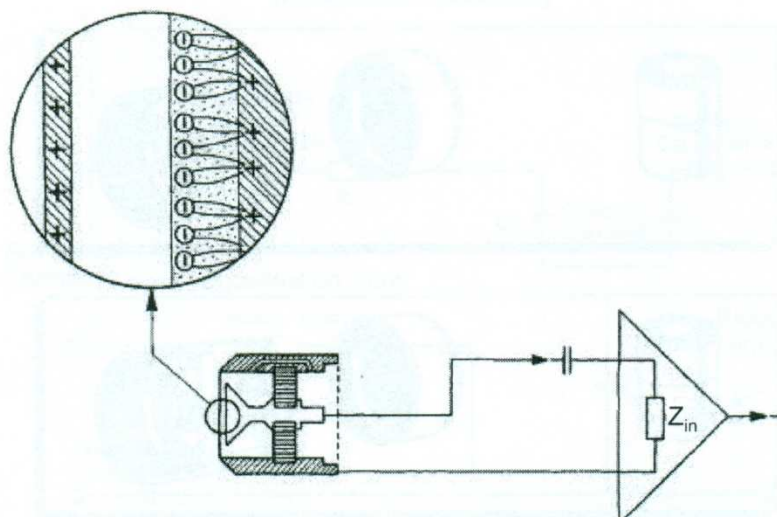
Rys.A.2. Zasada przetwarzania mikrofonów pojemnościowych z polaryzacją zewnętrzną.

Stała czasowa obwodu polaryzacji jest duża w porównaniu z okresem zmian ciśnienia akustycznego dla najniższych przetwarzanych częstotliwości i ładunek na okładkach kondensatora nie zmienia się w czasie (wartość rezystora polaryzującego to typowo 1 – 10GΩ). Napięcie zmienne wynikające ze zmian pojemności wskutek ruchów membrany jest odseparowane od napięcia polaryzacji za pomocą kondensatora na wejściu przedwzmacniacza (patrz rys.A.2). Chwilową wartość napięcia wyjściowego u opisuje zależność:

$$(1.1) \quad E \cdot C = Q_0 \rightarrow (E_0 + u) \frac{\varepsilon A}{D_0 + d} = E_0 \frac{\varepsilon A}{D_0} \rightarrow u = E_0 \frac{d}{D_0}$$

przy czym: A – powierzchnia płyty kondensatora; C – chwilowa wartość pojemności między płytami; D_0 – odległość spoczynkowa między płytami; d – przemieszczenie membrany w stosunku do położenia spoczynkowego; E – chwilowa wartość napięcia między płytami; E_0 – napięcie polaryzacji; u – zmiana napięcia wskutek ruchu membrany; Q_0 – stały ładunek kondensatora płytowego; ε – stała dielektryczna powietrza.

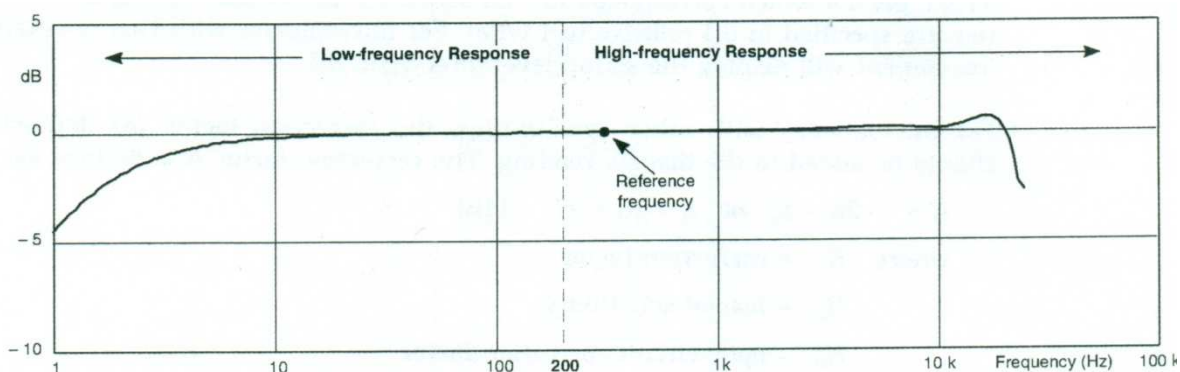
Mikrofony z polaryzacją wewnętrzną (elektretowe) wykorzystują specjalne materiały polimerowe, które są nanoszone na elektrodę stałą. „Zamrożony” elektryczny ładunek wytwarza pole elektryczne w przestrzeni powietrznej między elektrodami. Zasada przetwarzania mikrofonów pojemnościowych z polaryzacją wewnętrzną jest przedstawiona na rys.A.3.



Rys.A.3. Zasada przetwarzania mikrofonów pojemnościowych z polaryzacją wewnętrzną.

2. Charakterystyka częstotliwościowa

Na rys. A.4 przedstawiono typowy przebieg charakterystyki częstotliwościowej mikrofonu pomiarowego.



Rys.A.4. Typowy przebieg charakterystyki częstotliwościowej mikrofonu pomiarowego.

2.1. Przenoszenie niskich częstotliwości

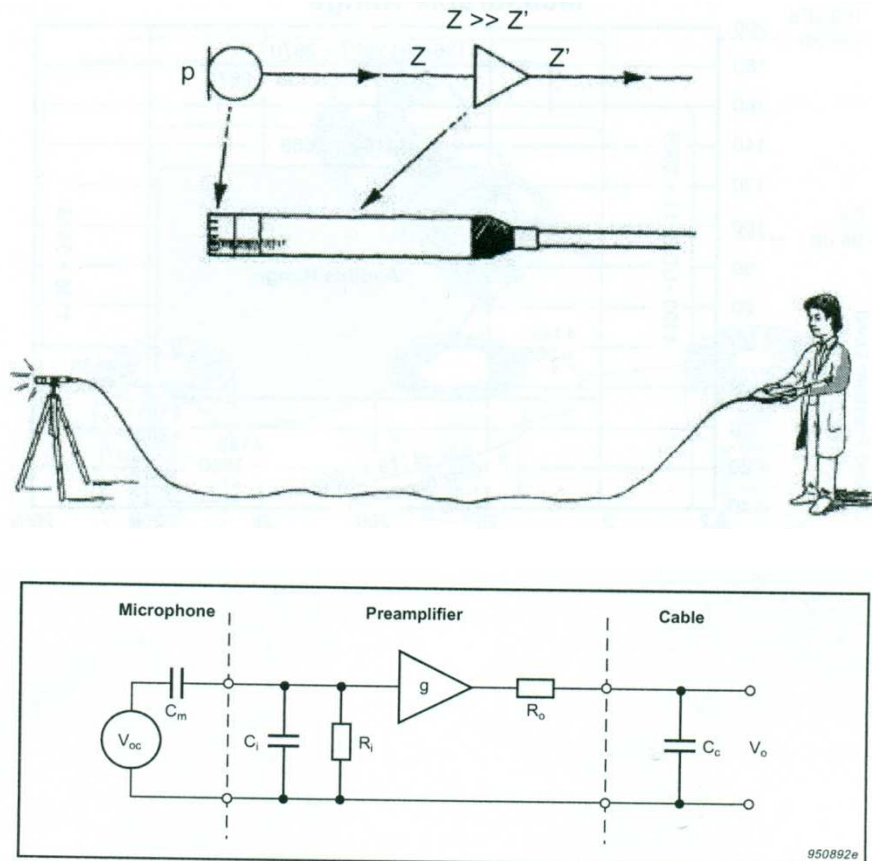
Ograniczenia przenoszenia niskich częstotliwości przez mikrofon pomiarowy wynikają z dwóch czynników:

- obciążenia elektrycznego, gdy impedancja mikrofonu przybiera wartość tego samego rzędu co impedancja wejściowa przedwzmacniacza;
- stałej czasowej układu wyrównywania ciśnienia.

Aby przezwyciężyć problem obciążenia elektrycznego mikrofony pomiarowe współpracują bezpośrednio z przedwzmacniaczem o bardzo dużej rezystancji wejściowej i niewielkiej rezystancji wyjściowej, umożliwiającą stosowanie długich kabli łączących przedwzmacniacz z miernikiem poziomu dźwięku bez wpływu na przenoszenie wysokich częstotliwości (patrz rys. A.5). Ze względu na to, że skuteczność mikrofonu jest odwrotnie proporcjonalna do całkowitej pojemności układu (równoległe połączenie pojemności

mikrofonu, pojemności wejściowej przedwzmacniacza i pojemności rozproszenia), dąży się do tego, by całkowita pojemność była niewiele wyższa od pojemności mikrofonu. Stąd bezpośredni montaż wkładki mikrofonowej na obudowie przedwzmacniacza.

Typowa wartość stałej czasu układu wyrównywania ciśnienia to 0,1 s. Pozwala to na stosunkowo szybkie wyrównywanie ciśnienia, eliminujące skutecznie zaburzenia wynikające ze zmiany ciśnienia statycznego, a jednocześnie zapewnia płaską charakterystykę mikrofonu aż do 5 Hz, co jest wystarczające dla większości zastosowań. Częstotliwość przy której charakterystyka spada o 3 dB w stosunku do poziomu dla częstotliwości odniesienia 250 Hz jest nazywana dolną częstotliwością graniczną mikrofonu i dla mikrofonów ogólnego przeznaczenia wynosi 1 – 2 Hz.



Rys.A.5. Współpraca mikrofonu pomiarowego i przedwzmacniacza oraz schemat zastępczy tego układu.

2.2. Przenoszenie wysokich częstotliwości

Pomiary poziomu dźwięku obejmują zarówno szeroki zakres zmian poziomu ciśnienia akustycznego, jaki i bardzo szeroki zakres częstotliwości. Pomiary są wykonywane w polach dźwiękowych różnego typu, przy czym oczekuje się, że umieszczenie mikrofonu w polu akustycznym nie zaburza tego pola.

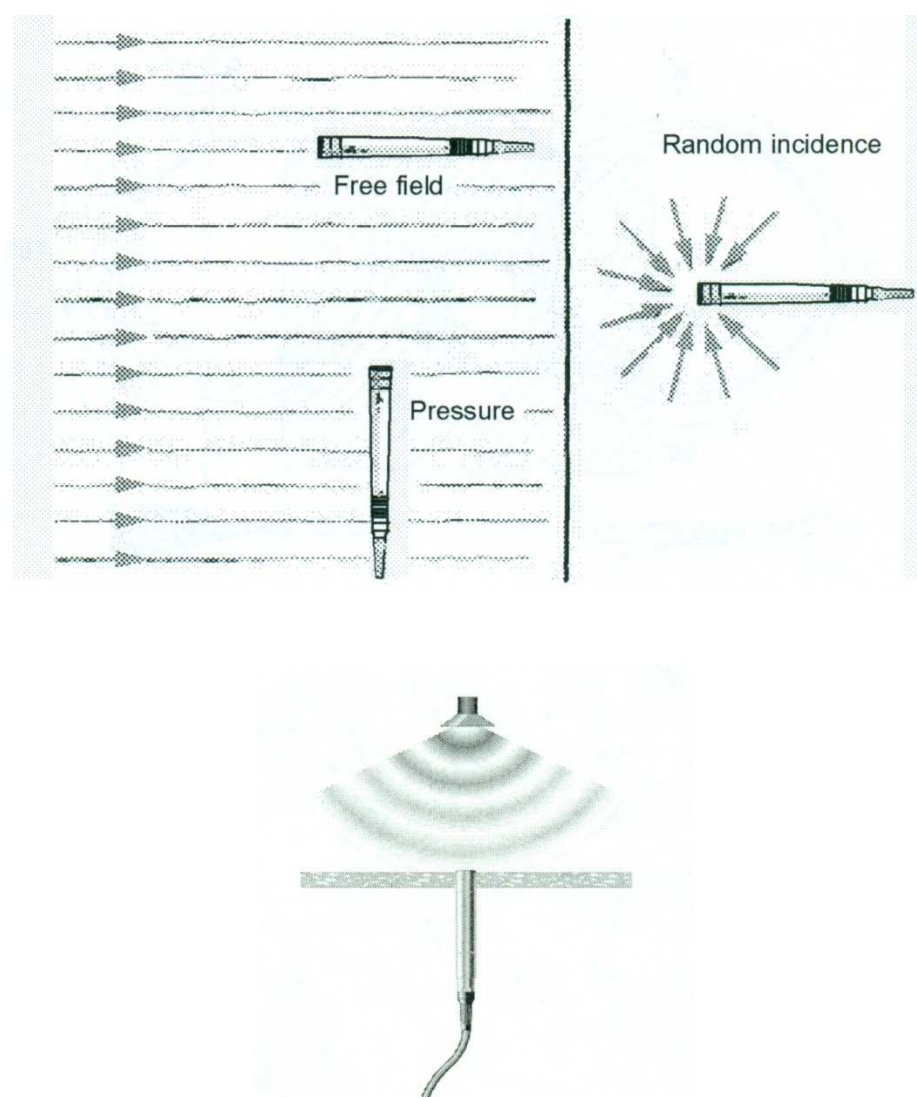
Nie jest możliwe zrealizowanie wszystkich w/w postulatów za pomocą jednego rozwiązania konstrukcyjnego mikrofonu. Stąd spotyka się różne rozwiązania mikrofonów umożliwiające różnorodne zastosowanie.

Ograniczenia przenoszenia wysokich częstotliwości przez mikrofon pomiarowy wynikają z trzech zasadniczych czynników:

- sztywności i masy membrany;
- zjawisk interferencji i dyfrakcji, gdy średnica mikrofonu staje się tego samego rzędu co długość fali dźwiękowej;
- mechanicznego tłumienia ruchu membrany.

Jednym z podstawowych parametrów konstrukcyjnych mikrofonu jest sztywność i masa membrany. Te dwa parametry determinują częstotliwość rezonansową membrany, a tym samym górną granicę zakresu przenoszonych częstotliwości. Ponadto od sztywności membrany zależy skuteczność mikrofonu, co czyni ten parametr bardzo istotnym.

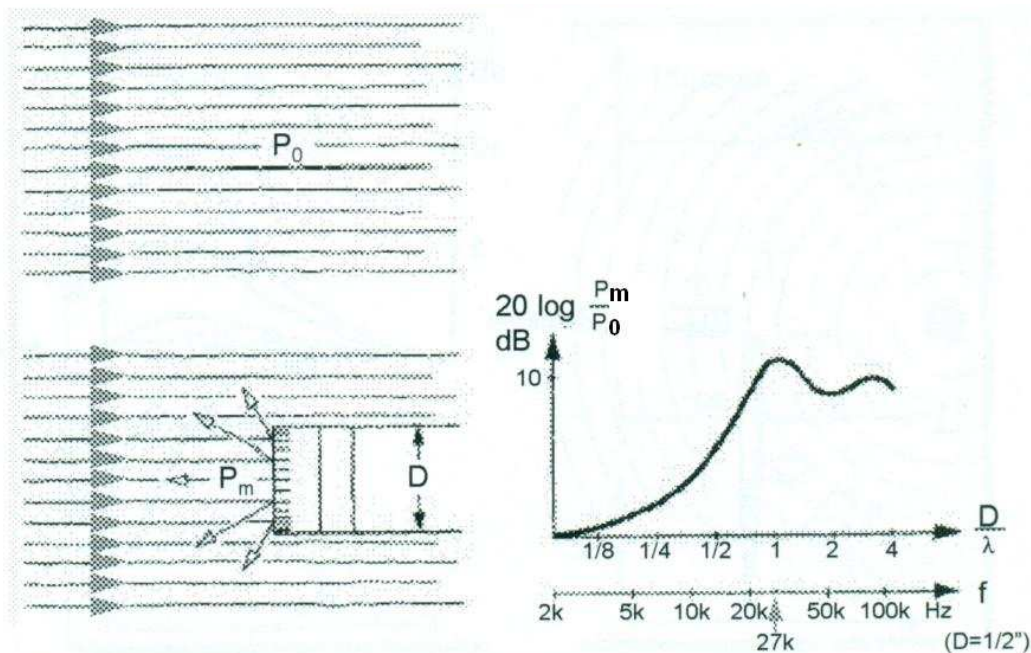
Mikrofony pomiarowe dzieli się na trzy grupy, w zależności od ich charakterystyki przenoszenia w polu akustycznym, a mianowicie na: mikrofony pola swobodnego, pola rozproszonego i mikrofony ciśnieniowe (patrz rys.A.6).



Rys.A.6. Typy pól akustycznych i konstrukcji mikrofonów.

Każdy mikrofon umieszczony w polu akustycznym zaburza to pole. Na rys. A.7 przedstawiono sytuację występującą w polu swobodnym, gdy fala akustyczna propaguje się tylko w jednym kierunku. Ciśnienie akustyczne w tym polu bez mikrofonu jest oznaczone jako p_0 . Po umieszczeniu mikrofonu, wartość mierzonego ciśnienia p_m wzrasta, wskutek

zjawisk interferencji i dyfrakcji. Ten przyrost mierzonego poziomu ciśnienia akustycznego zależy od częstotliwości i jest największy dla częstotliwości, dla której długość fali jest równa średnicy mikrofonu ($D/\lambda = 1$). Sytuacja przedstawiona na rys. A.7 dotyczy mikrofonu o średnicy $D = 1/2''$.



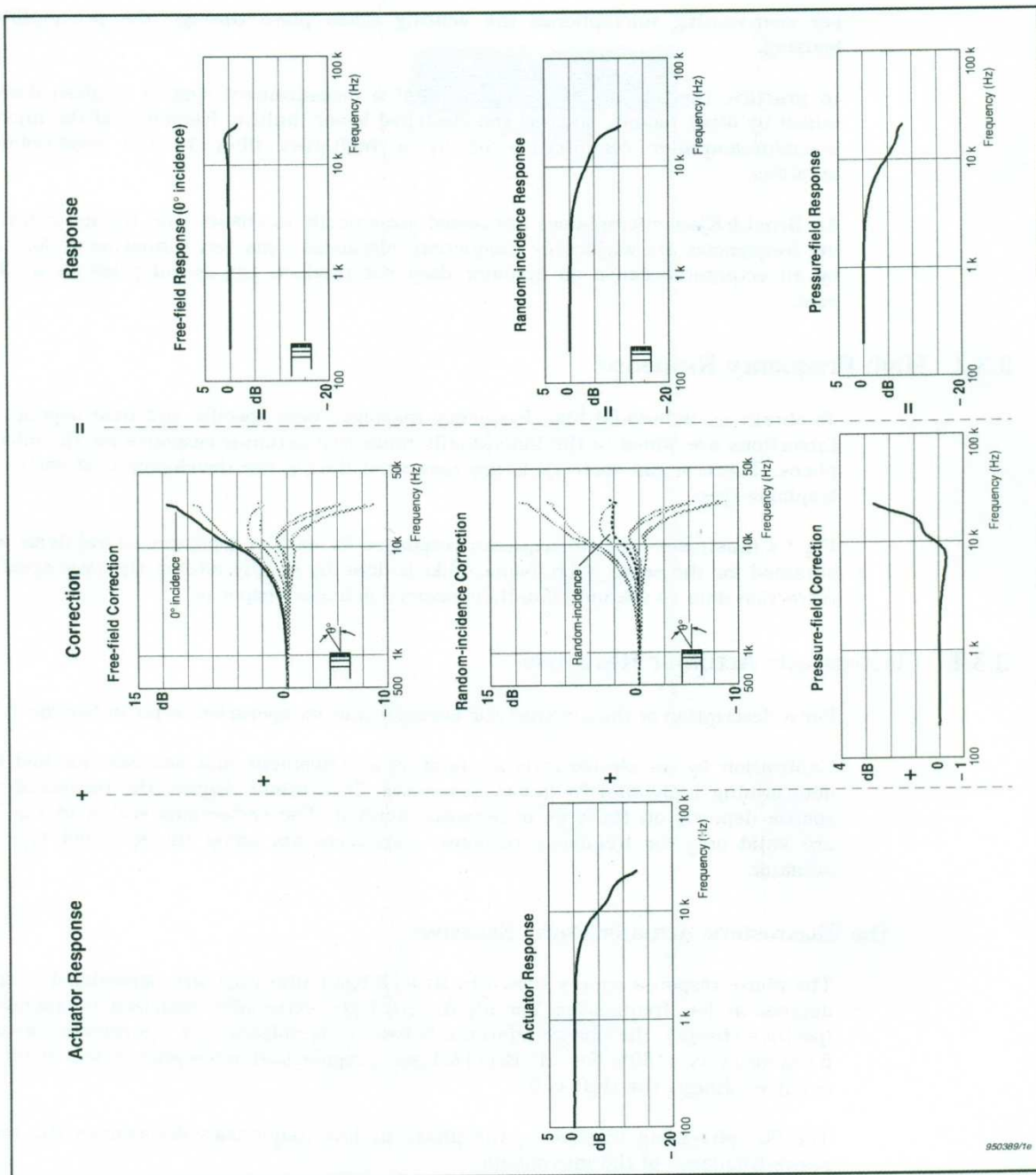
Rys.A.7. Zaburzenie pola swobodnego przez mikrofon pomiarowy i przyrost poziomu ciśnienia akustycznego na membranie mikrofonu o średnicy $1/2''$.

Największy przyrost poziomu ciśnienia występuje przy prostopadłym padaniu fali akustycznej na membranę (oznaczanym jako kąt 0^0). Dla innych kątów padania te przyrosty będą mniejsze i mogą przybierać ujemne wartości dla fal docierających pod kątem większym od 90^0 (efekt cienia akustycznego).

W przypadku pola rozproszonego (np. pomiary w obecności silnie odbijających powierzchni), gdy fala dociera do mikrofonu z wielu kierunków, przyrost poziomu ciśnienia jest obliczany jako suma wartości korekcyjnych dla różnych kątów padania z odpowiednimi wagami.

Mikrofony ciśnieniowe są przeznaczone do pomiarów ciśnienia akustycznego występującego na membranie mikrofonu przy danym umieszczeniu mikrofonu (np. pomiary w zamkniętych wnękach, na powierzchni ściany, czy też gruntu). Stąd mają tak ukształtowaną charakterystykę, by była maksymalnie płaska aż do najwyższych częstotliwości.

Producent mikrofonu, poprzez tłumienie ruchów membrany, tak kształtuje jego charakterystykę mierzoną za pomocą pobudnika elektrostatycznego (bez obecności pola akustycznego), by występowała kompensacja przyrostu poziomu ciśnienia akustycznego po umieszczeniu mikrofonu w danym polu akustycznym. Wówczas mikrofon przeznaczony do pomiarów w danym polu akustycznym będzie miał maksymalnie płaską charakterystykę aż do najwyższych częstotliwości. Jest to zilustrowane na rys.A.8.



Rys.A.8. Charakterystyka mikrofonu zdjęta za pomocą pobudnika elektrostatycznego; korekcje uwzględniające wpływ mikrofonu na mierzoną wartość poziomu ciśnienia akustycznego w różnych polach akustycznych; wypadkowe charakterystyki po uwzględnieniu korekcji.

Dodatek B

FILTRY KOREKCYJNE i POZIOM DŹWIĘKU

Aby mierniki poziomu dźwięku „potrafiły” naśladować właściwości ucha ludzkiego i mierzyć poziom ciśnienia akustycznego w taki sposób, aby odczyty miernika odpowiadały względnej głośności dźwięków wprowadzono poziomy dźwięku.

Poziom dźwięku jest to poziom wartości skutecznej (rms) ciśnienia akustycznego skorygowany wg krzywej korekcyjnej A lub C wg wzoru:

$$(1.1) \quad L_{A,C} = 10 \lg \left(\sum_{i=1}^N 10^{0.1(L_i + K_{A,C})} \right), \text{ dB},$$

gdzie: L_i - poziom wartości skutecznej ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości,
 $K_{A,C}$ - wartość poprawki wg krzywej korekcyjnej A lub C odpowiednio wg wzorów (1.2) i (1.3),
 N - liczba częstotliwości.

Mierniki poziomu dźwięku mają wbudowane filtry korekcyjne A i C, których charakterystyki częstotliwościowe są odwróconymi „do góry nogami” i wygładzonymi krzywymi izofonicznymi, które odpowiadają:

- krzywa korekcyjna A – 40 fonom,
- krzywa korekcyjna C – 100 fonom.

Postać analityczna krzywych korekcyjnych A i C, wg PN-EN 61672-1: 2005, jest dla dowolnej częstotliwości f w Hz następująca:

$$(1.2) \quad A(f) = 20 \lg \left[\frac{f_4^2 f^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^{1/2} (f^2 + f_3^2)^{1/2} (f^2 + f_4^2)} \right] - A_{1000}, \text{ dB}$$

$$(1.3) \quad C(f) = 20 \lg \left[\frac{f_4^2 f^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right] - C_{1000}, \text{ dB}$$

gdzie A_{1000} i C_{1000} są stałymi normującymi w dB, potrzebne do uzyskania wartości charakterystyk korekcyjnych równych 0 dB dla $f = 1$ kHz.

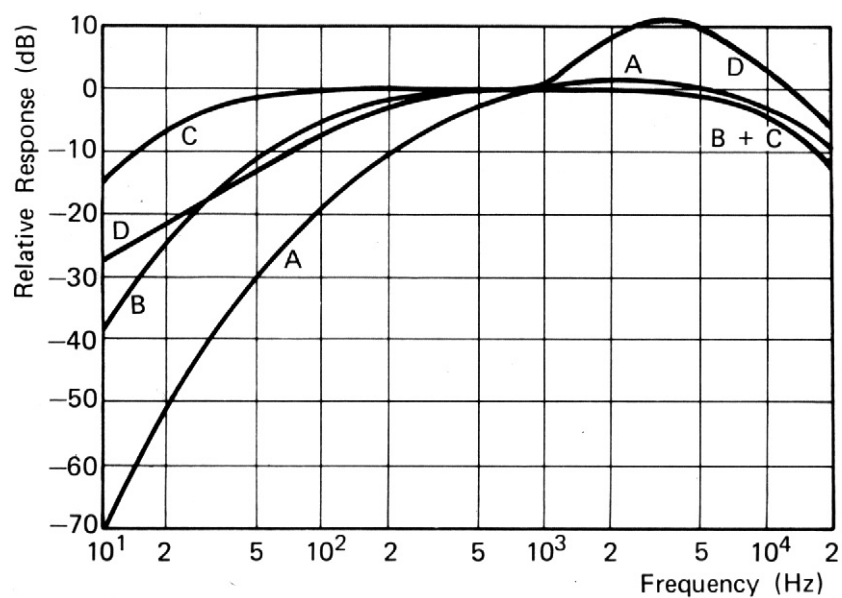
Przybliżone wartości częstotliwości od f_1 do f_4 we wzorach (1.2) i (1.3) wynoszą:

$$f_1 = 20.6 \text{ Hz}, f_2 = 107.7 \text{ Hz}, f_3 = 737.9 \text{ Hz}, f_4 = 12194 \text{ Hz}.$$

Stałe normujące są równe: $A_{1000} = -0.062$ dB, $C_{1000} = -2.0$ dB.

Tabela B.1. Wartości krzywej korekcyjnej A dla częstotliwości środkowych f_m pasm 1/3 oktawowych.

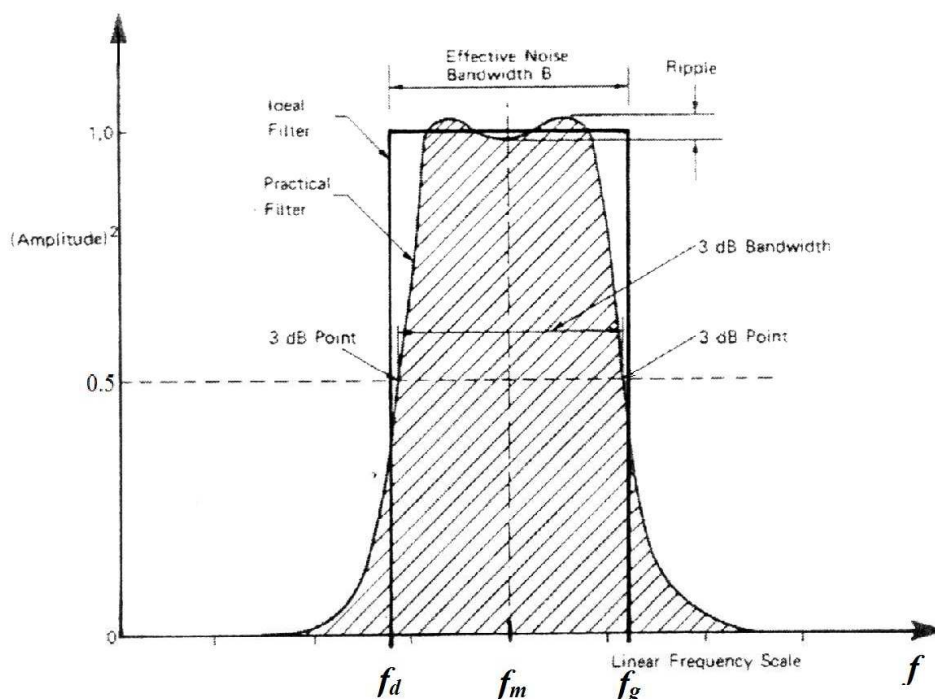
f_m (Hz)	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125
K_A (dB)	-56.7	-50.5	-44.7	-39.4	-34.6	-30.2	-26.2	-22.5	-19.1	-16.1
f_m (Hz)	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
K_A (dB)	-13.4	-10.9	-8.6	-6.6	-4.8	-3.2	-1.9	-0.8	0	0.6
f_m (Hz)	1600	2000	2500	3150	4000	5000	6300	8000	10000	12500
K_A (dB)	1.0	1.2	1.3	1.2	1.0	0.5	-0.1	-1.1	-2.5	-4.3



Rys.B.1. Przebiegi krzywych korekcyjnych A, B, C i D w funkcji częstotliwości f (zgodnie z najnowszą normą PN-EN 61672-1 w miernikach poziomu dźwięku nie stosuje się już krzywych korekcyjnych B i D).

Dodatek C

PARAMETRY CZĘSTOLIWOŚCIOWEGO FILTRU PASMOWEGO



Rys. C.1. Charakterystyka częstotliwościowa filtra pasmowego;
 f_d , f_g - dolna i górna częstotliwość graniczna, f_m - częstotliwość środkowa, B - szerokość pasma.

1.1. Częstotliwości graniczne

Częstotliwości graniczne filtra, dolna i górna, są to częstotliwości dla których tłumienie filtra wynosi 3 dB względem poziomu dla częstotliwości środkowej f_m (por. rys. C.1).

1.2. Częstotliwość środkowa

Częstotliwość środkowa filtrów o stałej bezwzględnej szerokości pasma jest średnią arytmetyczną dolnej i górnej częstotliwości pasma:

$$f_m = \frac{1}{2}(f_d + f_g),$$

natomiast filtrów o stałej względnej (procentowej) szerokości pasma jest średnią geometryczną:

$$f_m = \sqrt{f_d f_g}.$$

1.3. Szerokość pasma

Szerokość pasma częstotliwości filtra jest różnicą górnej i dolnej częstotliwości pasma:

$$B = f_g - f_d, \text{ Hz.}$$

Efektywna szerokość pasma jest to szerokość idealnego filtru, przez który jest transmitowana taka sama moc szumu białego jak przez filtr rzeczywisty i jest w przybliżeniu równa 3 dB szerokości pasma (por. rys. C.1).

Szerokość pasma może być również wyrażona w procentach częstotliwości środkowej (względna szerokość pasma)

$$B_m = \frac{f_g - f_d}{f_m} 100\%,$$

lub oktavach B_2 i dekadach B_{10}

$$B_2 = \log_2 \left(\frac{f_g}{f_d} \right), \text{ oktawy,}$$

$$B_{10} = \log_{10} \left(\frac{f_g}{f_d} \right), \text{ dekady.}$$

1.4. Filtry o stałej względnej szerokości pasma

Filtr pasmowy dla którego stosunek górnej i dolnej częstotliwości pasma jest stały, a częstotliwość środkowa filtru f_m jest ich średnią geometryczną:

$$(1.1) \quad \frac{f_g}{f_d} = a > 1, \quad f_m = \sqrt{f_d f_g},$$

jest filtrem o stałej względnej szerokości pasma.

Jeżeli $a = 2$ filtr jest 1/1 oktawowym, natomiast jeżeli $a = 10$ filtrem 1/1 dekadowym.
Słuszne są zatem następujące zależności:

$$(1.2) \quad \frac{f_m}{f_d} = \frac{f_g}{f_m} = \sqrt{a}, \quad B = f_g - f_d = f_m \left(\sqrt{a} - \frac{1}{\sqrt{a}} \right) = c f_m.$$

Szerokość pasma B filtru o stałej względnej szerokości pasma jest więc funkcją liniową częstotliwości f , przy czym stała proporcjonalności c jest równa:

$$(1.3) \quad c = \sqrt{a} - \frac{1}{\sqrt{a}} > 0.$$

Np. dla filtru 1/1 oktawowego $a = 2$, zatem szerokość pasma B jest równa:

$$B = f_g - f_d = f_m \left(\sqrt{2} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) = \frac{f_m}{\sqrt{2}} = 0.707 f_m.$$

Tabela C.1. Częstotliwości: środkowa f_m , dolna i górna filtrów 1/1oktawowych.

f_m , Hz	16	31.5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k
B , Hz	11.2- 22.4	22.4- 44.7	44.7- 89.1	89.1- 178	178- 355	355- 708	0.708- 141k	1.41- 2.82k	2.82- 5.62k	5.62- 11.2k	11.2- 22.4k

1.4.1. Filtry o szerokości części oktawy lub dekady

Filtry o szerokości części oktawy ($1/b$ oktawowe) lub części dekady ($1/b$ dekadowe) są filtrami pasmowymi, dla których iloraz górnej i dolnej częstotliwości granicznej wynosi:

$$\frac{f_g}{f_d} = a^{\frac{1}{b}},$$

gdzie $\frac{1}{b}$, $b \geq 1$ jest wskaźnikiem szerokości pasma, stosowanym do określenia części oktawy

($a = 2$) lub dekady ($a = 10$). Np. dla filtru 1/3 oktawowego (tercjowego): $a = 2$, $b = 3$, $\frac{f_g}{f_d} = 2^{\frac{1}{3}}$

, zatem na podstawie (5.2) szerokość pasma jest równa:

$$B = f_g - f_d = f_m \left(2^{\frac{1}{6}} - 2^{-\frac{1}{6}} \right) = 0.23 f_m.$$