

# Głośniki i pomiary ich parametrów

---

**mgr inż. Krzysztof Lusztak**  
*krzysiek@lusztak.pl*

**dr inż. Michał Bujacz**  
*bujaczm@p.lodz.pl*





# Czy autor wie o czym mówi?

**NS11 Application of Straight and Tapered Tunnels in Construction of Loudspeaker Set**

**Krzysztof LUSZTAK, Agnieszka WALIŁKO**  
luszti@gmail.com, agnieszka.waliko@gmail.com

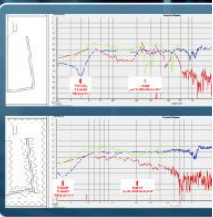
Technical University of Lodz  
Department of Microelectronics and Computer Science  
Wólczanska 221/223, B18, 90-924 Łódź, POLSKA

**INTRODUCTION**  
Most common types of enclosure in construction of loudspeaker sets are closed or vented (bass-reflex type). Speaker in closed enclosure loses its initial parameters - the Qts parameter (total quality factor) and the Fs (resonant frequency) increase. Vented enclosure (bass-reflex type) - using Helmholtz resonator has worst pulse characteristics and distorts sound perception.  
The solution of the problems mentioned earlier is an infinitely large acoustic baffle, which separates the energy of rear side of the membrane without changing the parameters of the speaker. It is obvious that this case is impossible to achieve in practice. Using the straight or tapered tunnel, which action may resemble the action of an infinitely large acoustic baffle may be solution of these problems.

**IDEAL WAY**  
Task: to absorb all the energy radiated by the membrane of the speaker.  
Absorbed energy of the rear of the impact negatively on the perception of sound.  
Speakers mounted on the conceptual does not change its parameters.  
Current damping materials allow realization above approximat.  
It is very good for midrange.

**REAL WAY**  
The wave radiated by the rear of the membrane is shifted in phase by the speaker to the end of the tunnel. Shift depends of the length of the tunnel and wavelength (and so frequency).

**CONCLUSIONS**  
Using tunnel in construction of the speakers of rear side of the membrane without change associated with a complicated design process set with parameters exceeding typically used



## Analysis of damping materials in a transmission line loudspeaker system

Krzysztof LUSZTAK B.Sc.  
Lodz University of Technology  
Lodz, Poland  
krzysiek@luztak.pl

Michał BUJACZ Ph.D.  
Lodz University of Technology  
Lodz, Poland  
bujaczm@p.lodz.pl

**Abstract**— The presented paper contains an analysis of the influence of various types of damping material in a transmission line loudspeaker enclosure on the acoustic emission spectrum. Damping of the tunnel is crucial in the design of this type of enclosures. Six types of materials traditionally used in home speaker construction were studied.

**Keywords**— loudspeaker, vented enclosure, bass-reflex, sealed enclosure, transmission line, waveguide, damping materials, felt, wool, foam.

### I. INTRODUCTION

The most common loudspeaker enclosure types are either closed [1] or vented (bass-reflex type) [2,3]. These two types of enclosures can be relatively easily and accurately modeled, allowing mathematical simulations to be used in efficient design. Moreover, because of the small number of variables, the enclosures can also be quickly tested through trial and error with very good effect. For the sealed enclosure only the volume of the loudspeaker and the amount and type of damping materials can be changed, while the bass reflex enclosure (utilizing the Helmholtz resonator) introduces two more variables - the length and the diameter of the resonator (which are in fact correlated [3]). Thanks to these features the closed and bass-reflex enclosures have dominated the market

There is a loudspeaker enclosure type that avoids the aforementioned problems - the transmission line enclosure [4,5]. This type of enclosure contains a tunnel behind the loudspeaker, with specific parameters serving as a waveguide. The resonance phenomena doesn't appear in transmission line enclosure, so there is no audible lag in the music material [6]. The response of the speaker has a natural decrease of 12dB/octave in the direction of the low frequencies and this decline begins later than in closed speaker casings. The waveguide is designed to use the rear surface of the speaker membrane, reverse it in phase and use as a second source of sound. Unfortunately, this type of enclosure is difficult to design. The number of variables is very large: the length of the tunnel, the location of the speaker relative to the entry of the tunnel, the tunnel's capacity, the cross sectional area of the beginning and end of the tunnel, and their relationship to each other, the type and location of the damping material, the number of turns in the tunnel. Most of these variables can be simulated by using appropriate modeling software. Unfortunately it is impossible to properly simulate the placement and the type of damping material, which is crucial in this type of construction. To understand why the damping is crucial it is necessary to first have a good grasp of the principle of operation of a transmission line enclosure.





# O czym pogawędzimy...

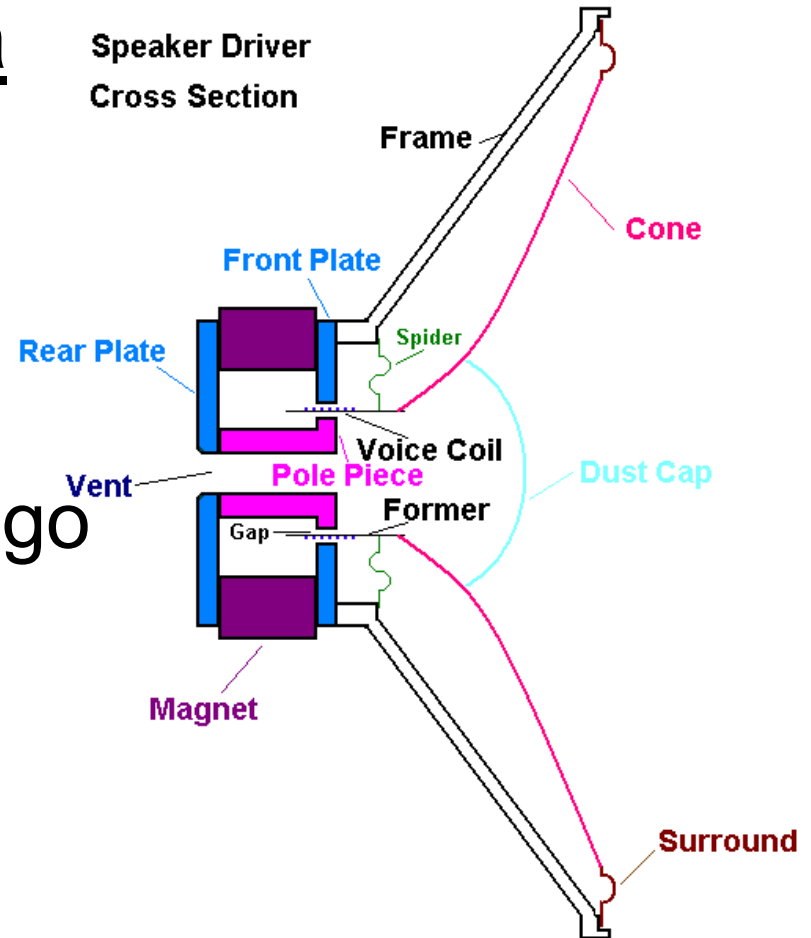
- Co to jest przetwornik elektroakustyczny,
- Budowa głośnika,
- Parametry głośnika,
- Systemy pomiarowe,
- Pomiar parametry głośników na przykładzie programu Speaker Workshop

# Przetwornik elektroakustyczny



Składa się z przetwornika elektromechanicznego

zamieniającego sygnał elektryczny na sygnał mechaniczny, oraz z przetwornika zamieniającego sygnał mechaniczny na sygnał akustyczny.



# Przetwornik

## elektroakustyczny - typy



- **magnetoelektryczne** – membrana połączona z cewką rusza się w stałym polu
- **elektromagnetyczne** – membrana połączona z rdzeniem ferromagnetycznym rusza się w zmiennym polu
- **elektrodynamiczne** – dwie cewki
- piezomagnetyczne (magnetostrykcyjne)
- piezoelektryczne
- elektrostatyczne
- łuk plazmowy



# Głośnik - klasyfikacje

Podział ze względu na:

- Pasmo :  
wysoko/średnio/nisko, szeroko
- typ przetwornika,
- zastosowania,
- typ membrany (kopułka, tuba)

Co oznaczają skróty

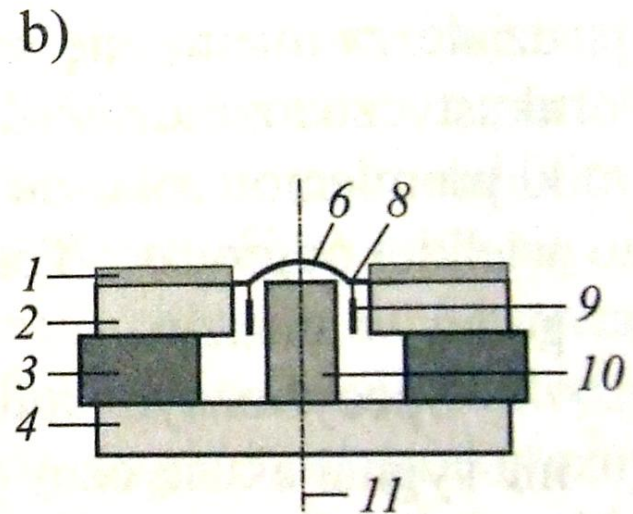
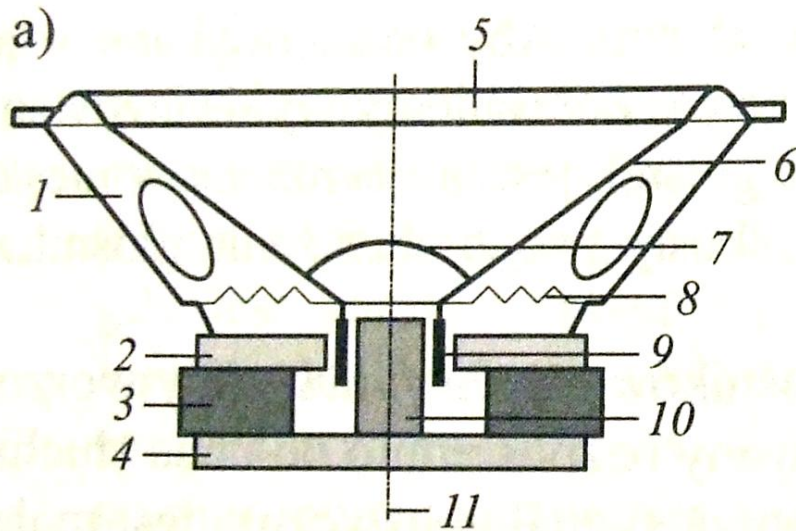
GDWK, GDWT,

GDM, GDN, GDS?





# Budowa głośnika

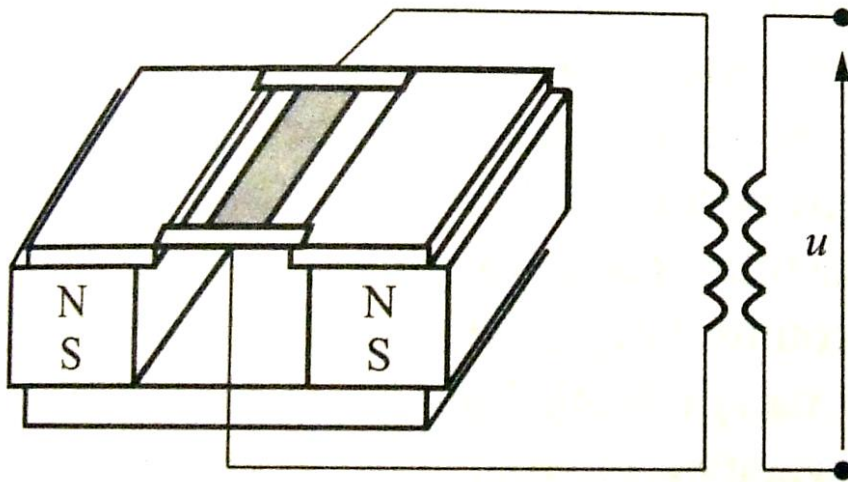


Konstrukcja głośnika magnetoelektrycznego cewkowego: a) stożkowa; b) kopułkowa

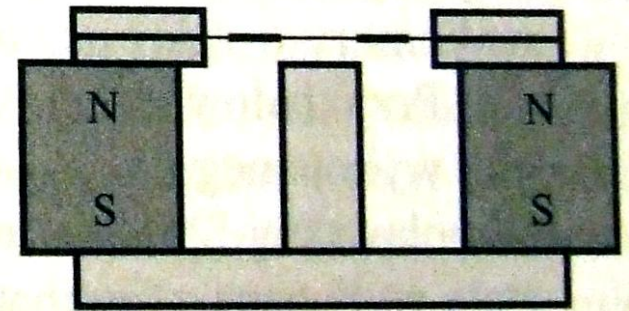
1 – rama mocująca (kosz); 2 – nabiegunnik górny; 3 – magnes (pierścieniowy); 4 – nabiegunnik dolny;  
5 – zawieszenie membrany; 6 – membrana; 7 – krążek ochronny; 8 – zawieszenie cewki (resor); 9 – cewka;  
10 – nabiegunnik wewnętrzny; 11 – oś głośnika



# Budowa głośnika, cd.



Rys. 6.37.  
Głośnik wstęgowy



Rys. 6.38.  
Głośnik izodynamiczny



# Parametry TS (T-S) głośnika ...a co to?



Parametry Thiele-Small'a to zestaw parametrów głośników dynamicznych. Parametry te pozwalają na matematyczne obliczenie konstrukcji (objętość, strojenie) obudowy dla głośników niskotonowych i średniotonowych, a także na obliczenie charakterystyki przenoszenia w zakresie niskich tonów.



1961 - *Loudspeakers in Vented Boxes* - A.N. Thiele  
1972-73 – seria artykułów na łamach JAES – R. Small

# Parametry TS (T-S) głośnika ...to co w końcu wymyślili?



Najważniejsze parametry:

$f_s$  – częstotliwość rezonansowa,

$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}}$$

gdzie:

$C_{ms}$  - podatność zawiesznień membrany  
(głośnika niezabudowanego) [m/N],

$M_{ms}$  - masa układu drgającego [kg].

# Parametry TS (T-S) głośnika ...to co w końcu wymyślili?



Najważniejsze parametry:

$Q_{ts}$  – dobroć całkowita

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

gdzie:

$Q_{ms}$  - dobroć mechaniczna,

$Q_{es}$  - dobroć elektryczna.

$$Q_{ms} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot C_{ms} \cdot R_{ms}}$$

gdzie:

$f_s$  - częstotliwość rezonansowa (głośnika niezabudowanego) [Hz],

$C_{ms}$  - podatność zawiesznień membrany (głośnika niezabudowanego) [m/N],

$R_{ms}$  - rezystancja mechaniczna [kg/s].

$$Q_{es} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot M_{ms} \cdot R_e}{(B \cdot l)^2}$$

gdzie:

$f_s$  - częstotliwość rezonansowa (głośnika niezabudowanego) [Hz],

$M_{ms}$  - masa układu drgającego [kg],

$R_e$  - rezystancja cewki drgającej [ $\Omega$ ],

$B \cdot l$  - współczynnik siły (indukcja w szczeliny razy długość uzwojenia pozostającego w szczeliny) [T x m]

# Parametry TS (T-S) głośnika ...to co w końcu wymyślili?



Najważniejsze parametry:

$V_{as}$  – objętość ekwiwalentna

$$V_{as} = 0,0014 \cdot C_{ms} \cdot S_d^2$$

gdzie:

$C_{ms}$  - podatność zawiesznień membrany (głośnika niezabudowanego) [m/N],

$S_d$  - efektywna powierzchnia membrany [m<sup>2</sup>],

0,0014 - stała wyliczona z uwzględnieniem prędkości dźwięku w powietrzu i gęstości powietrza.

DriverEditor

Driver name:

Driver data:

Qts:  Qms:

Vas:  Qes:

Fs:  Hz SPL:  dB

Re:  ohm Pe:  W

Le:  mH BL:

Xmax:  m dia:  mm

Z:  ohm Sd:  cm<sup>2</sup>

Additional information:

Entered by:  Date:

Comment:

Edit Delete OK Cancel

# Parametry TS (T-S) głośnika ...to co w końcu wymyślili?



Inne parametry:

**B** - gęstość strumienia magnetycznego w szczelinie magnetycznej głośnika

**Bl** - siła układu magnetycznego, czyli iloczyn gęstości strumienia magnetycznego oraz długości uzwojenia cewki w szczelinie

**l** - długość uzwojenia cewki w szczelinie magnetycznej

**C<sub>as</sub>** - akustyczna podatność zawieszenia głośnika

# Parametry TS (T-S) głośnika ...to co w końcu wymyślili?



Inne parametry:

$C_{ms}$  - mechaniczna podatność zawieszenia głośnika

$L_{vc}$  - indukcyjność cewki głośnika

$M_{md}$  - mechaniczna masa układu drgającego membrany (oprócz membrany także karkas, cewka i część masy zawieszenia) bez obciążenia powietrznego

$M_{ms}$  - mechaniczna masa układu drgającego membrany wraz z obciążeniem powietrznym

# Parametry TS (T-S) głośnika ...to co w końcu wymyślili?



Inne parametry:

$R_{as}$  - akustyczna rezystancja wynikająca ze stratności zawieszenia głośnika

$R_e$  - rezystancja cewki dla prądu stałego

$R_{es}$  - elektryczna rezystancja wynikająca ze stratności zawieszenia głośnika

$R_{ms}$  - mechaniczna rezystancja wynikająca ze stratności zawieszenia głośnika

$S_d$  - efektywna powierzchnia membrany, w praktyce obejmująca oprócz membrany także część zawieszenia



# A jakieś inne parametry?

Parametry służące analizie zachowania głośnika przy sygnałach o dużej mocy:

$X_{\max}$  - maksymalne liniowe wychylenie membrany w jedną stronę

$X_{\lim}$  (czasem podawane jako  $X_{\text{mech}}$  lub  $X_{\text{dam}}$ ) - wychylenie graniczne membrany w jedną stronę (z punktu widzenia mechanicznego)

$P_e$  - moc znamionowa głośnika





# A jakieś inne parametry?

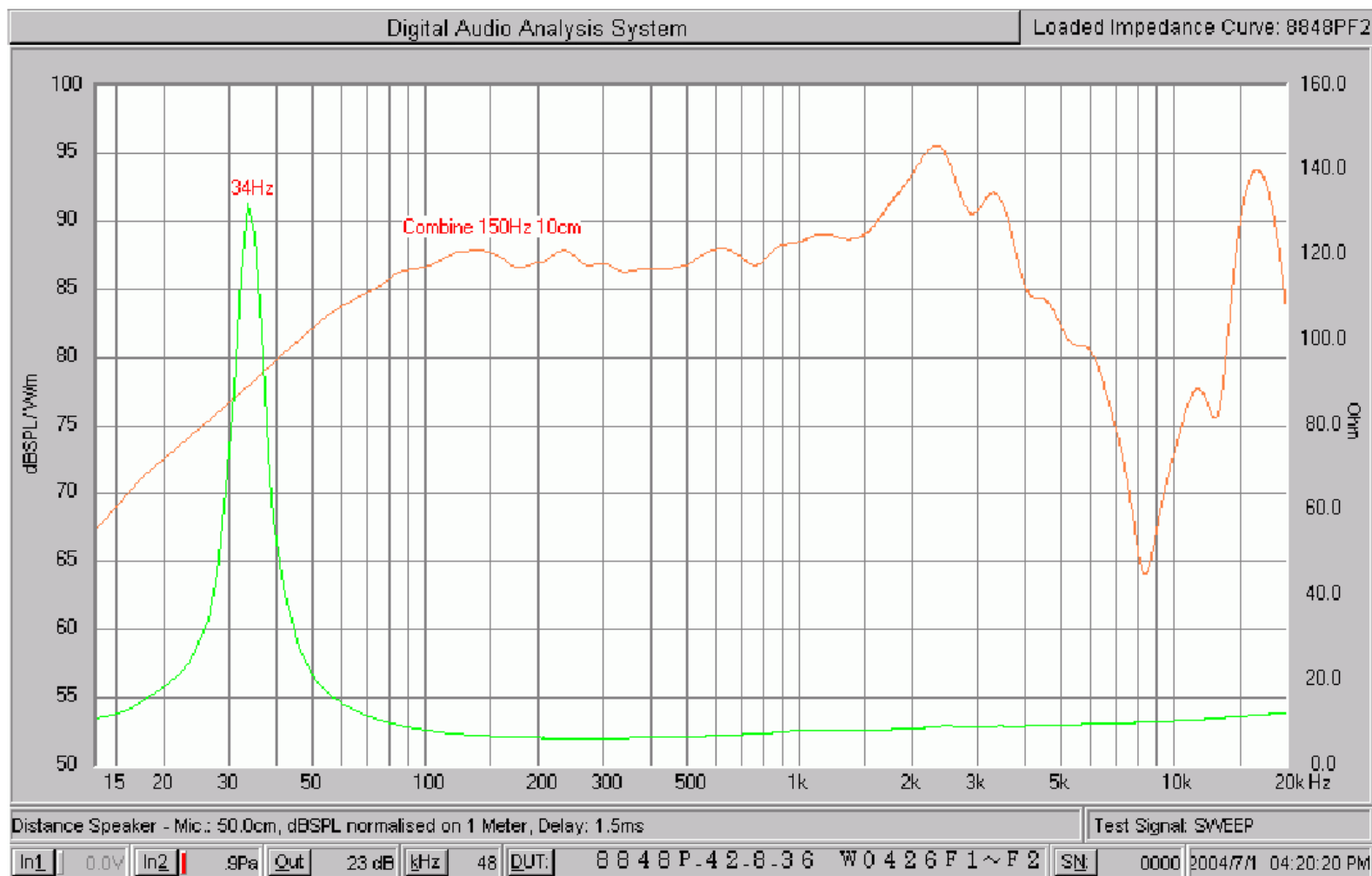
Dodatkowe parametry (przydatne przy konstruowaniu zestawów głośnikowych):

**Z** - impedancja znamionowa głośnika

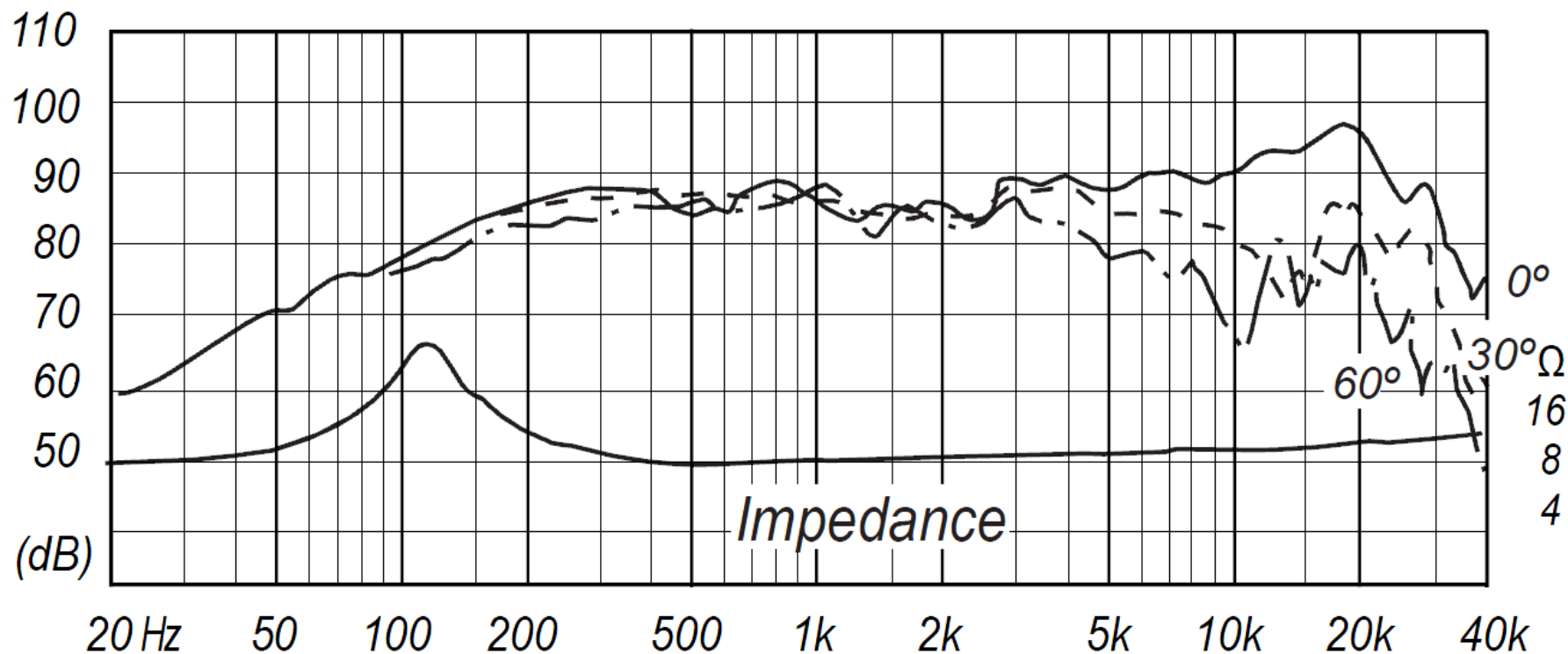
**SPL** - efektywność głośnika



# A czy są jakieś wykresy?

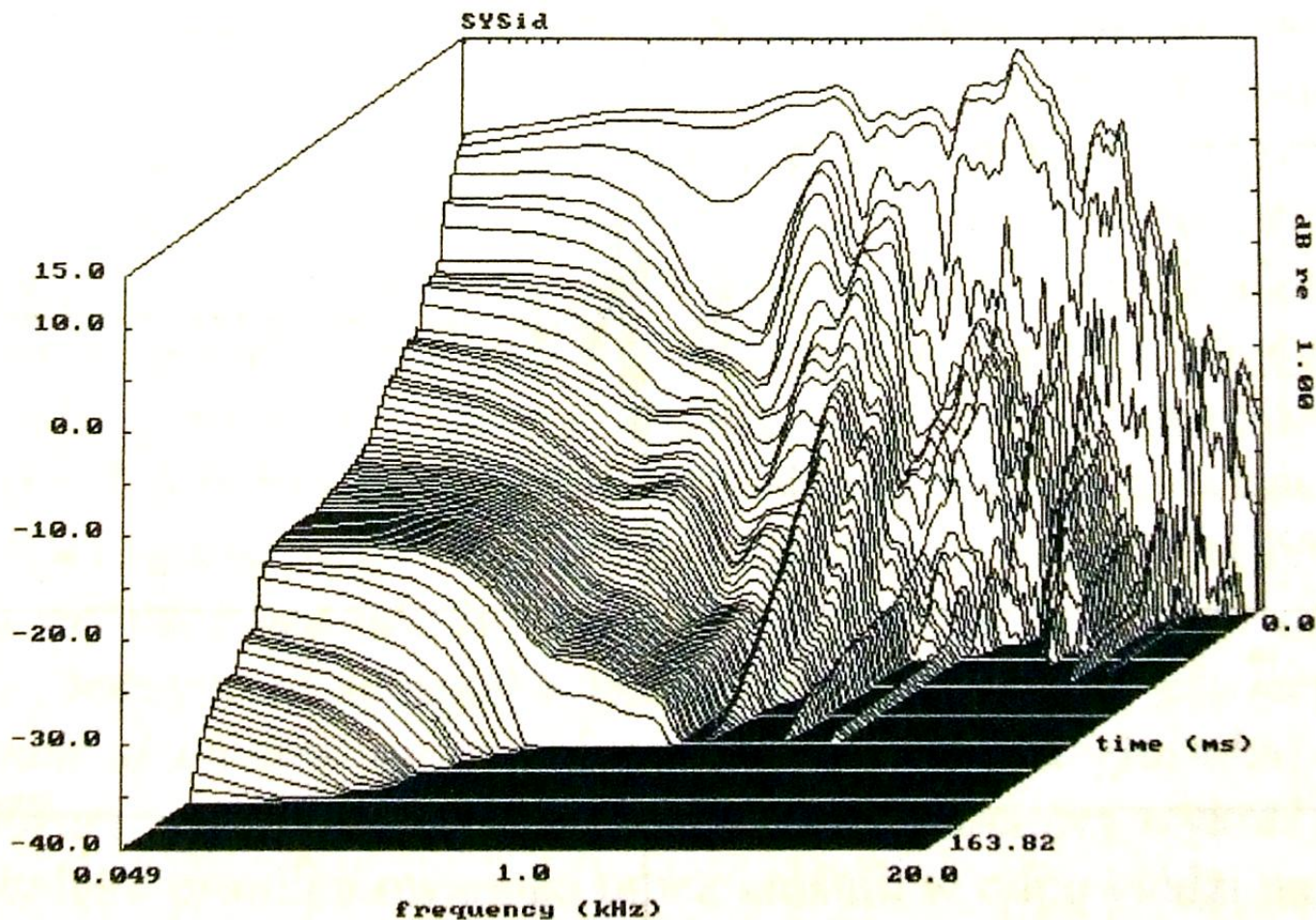


# A czy są jakieś wykresy?





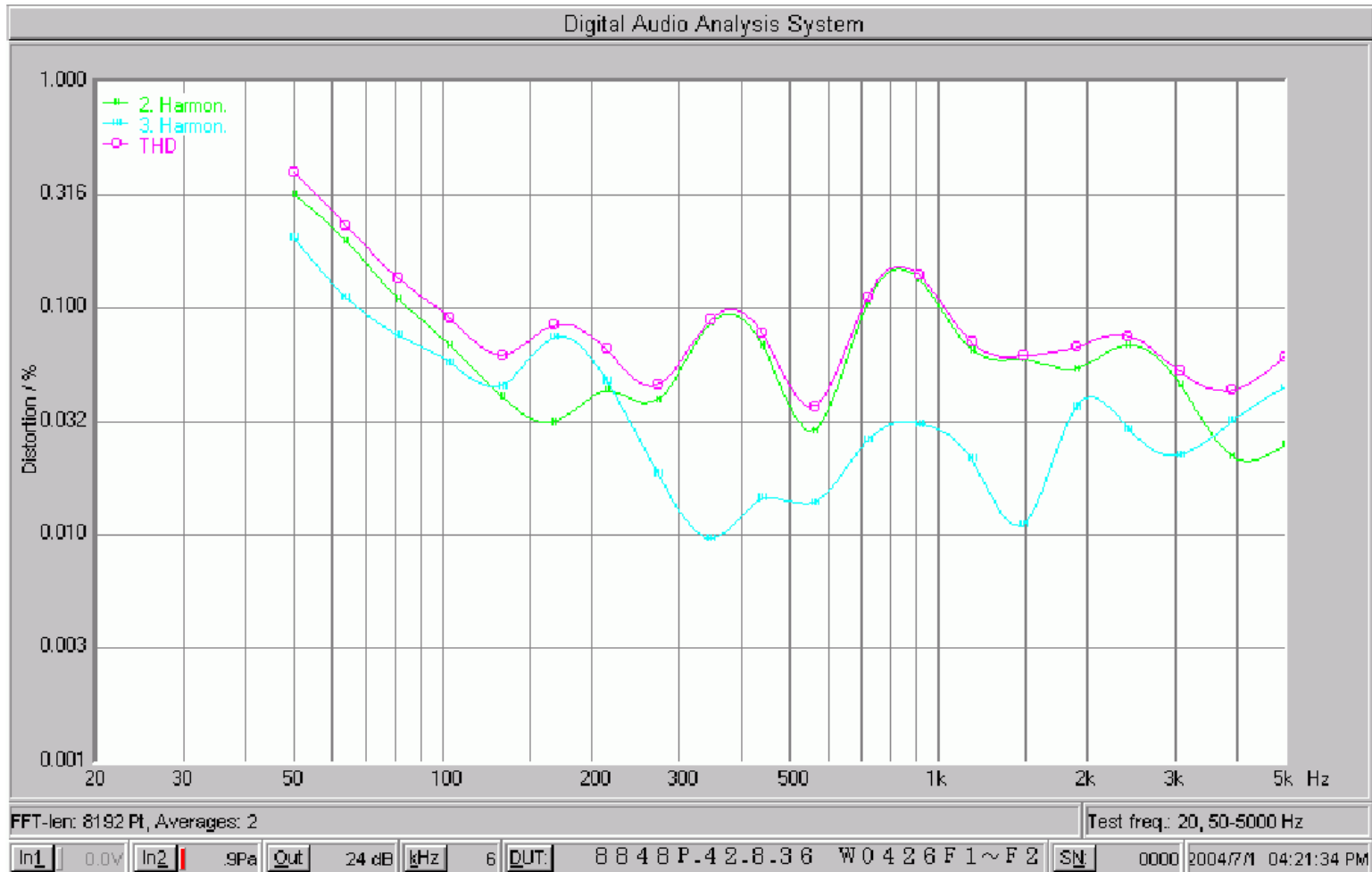
# A czy są jakieś wykresy?



Wykres widma skumulowanego („wodospad”) głośnika GDN 20/20 w obudowie zamkniętej



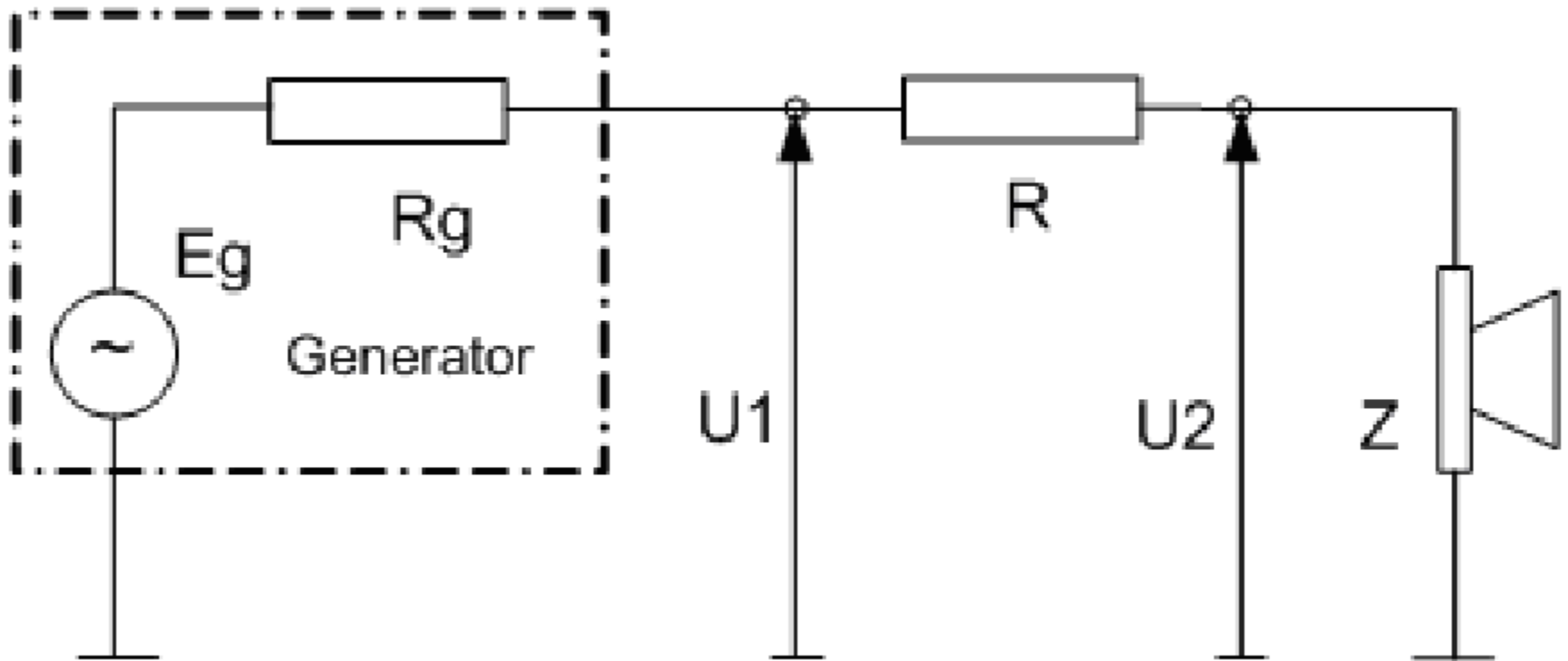
# A czy są jakieś wykresy?



# A co jeśli nie mamy takich danych?

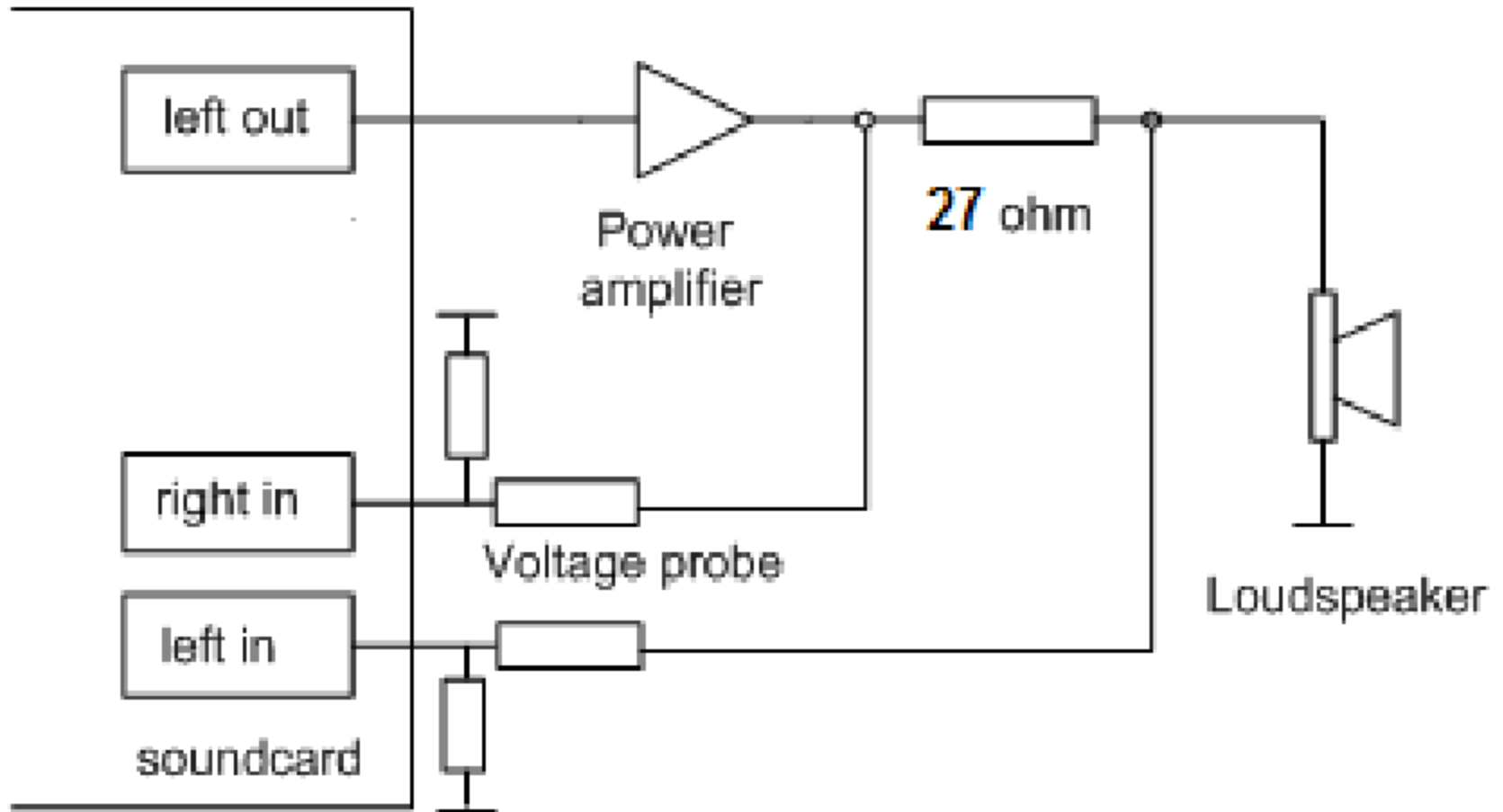


# Pomiar modu impedancji w funkcji częstotliwości



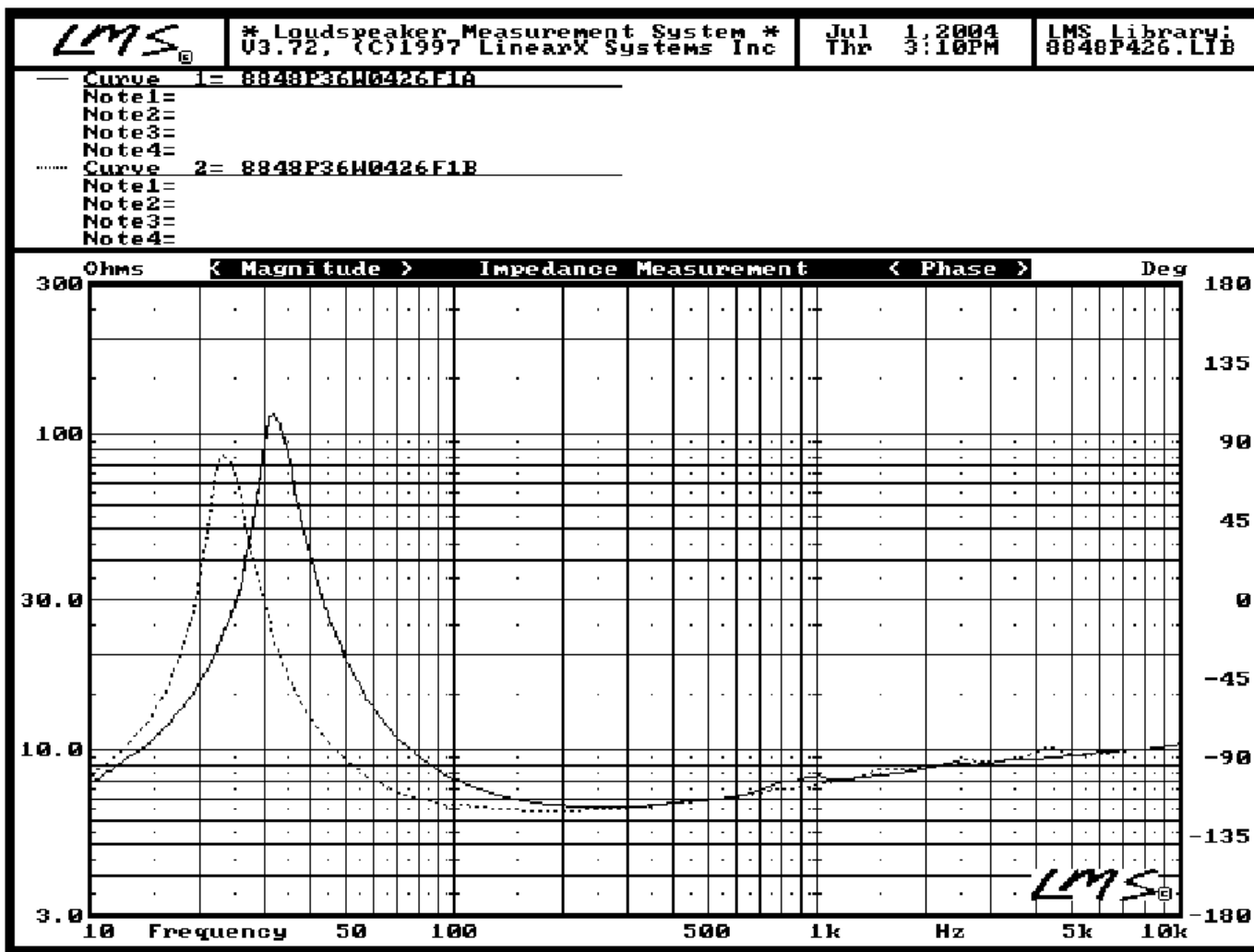
$$Z(f) = \frac{U_2(f)}{U_2(f) - U_1(f)} R$$

# Pomiar modułu impedancji w funkcji częstotliwości

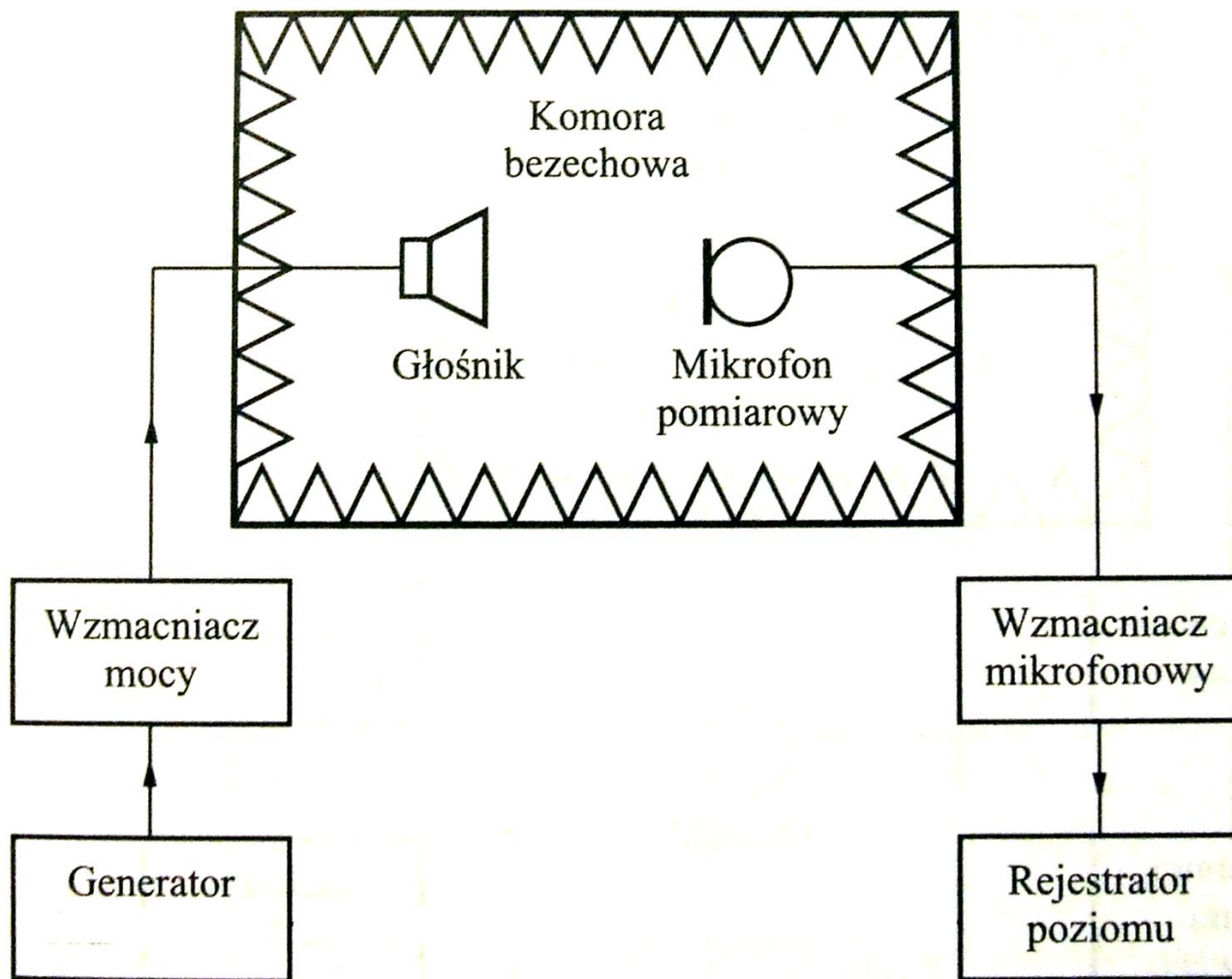




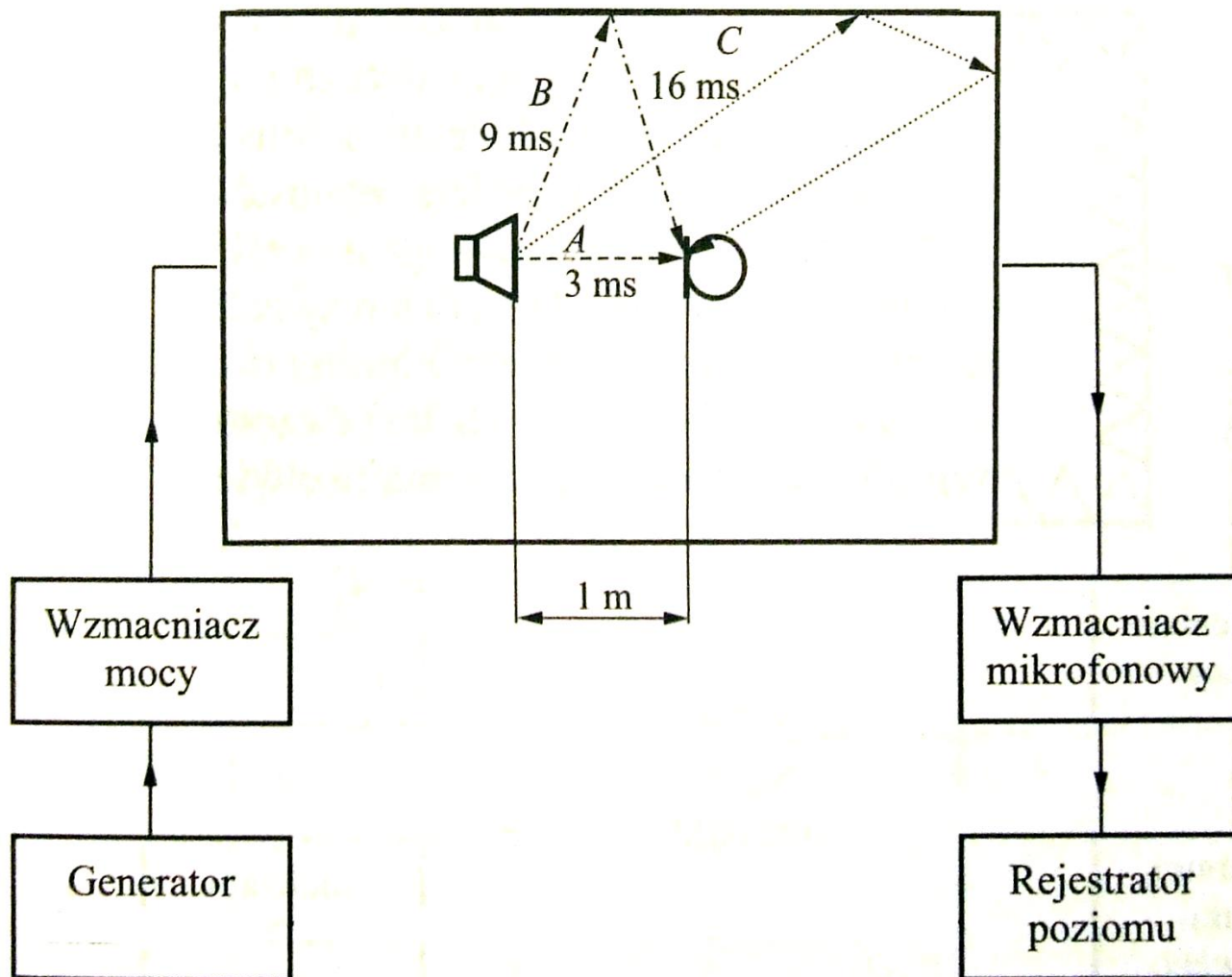
# Moduł impedancji a parametry TS



# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-pomieszczenie



# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-pomieszczenie



# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-typy sygnałów



Ciągłe:

- Przeszrajany sinus,
- Szum biały - tercjowany,

Impulsowe

- MLS (maximum length sequence),
- CHIRP (ćwierkanie).



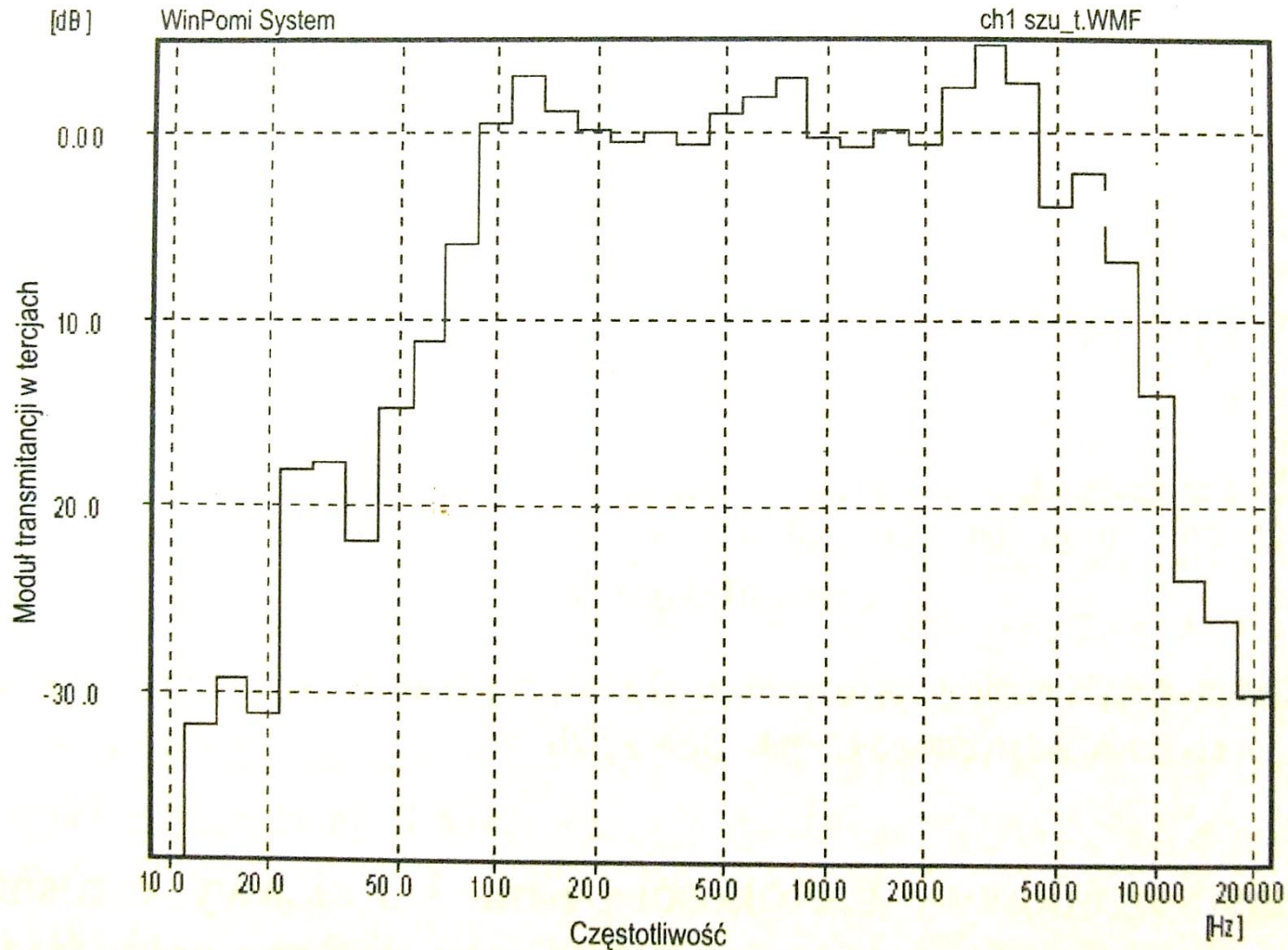
# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-szum biały

Szum, którego intensywność jest statystycznie równomierna w całym paśmie.

Szum biały ma stałą moc przypadającą na jednostkę częstotliwości (na Hz), tak więc moc jest jednakowa dla dowolnej częstotliwości.

Wykres mocy szumu białego w zależności od częstotliwości jest płaski jeśli pomiaru dokonuje się filtrem o stałej bezwzględnej szerokości pasma. Przykładowo moc w paśmie 50-55 Hz jest taka sama jak moc w paśmie 900-905 Hz.

# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-szum biały



# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-MLS



Sygnał MLS składa się z sekwencji kolejnych próbek przełączanych pomiędzy dwoma wartościami w sposób prawie losowy. Z tego powodu akustyczny sygnał MLS brzmi w odbiorze subiektywnym jak szum.

# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-MLS

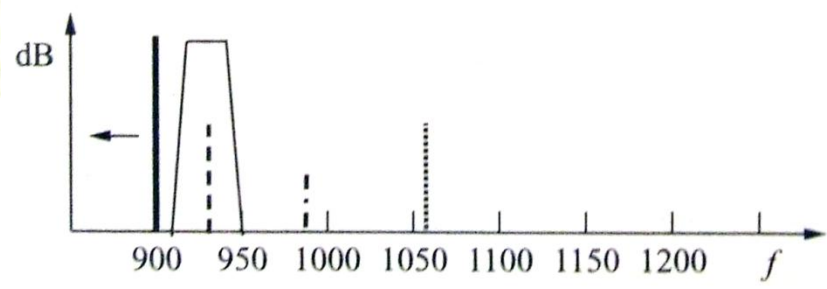
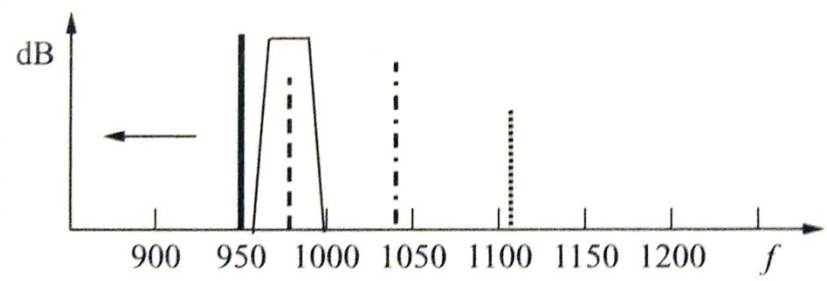
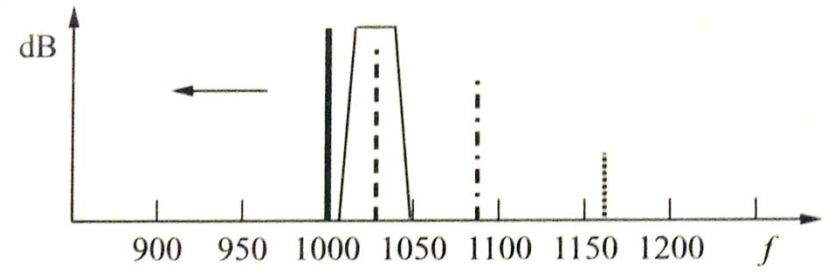
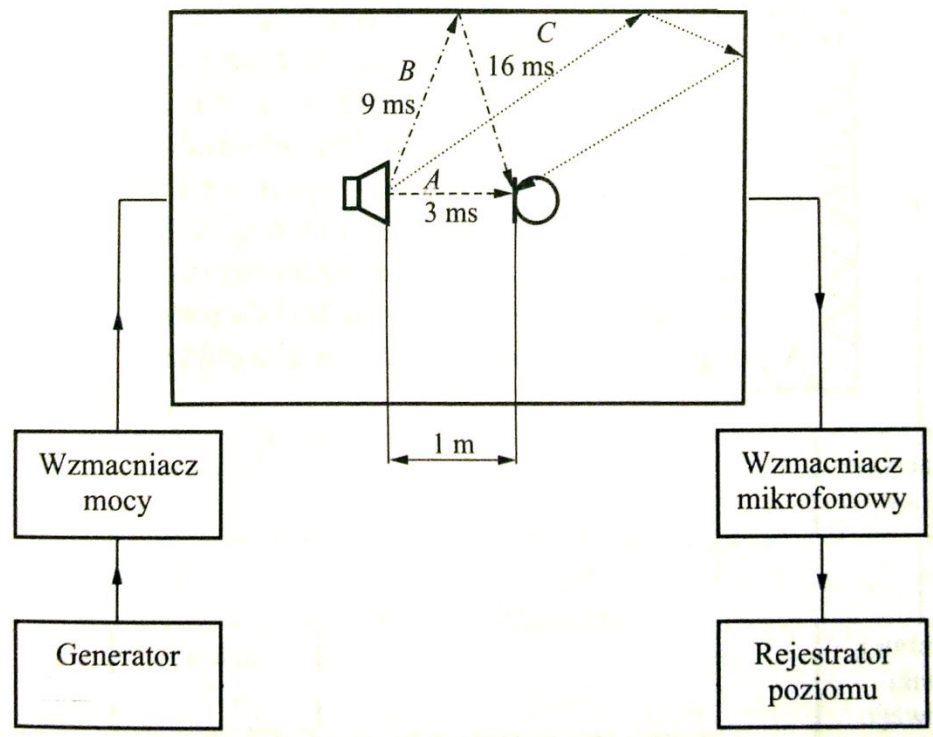


Poprzez odpowiednie obliczenia matematyczne (funkcja korelacji) wykorzystujące jako dane wejściowe pierwotny sygnał MLS oraz odpowiedź mierzonego systemu na tenże sygnał, można uzyskać odpowiedź impulsową mierzonego systemu, a w konsekwencji także odpowiedź częstotliwościową. Bardzo istotną zaletą pomiarów wykonywanych przy pomocy sygnału MLS jest wysoka odporność na szумы.





# Pomiar odpowiedzi częstotliwościowej-CHIRP



Sygnal sinusoidalny o liniowo zmiennej częstotliwości



# Pojęcia w Speaker Workshop

## Nearfield – pomiar bliskiego pola





# Pojęcia w Speaker Workshop

Farfield – pomiar dalekiego pola (zwykle 1 metr)



# Pomiar parametrów TS głośnika. Obudowy głośnikowe.

---

**inż. Krzysztof Lusztak**  
*krzysiek@lusztak.pl*

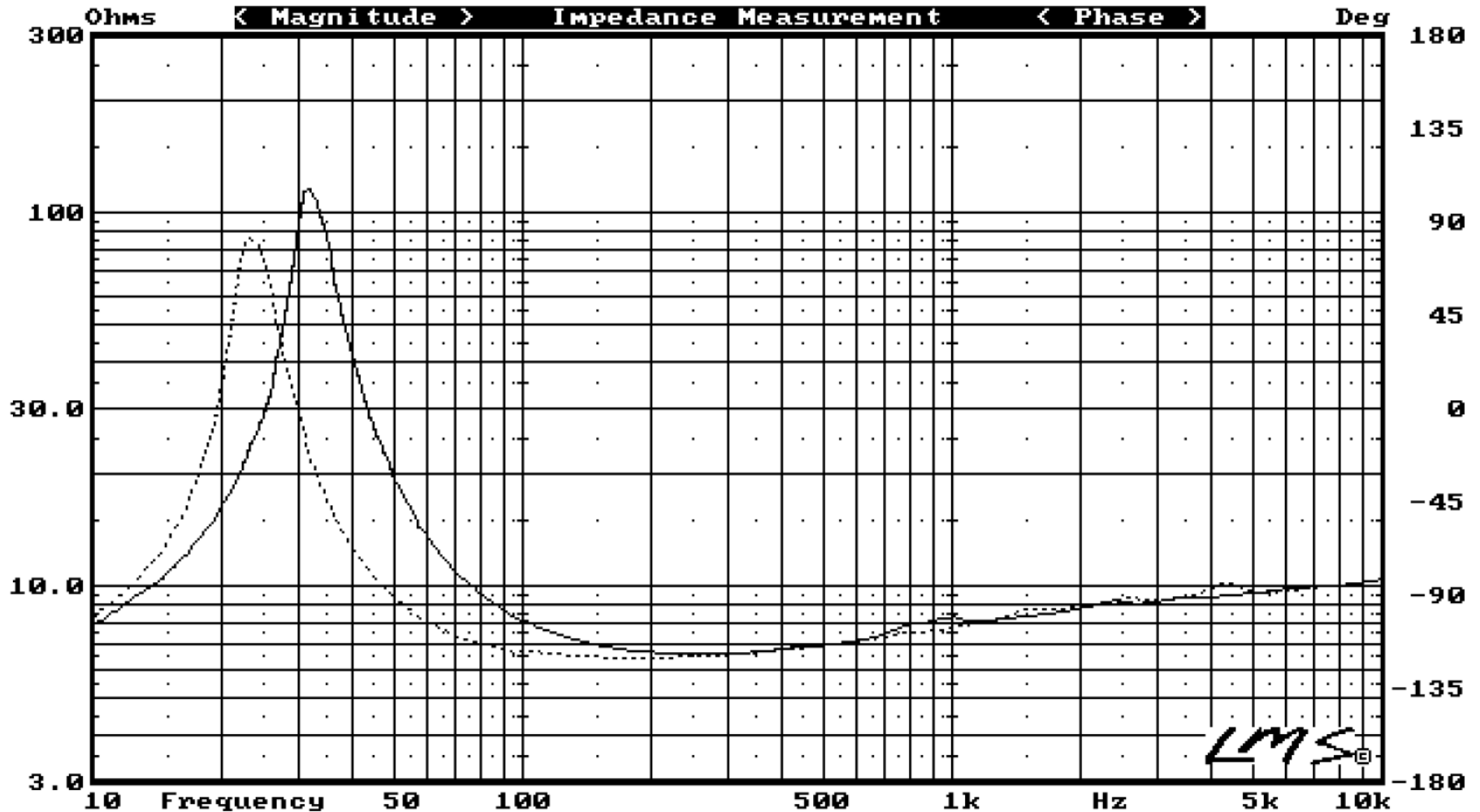




# O czym pogawędzimy...

- Metody pomiaru parametrów TS,
- Typy obudów,
- Dokładne omówienie obudowy zamkniętej,
- Dokładne omówienie obudowy B-R,
- Jak dobrać obudowę do głośnika.

# Ehh...znovu Thiele-Small





# No to jak przesunąć?

$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}}$$

gdzie:

$C_{ms}$  - podatność zawiesznień membrany  
(głośnika niezabudowanego) [m/N],

$M_{ms}$  - masa układu drgającego [kg].

# Jakość pomiaru ma znaczenie...



Zniekształcenia pomiaru, które mają negatywny wpływ na wyniki:

- wszelkie zafalowania i ostre skoki,
- zbyt duże wygładzenie

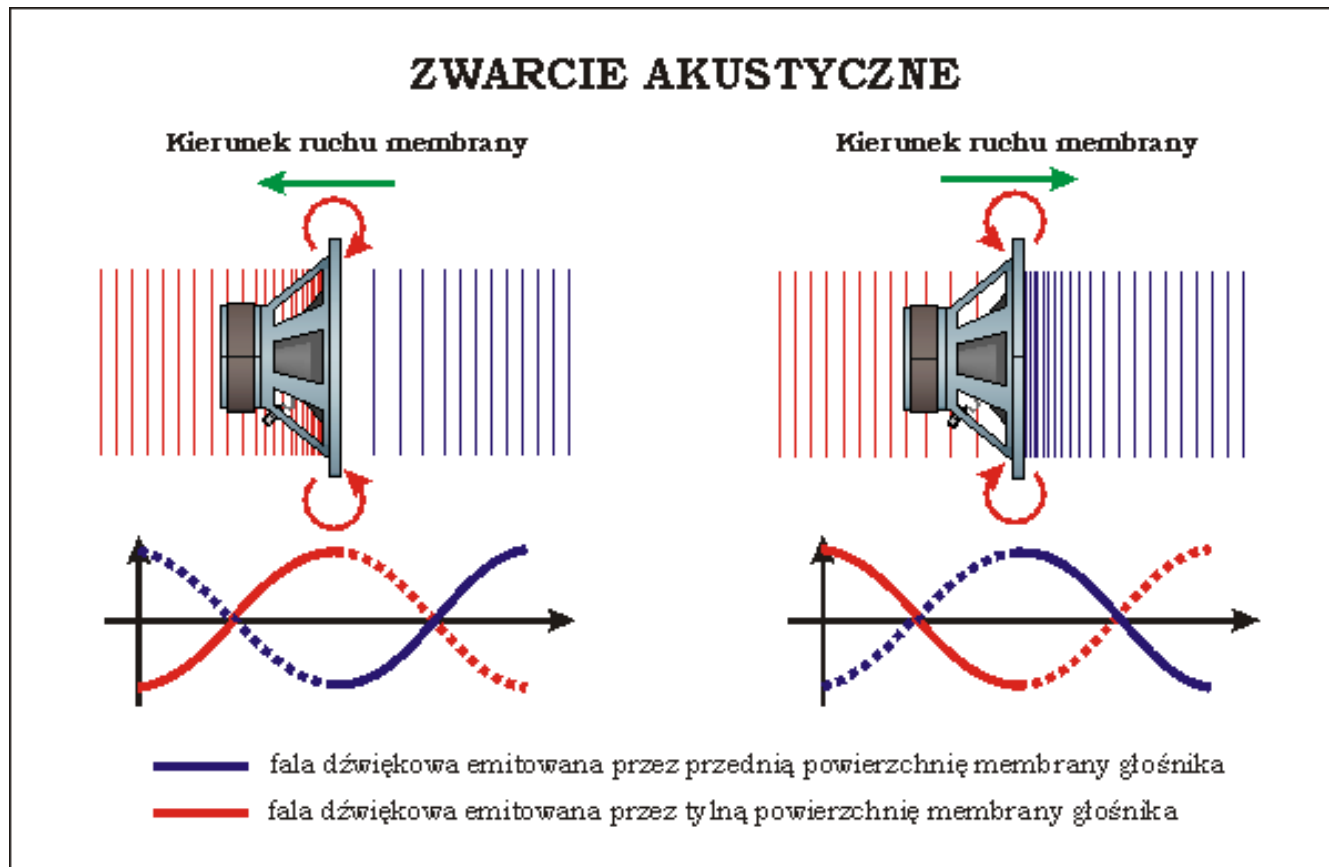
Co zrobić, żeby było dobrze?

- zwiększyć rozmiar próbki,
- wygładzanie max 1/16 oktawy,
- powtórzenie pomiaru.





# Obudowa – a po co?



**Typy obudów głośnikowych**



**Jakie  
znacie typy  
obudów?**

# Ja znam parę typów więcej



- odgroda (open baffle),
- zamknięta (closed),
- bas-reflex (vented),
- pasmowo-przepustowa (band-pass),
- linia transmisyjna (transmission line),
- tuby (horn),
- z otworem stratnym (variovent),
- BR z membraną bierną (passive radiator).

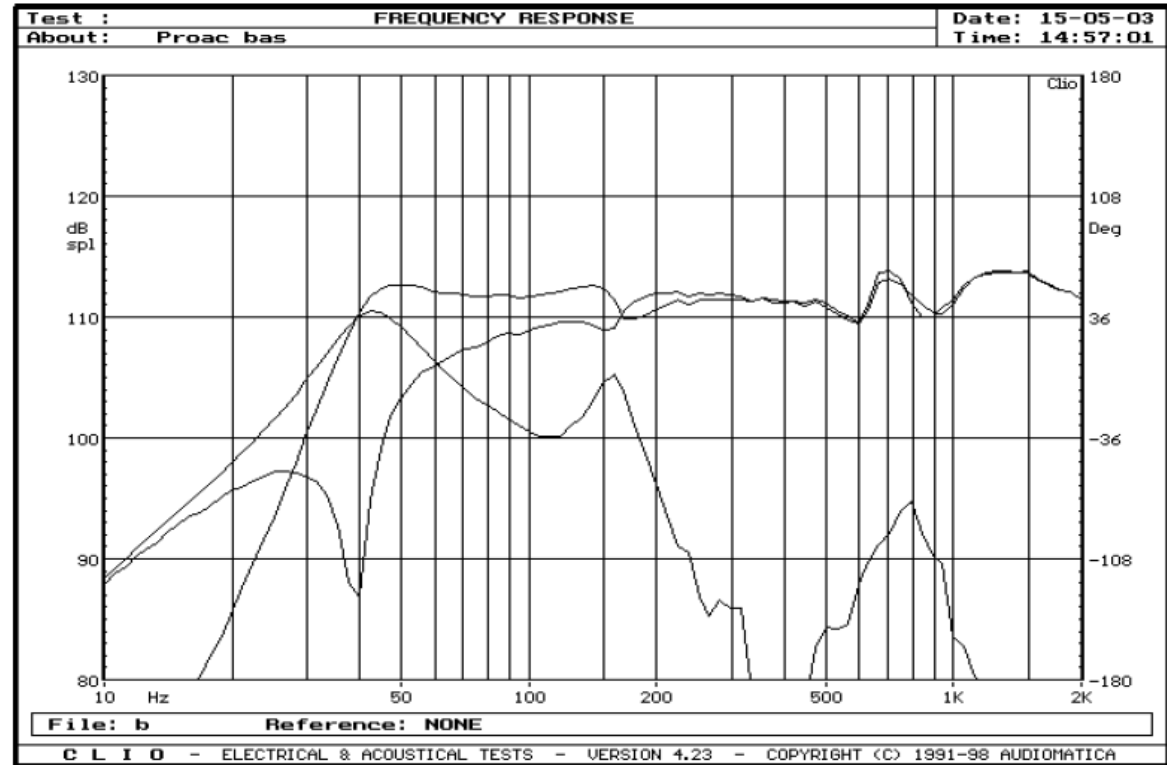
# Z czym to się je... ...odgroda



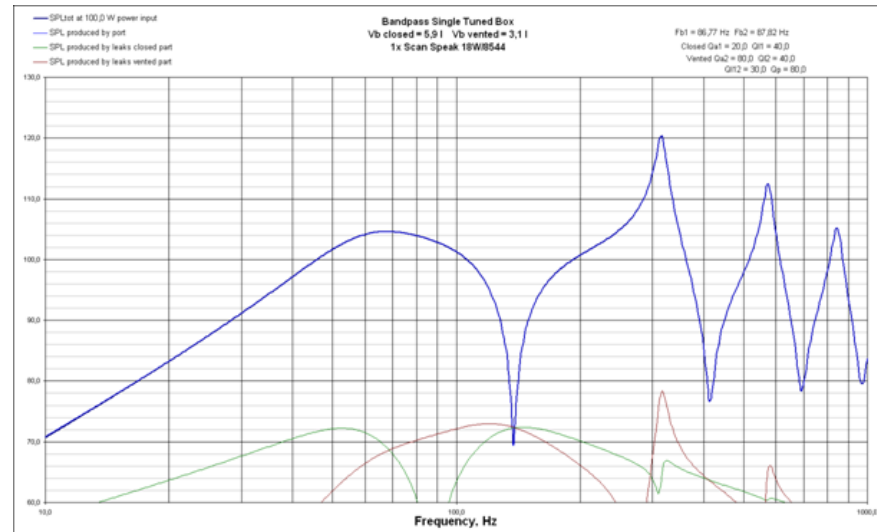
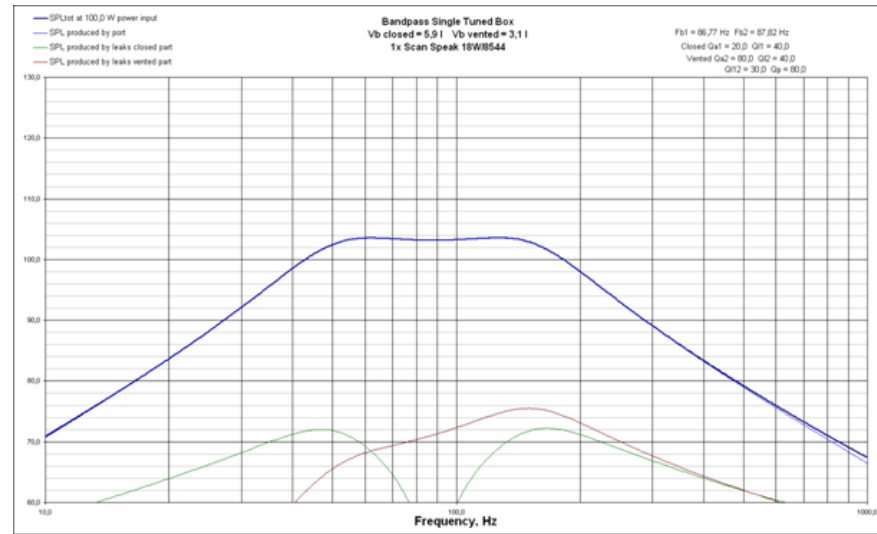
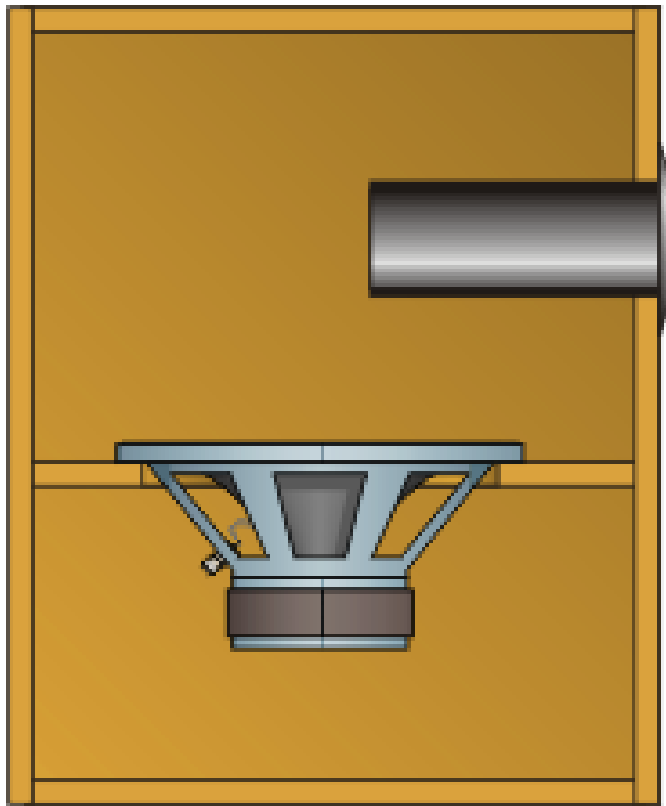
# Z czym to się je... ...obudowa zamknięta



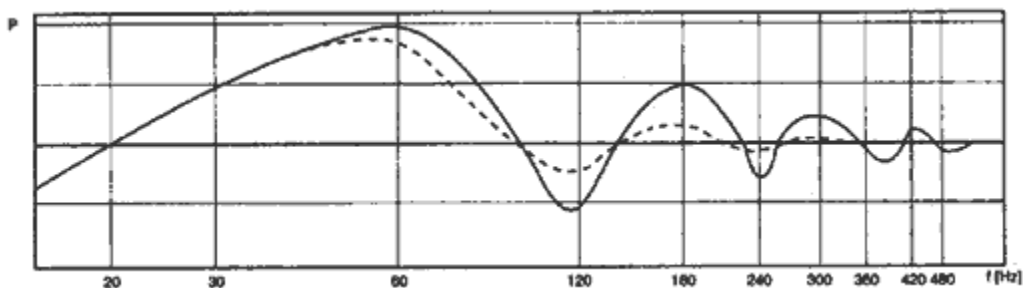
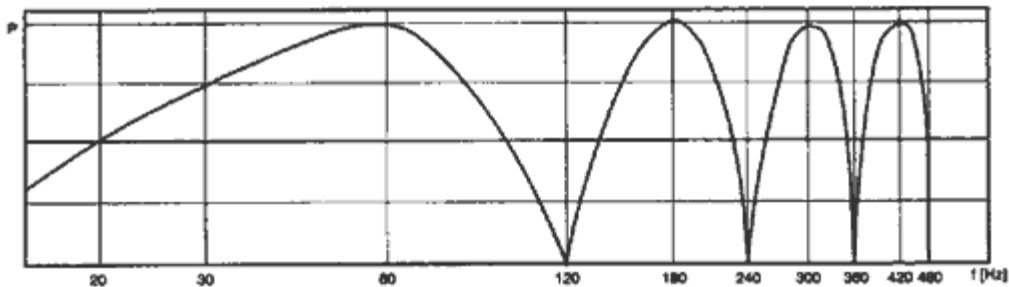
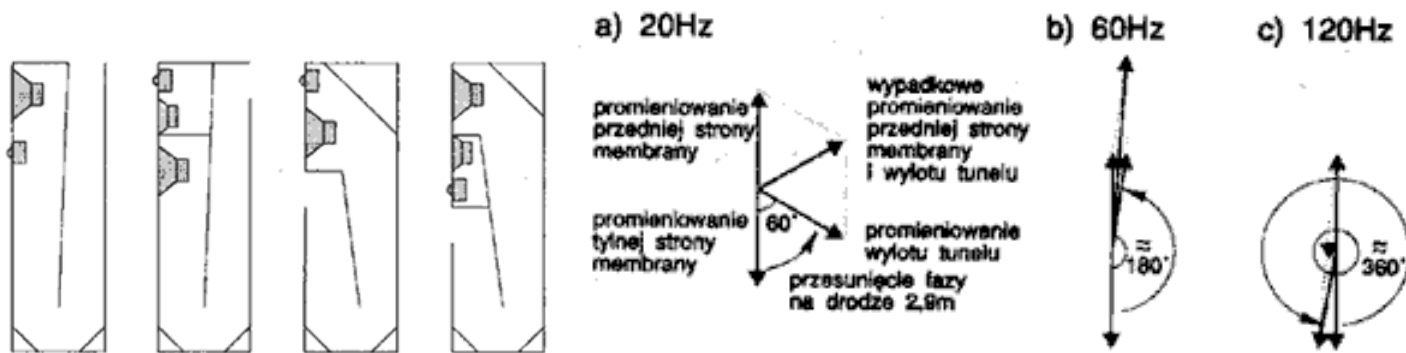
# Z czym to się je... ...bas-reflex



# Z czym to się je... ...band-pass

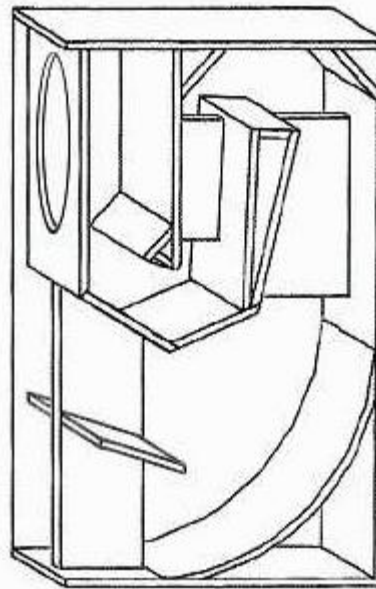
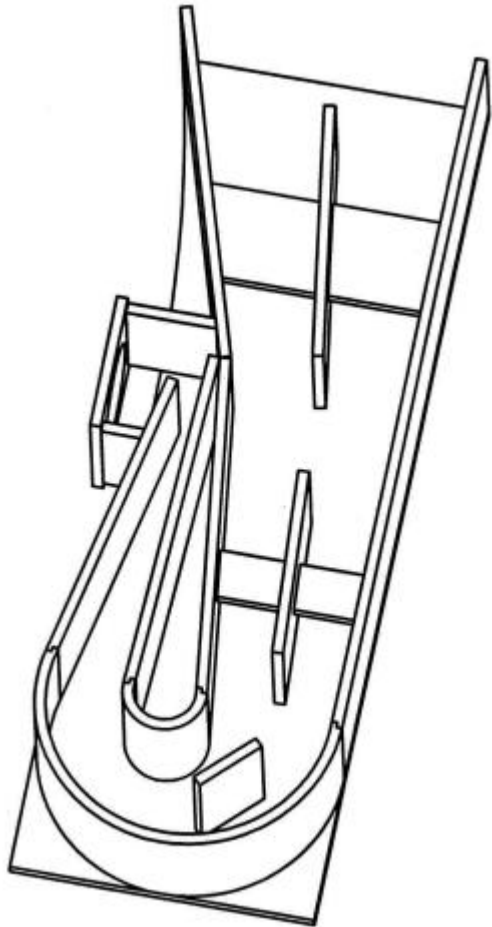


# Z czym to się je... ...linia transmisyjna





# Z czym to się je... ...tuby



# Z czym to się je... ...otwór stratny



Fig. 1

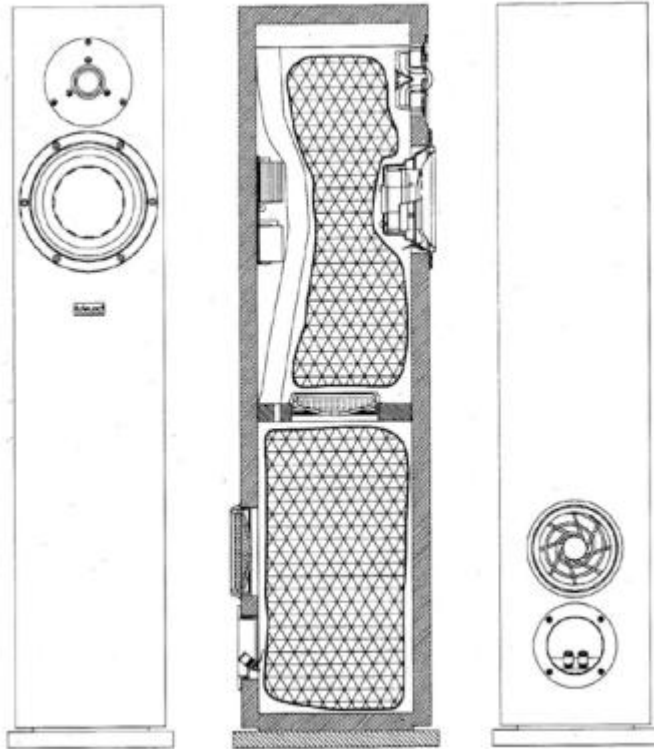
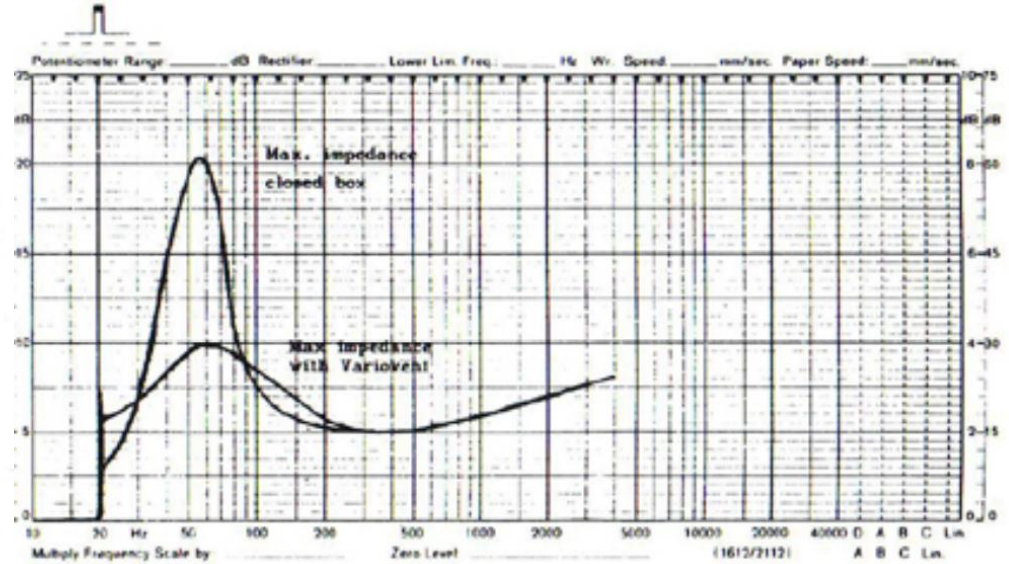
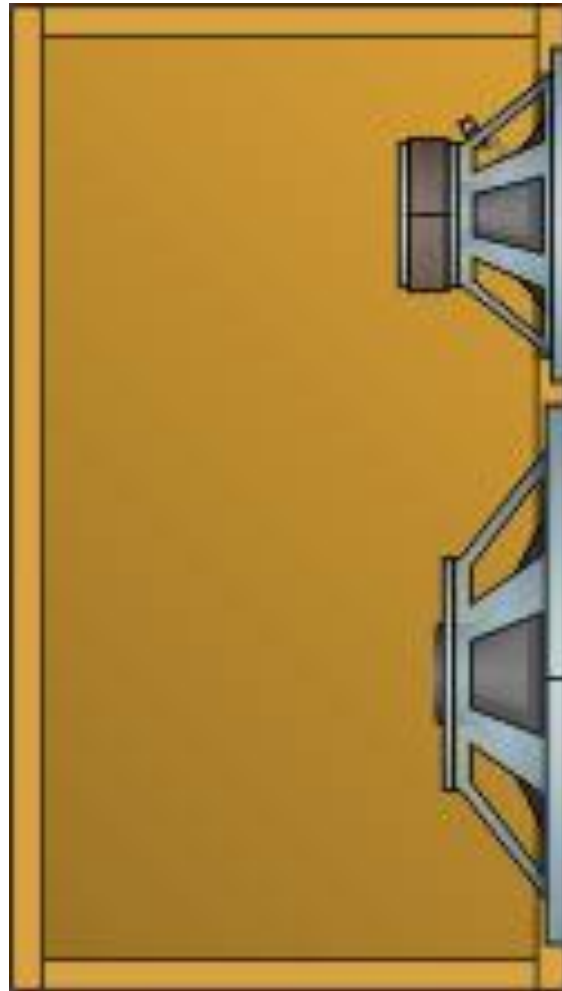


Fig. 2



# Z czym to się je... ...BR z membraną bierną



# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



Dla uproszczenia wzorów zdefiniujmy sobie parametr  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{V_{as}}{V_b}$$

gdzie:

$V_{as}$  - objętość ekwiwalentna głośnika niezabudowanego

$V_b$  - objętość niewytlumionej obudowy głośnika

Częstotliwość rezonansową głośnika w obudowie ( $f_c$ ) wyraża się wzorem:

$$f_c = f_s \cdot \sqrt{\alpha + 1}$$

gdzie:

$f_s$  - częstotliwość rezonansowa głośnika niezabudowanego

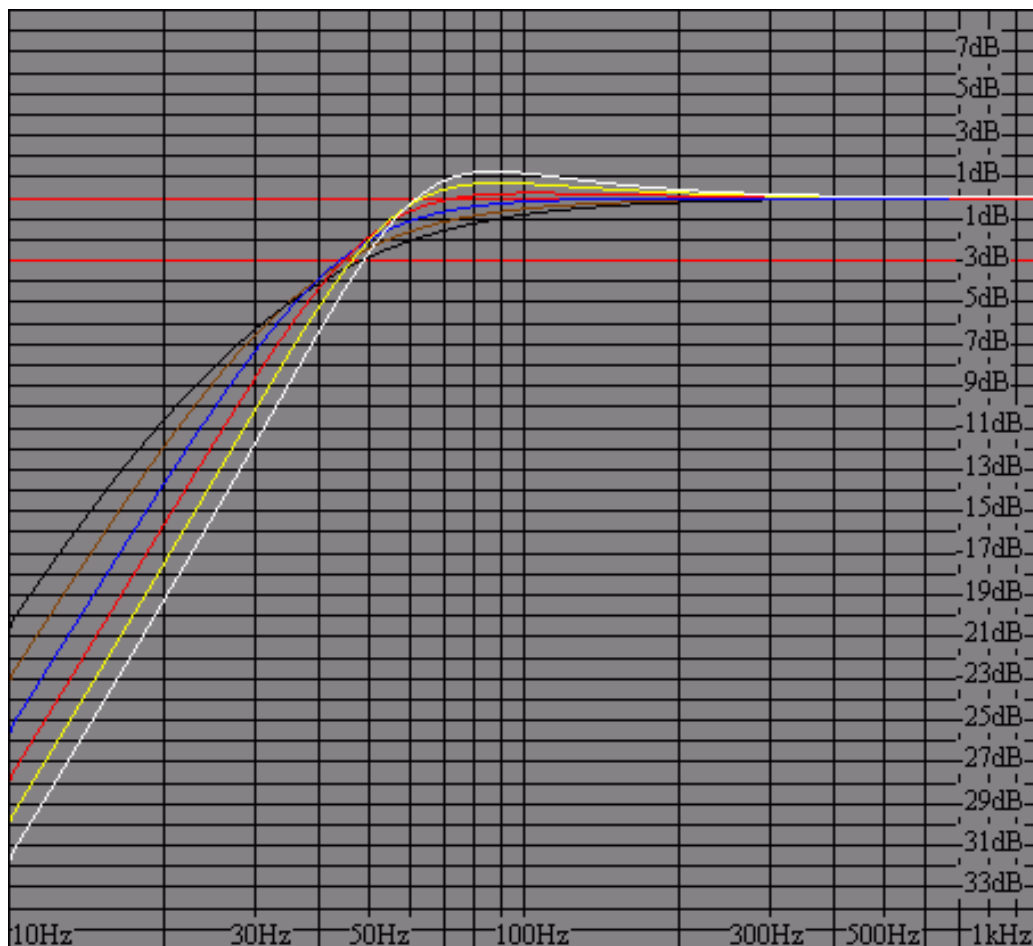
Dobroć całkowita ( $Q_{tc}$ ) głośnika w obudowie jest natomiast wyrażona wzorem:

$$Q_{tc} = Q_{ts} \cdot \sqrt{\alpha + 1}$$

gdzie:

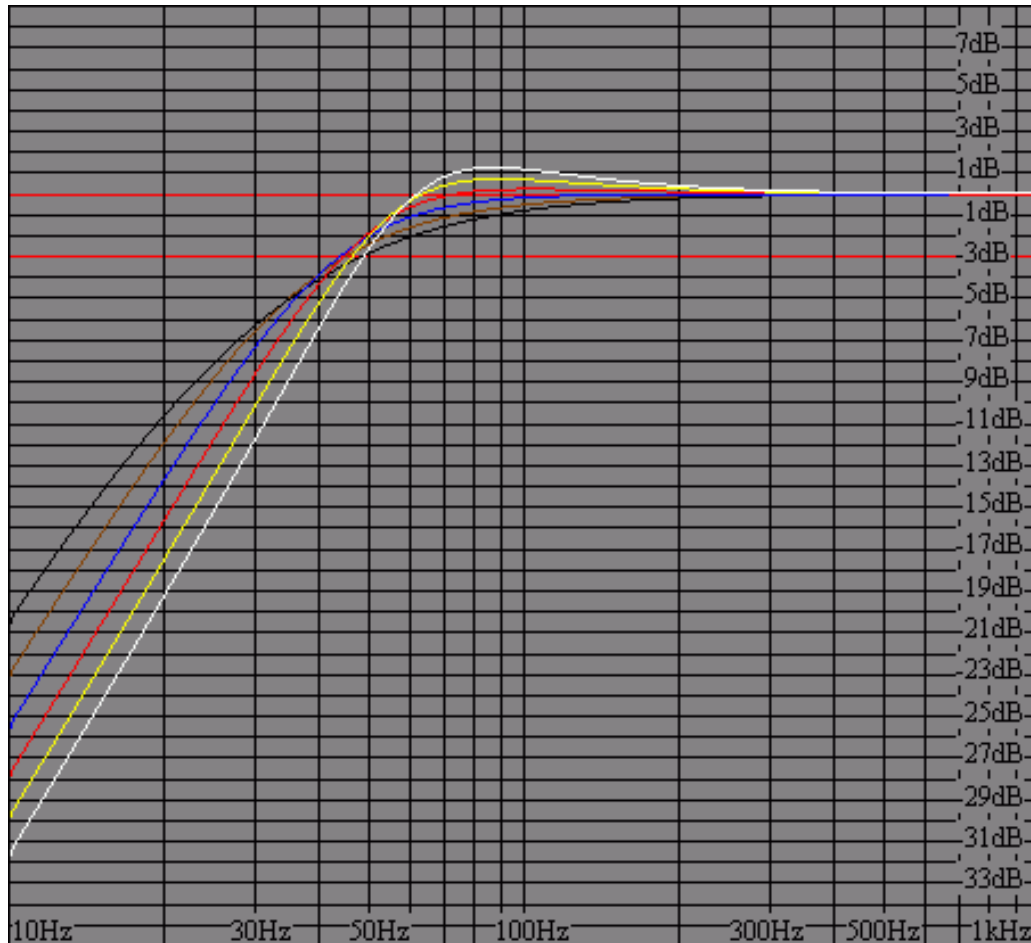
$Q_{ts}$  - dobroć całkowita głośnika niezabudowanego

# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



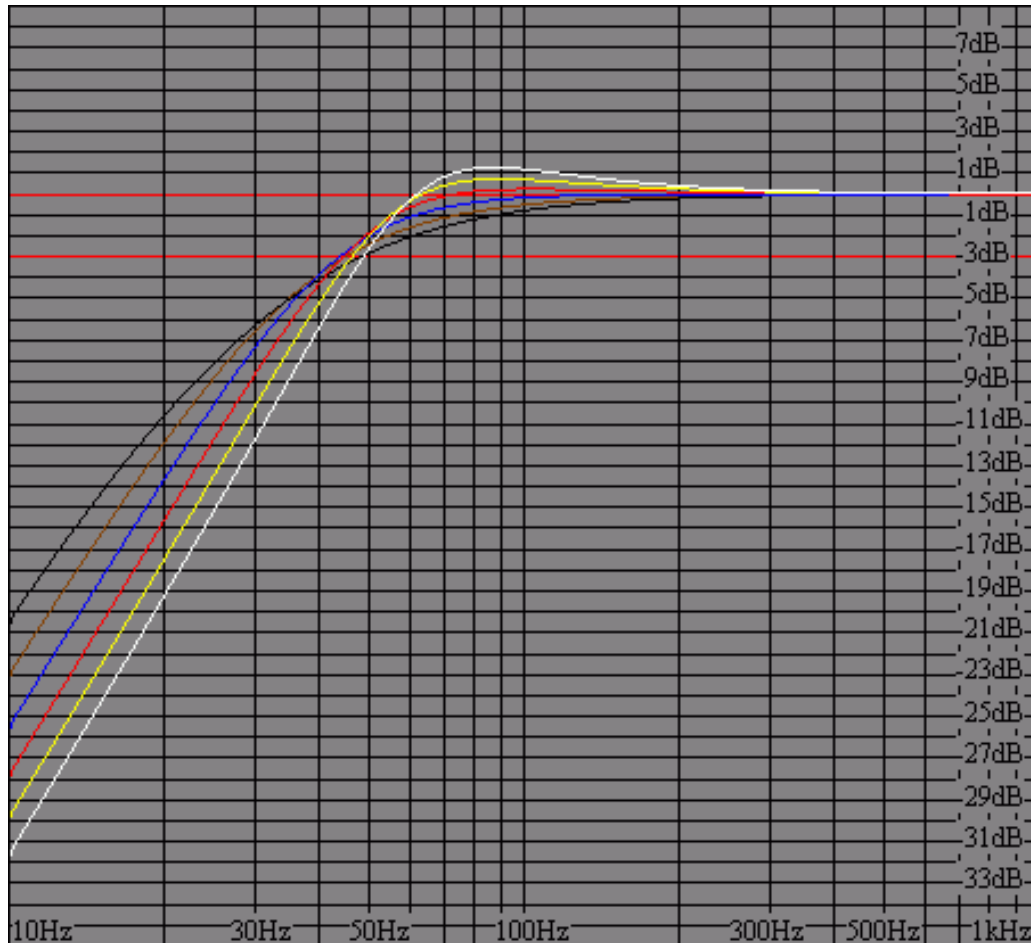
czarny,  $Q_{tc}=0,5$  - Dzięki tej obudowie możemy uzyskać bardzo niską dolną częstotliwość graniczną, punkt -6dB znajduje się przy 31Hz, jednak obudowa ma aż 200 litrów, charakterystyka impulsowa jest bardzo dobra, niestety z powodu ogromnej objętości efektywność jest bardzo niska (rezygnujemy z efektywności na koszt dolnej częstotliwości granicznej). Tracimy 1,5dB przy 70Hz.

# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



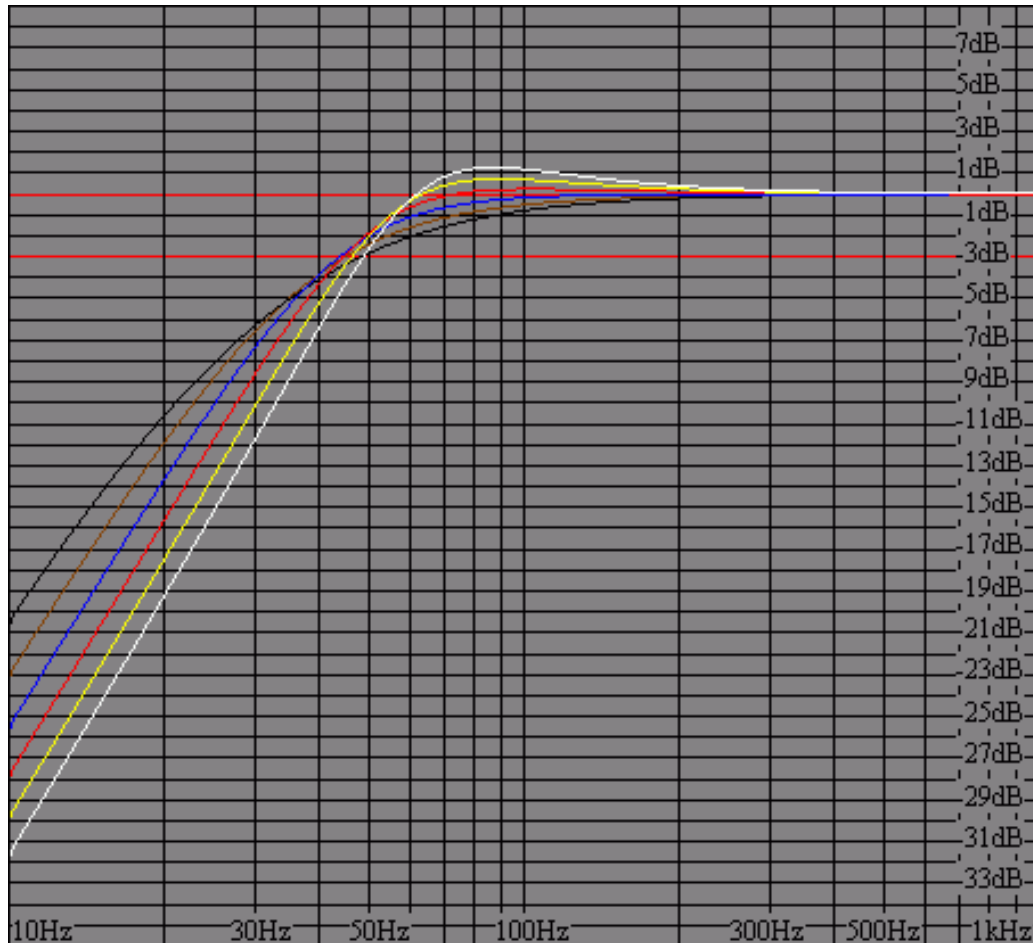
brązowy,  $Q_{tc}=0,6$  - tutaj również potrzebujemy dużej obudowy, 80 litrów. Punkt  $-6\text{dB}$  mamy przy  $32,5\text{Hz}$ , czyli "tylko"  $1,5\text{Hz}$  wyżej niż w obudowie 200 litrów. W 80 litrach wytrzymałość mocowa będzie na pewno dużo większa, a wielkość obudowy jest jeszcze do zaakceptowania. Impuls to  $8\text{ms}$ . Tracimy około  $1\text{dB}$  przy  $70\text{Hz}$ .

# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



niebieski,  $Q_{tc}=0,7$  - ta wartość (dokładnie 0,707) jest najczęściej stosowana. Jest to kompromis pomiędzy dolną częstotliwością graniczną, a wytrzymałością mocową i charakterystyka impulsową. -6dB przy 33,5Hz, a obudowa ma tylko 45 litrów!. Charakterystyka impulsowa bardzo dobra, wytrzymałość mocowa zwiększyła się.

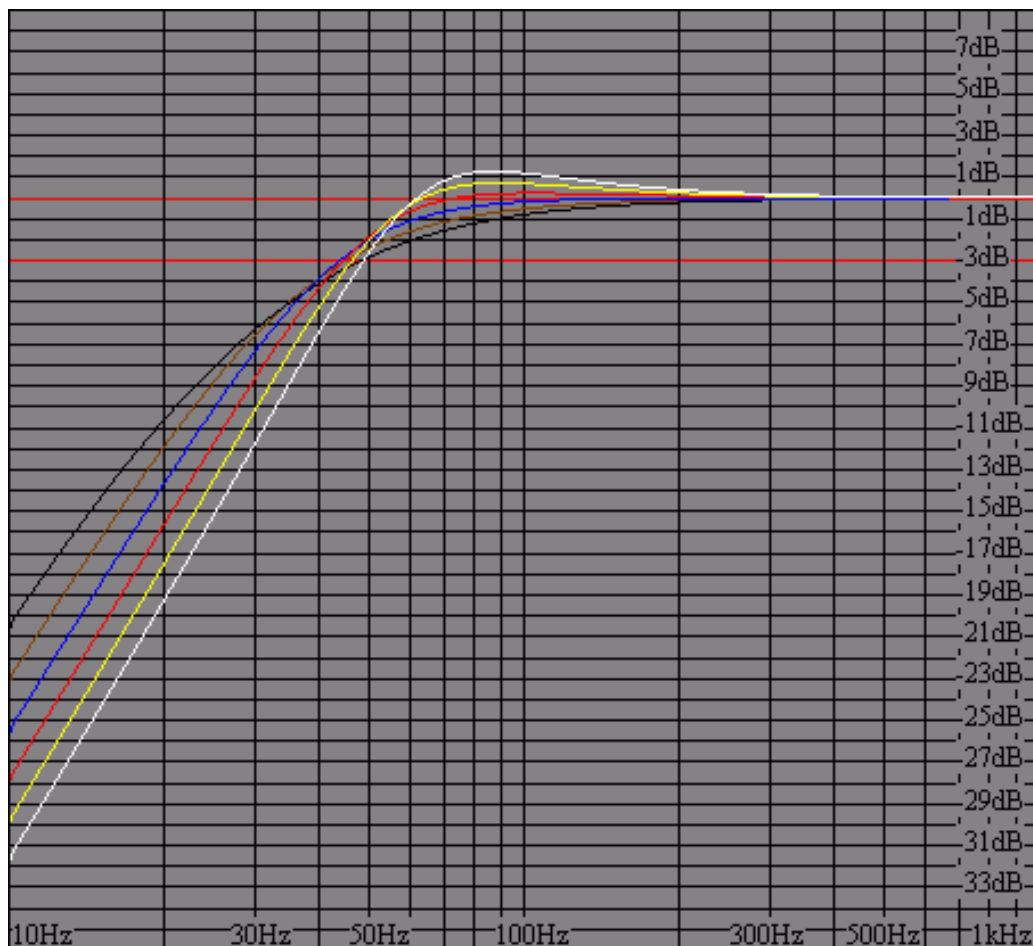
# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



czzerwony,  $Q_{tc}=0,8$  - tutaj mamy podobną sytuację jak przy  $Q_{tc} 0,7$ , impuls jest na podobnym poziomie, jednak -6dB przesunęło się do 36Hz. Obudowa ma 30 litrów. Jeśli ktoś ma mało miejsca to jest to dobre rozwiązanie.



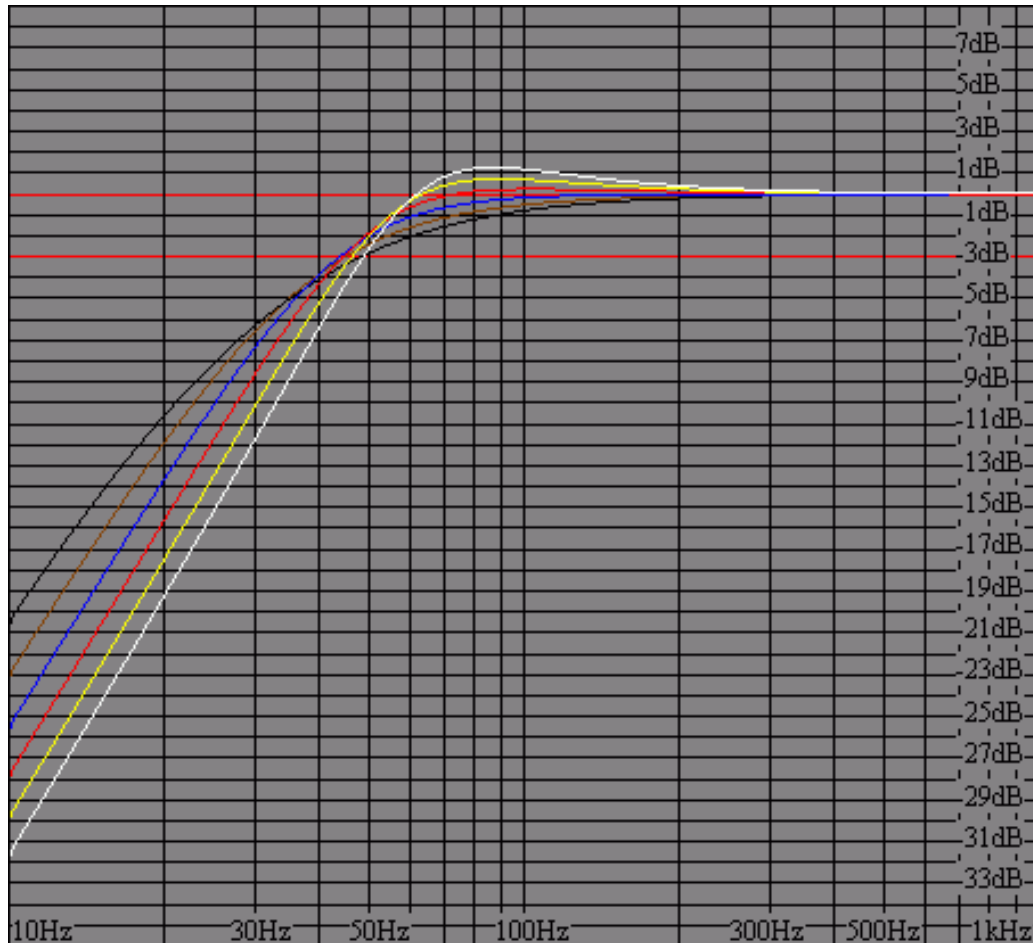
# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



żółty,  $Q_{tc}=0,9$  - Obudowa ma 22 litry, -6dB przy 38,5Hz.

Charakterystyka spada bardzo stromo, przy 80Hz występuje prawie 1dB podbicie efektywności co nie powinno być słyszalne. Rozwiązanie również dla kogoś kto ma mało miejsca lub do samochodu.

# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



biały,  $Q_{tc}=1$  - 1,5dB podbicie przy 80Hz. Obudowa ma tylko 15 litrów. Dużą wytrzymałość mocowa ze względu na małą obudowę. Charakterystyka odpada bardzo stromo. Charakterystyki impulsowe gorsze niż przy  $Q_{tc} 0,7$ .

# Obudowa zamknięta... ...parę (wiele) słów więcej.



Poszczególne wartości dobroci  $Q_{tc}$  mają swoiste "nazwy" charakterystyk z nich wynikających:

**$Q_{tc} = 0,5$**  - strojenie o tłumieniu krytycznym - najlepsze charakterystyki impulsowe

**$Q_{tc} = 0,58$**  - strojenie Bessel'a

**$Q_{tc} = 0,707$**  - strojenie Butterworth'a - charakterystyka ma maksymalnie rozciągnięty liniowy zakres przetwarzania

**$Q_{tc} = 1,4$**  - strojenie Chebyshev'a

Skoro znamy już wzory i wiemy co nieco o dobroci całkowitej układu można sobie odpowiedzieć na pytanie jak obliczyć obudowę.

Otóż przede wszystkim zakładamy dobroć jaką chcemy uzyskać. Znając dobroć  $Q_{ts}$  głośnika i mając założoną wartość dobroci  $Q_{tc}$  możemy wyznaczyć wartość współczynnika  $\alpha$ :

$$\alpha = \left( \frac{Q_{tc}}{Q_{ts}} \right)^2 - 1$$

Ze wzoru na  $\alpha$  z łatwością wyznaczymy objętość obudowy ( $V_b$ ):

$$V_b = \frac{V_{as}}{\alpha}$$

Oraz korzystając ze wzoru podanego wcześniej obliczymy częstotliwość rezonansową głośnika w obudowie o objętości  $V_b$ .

# Obudowa bas-reflex... ...słów jeszcze więcej.



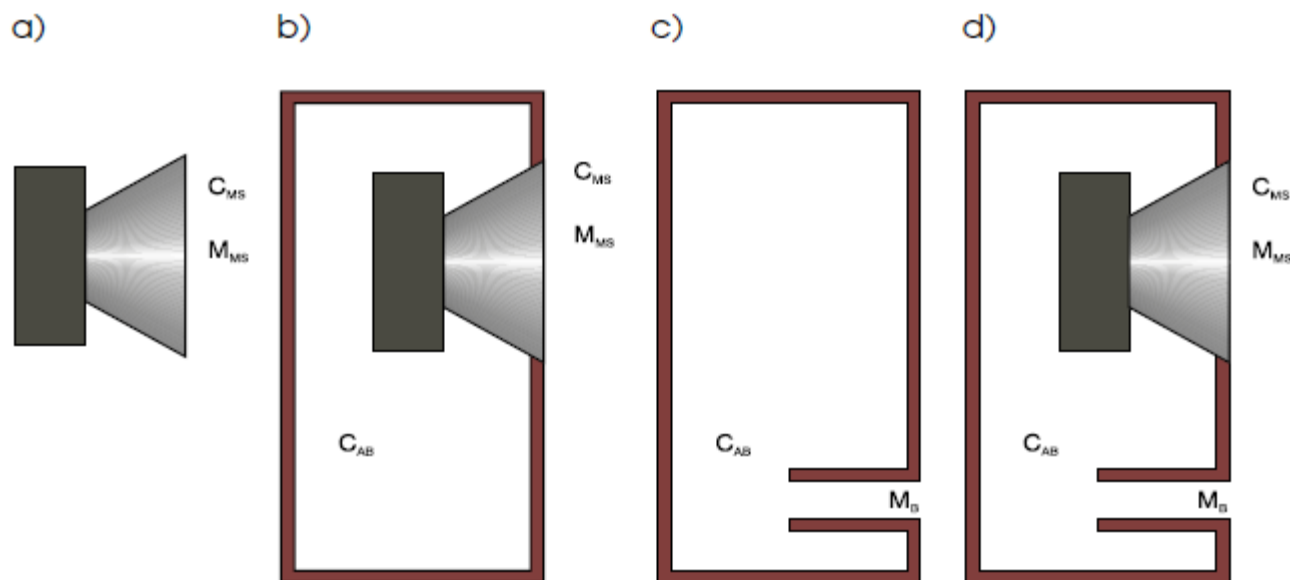
$$f_s = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{C_{ms} \cdot M_{ms}}}$$

gdzie:

$C_{ms}$  - podatność zawiesznień membrany  
(głośnika niezabudowanego) [m/N],

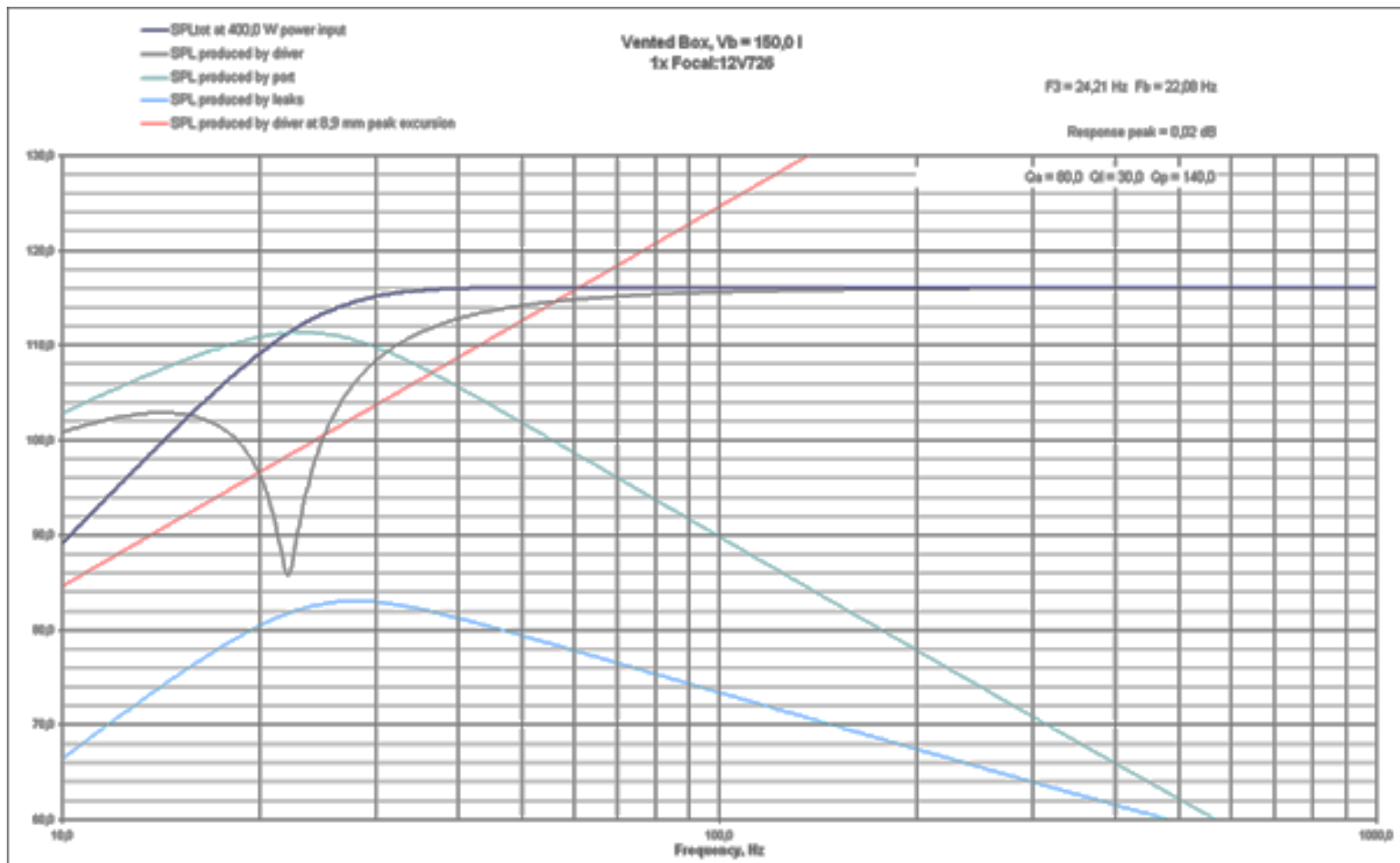
$M_{ms}$  - masa układu drgającego [kg].

# Obudowa bas-reflex... ...słów jeszcze więcej.

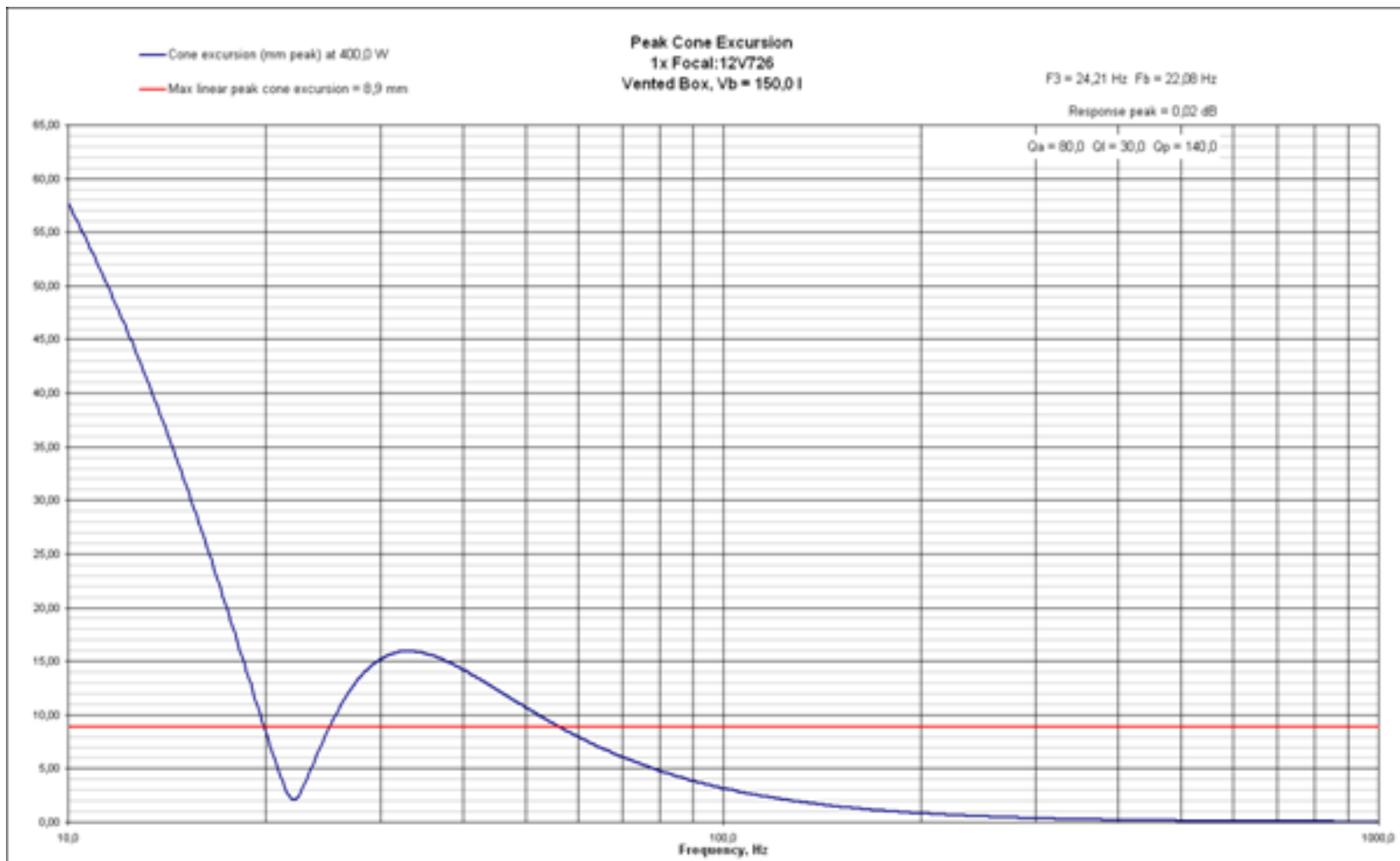


Rys. 41. Różne rodzaje obudów: a) głośnik swobodnie zawieszony jest układem rezonansowym utworzonym przez  $C_{MS}$  (podatność zawiesznień membrany) i  $M_{MS}$  (masa układu drgającego), b) głośnik w obudowie zamkniętej tworzy układ rezonansowy o podatności  $(C_{MS} \times C_{AB}) / (C_{MS} + C_{AB})$  (wypadkowa podatność zawiesznień głośnika i powietrza w obudowie) i masie  $M_{MS}$ , c) – obudowa z otworem jest układem rezonansowym o podatności  $C_{AB}$  i masie  $M_B$ , d) – głośnik w obudowie z otworem to kilka układów rezonansowych.

# Obudowa bas-reflex... ...słów jeszcze więcej.



# Obudowa bas-reflex... ...słów jeszcze więcej.



# Obudowa bas-reflex... ...słów jeszcze więcej.



Obliczenia rozpoczynamy od obliczenia obudowy zamkniętej dla danego głośnika (odsyłam zatem do artykułu o tym traktującego). Dla obliczenia samego tunelu b-r musimy znać częstotliwość rezonansową obudowy zamkniętej oraz jej dobroć  $Q_{tc}$ . Niech  $f_b$  oznacza zakładaną częstotliwość rezonansową obudowy b-r. Jeżeli  $Q_{tc}$  obudowy zamkniętej jest większe niż 0,707 (a przypominam, że jest to zależne od naszego założenia) to przyjmujemy, że:

$$f_b = 0,6 \cdot f_c$$

Jeżeli natomiast  $Q_{tc}$  jest mniejsze niż 0,707 wtedy:

$$f_b = 0,75 \cdot f_c$$

Minimalną średnicę pojedynczego tunelu b-r wyznaczamy ze wzoru:

$$D_{\min} = 20,3 \cdot \sqrt[4]{\frac{\left(\frac{S_d \cdot X_{\max}}{10}\right)^2}{f_b}}$$

gdzie:

$D_{\min}$  - minimalna średnia średnica pojedynczego otworu b-r wyrażona w [mm]

$S_d$  - czynna powierzchnia membrany wyrażona w [cm<sup>2</sup>]

$X_{\max}$  - maksymalne wychylenie membrany w jedną stronę wyrażone w [mm]

$f_b$  - częstotliwość na jaką stroimy obudowę [Hz]



# Obudowa bas-reflex... ...słów jeszcze więcej.



Po obliczeniu minimalnej średnicy otworu b-r dobieramy najbliższą większą średnicę tunelu z dostępnych i obliczamy powierzchnię otworu dobranego tunelu b-r (pamiętajmy by przyjąć średnią średnicę otworu jeśli tunel nie jest idealnie cylindryczny):

$$F = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

gdzie:

$F$  - powierzchnia otworu b-r [mm<sup>2</sup>]

$D$  - średnica otworu b-r [mm]

Gdy już to zrobimy możemy obliczyć długość naszego tunelu bass-reflex:

$$L = \frac{10 \cdot c^2 \cdot F}{4\pi^2 \cdot fb^2 \cdot Vb} - 0,5\sqrt{\pi \cdot F}$$

gdzie:

$L$  - długość tunelu bass-reflex [mm]

$c$  - prędkość dźwięku wyrażona w [m/s] (343 m/s)

$F$  - powierzchnia otworu bass-reflex [mm<sup>2</sup>]

$fb$  - częstotliwość rezonansowa obudowy b-r [Hz]

$Vb$  - objętość obudowy [litr]

# EBP – czyli jak wybrać obudowę...



$$EBP = \frac{f_s}{Q_{es}}$$

Bardzo ogólna (lecz nie żelazna) reguła mówi, że głośniki o  $EBP < 50$  doskonale nadają się do obudów zamkniętych. W przypadku  $EBP$  z przedziału  $50 \dots 100$  głośniki można aplikować zarówno w obudowy zamknięte jak i bass-reflex.  $EBP > 100$  mówi nam o przeznaczeniu głośnika do obudów bass-reflex.

Upraszczając nieco problem można ogólnie przyjąć, że głośniki o  $Q_{ts} < 0,3$  aplikujemy w obudowy bass-reflex,  $Q_{ts} > 0,4$  - obudowy zamknięte.