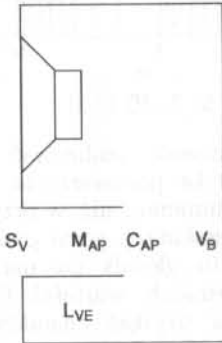


Kontynuujemy serię artykułów poświęconych zasadom konstruowania obudów głośnikowych. Część 1 (EP 8/94) dotyczyła obudów zamkniętych, natomiast w tej części przedstawiamy obudowy bass-reflex.



Rys. 1. Układ rezonansowy obudowy z otworem

CAP - podatność powietrza w obudowie

MAP - masa powietrza w otworze

VB - objętość obudowy

SV - powierzchnia otworu

LVE - efektywna długość tunelu

### Zasada działania

System bass-reflex (obudowy z otworem) na wykorzystuje energię promieniowaną przez tylną stronę membrany do pobudzenia układu rezonansowego obudowy i wypromieniowania energii zakresu częstotliwości rezonansowej tego układu na zewnątrz. Układ rezonansowy obudowy tworzą: masa powietrza w otworze (w tunelu otworu) określona jego powierzchnią i długością, i podatność powietrza w obudowie, określona jego objętością i powierzchnią działającego na nią otworu (rys. 1).

Przy częstotliwości rezonansowej układu bass-reflex jego praca odciąża sam głośnik niskotonowy od dużych amplitud. W tym zakresie główną część energii promieniuje otwór, w fazie przesuniętej o ok. 90° względem fazy fali promieniowanej przez sam głośnik. Poniżej częstotliwości rezonansowej przesunięcie fazy zwiększa się do prawie 180°, a otwór promieniuje energię porównywalną z wytwarzaną przez głośnik (głośnik przepompowuje powietrze w obudowie). Wypadkowe ciśnienie akustyczne jest stąd bardzo małe. Powyżej częstotliwości rezonansowej bass-reflex stopniowo przestaje pracować, udział energii wytwarzanej przez głośnik wzrasta (rys. 2).

## Obudowy głośnikowe część 2 Obudowa bass-reflex

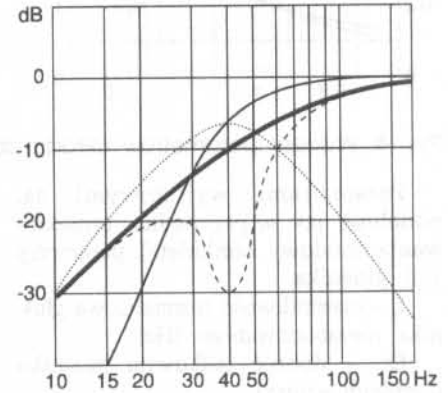
Jedną z ważnych korzyści ze stosowania obudowy z otworem jest zmniejszenie wychylenia membrany przy częstotliwościach, leżących w okolicy częstotliwości rezonansowej, co w dużym stopniu redukuje zniekształcenia nieliniowe.

Zysk w sprawności (w stosunku do obudowy zamkniętej) występuje w zakresie częstotliwości rezonansowej (o ile efektywność promieniowania otworu jest duża), ale przede wszystkim w zakresie ok. 1 oktawy powyżej niej, gdzie energię wytwarzają zarówno otwór jak i głośnik, a ich fazy są zgodne. Jak z powyższego mogłoby się wydawać, strojenie układu powinno mieć miejsce w okolicach krańca pasma akustycznego (ok. 20Hz). Jednak właściwie dobrany BASS-REFLEX musi wiązać częstotliwość rezonansową z parametrami i charakterystyką przetwarzania samego głośnika. Zbyt nisko dostrojony bass-reflex nie działa efektywnie. Jedną z najprostszych recept, przez wiele lat rozpowszechnianą było dostrajanie obudowy do częstotliwości rezonansowej głośnika (swobodnie zawieszono). Przepis ten nie był jednak najlepszy; dostrzegający to konstruktorzy prowadzili żmudne eksperymenty zmieniając częstotliwość rezonansową, a także inne parametry układu. Dzisiaj, w oparciu o wiele ścisłych analiz znacznie większą część pracy wykonać można za pomocą obliczeń i symulacji, chociaż metoda prób i błędów również nie straciła do końca znaczenia.

### Projektowanie

Przedstawione poniżej wskazówki oparto na analizie dokonanej przez R. Smalla. Dała ona początek wielu rozwijającym ją pracom i rozpowszechniła nowe metody projektowania obudów głośnikowych.

Projektowanie obudowy z otworem wiąże się z określeniem możliwych do otrzymania charakterystyk częstotliwościowych, wynikających z parametrów stosowanego głośnika. Opracowane teoretyczne charakterystyki, mogące opisywać pracę głośnika w obudowie z otworem to m.in. charakterystyki C4 (równomiernie faliste Czebyszewa), B4 (maksymalnie płaska Butterwortha) i QB3 (quasi-maksy-

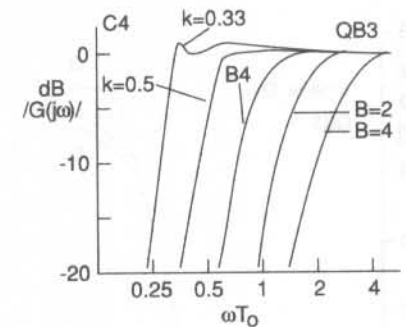


Rys. 2. Przykładowe charakterystyki częstotliwości bass-reflex: głośnika (linia kreskowana), otworu (linia kropkowana) i wypadkowa charakterystyka układu (linia ciągła cienka), i ten sam głośnik w obudowie zamkniętej (linia gruba)

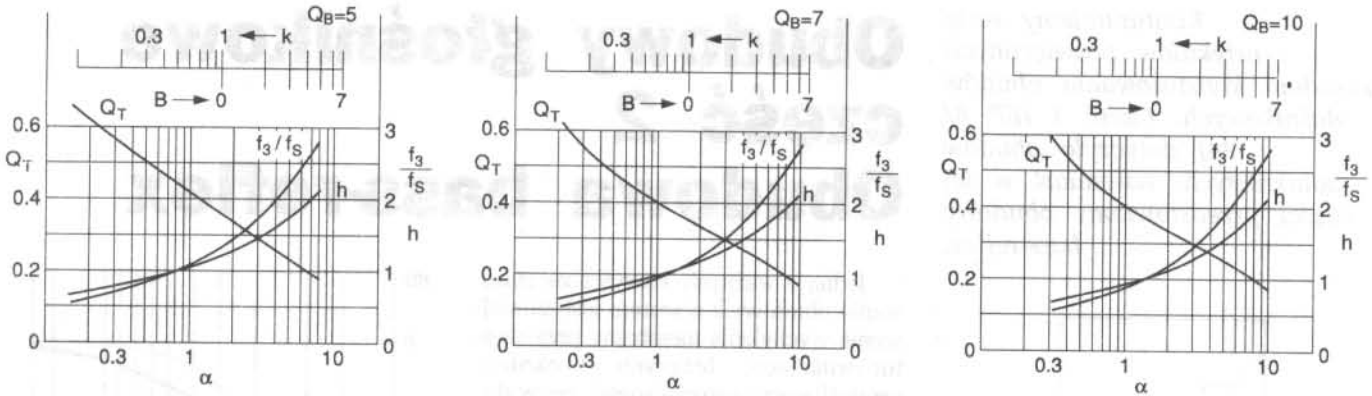
malnie płaskie).

Charakterystyka C4 pozwala uzyskać niską częstotliwość graniczną  $f_3$  (spadku 3dB) kosztem liniowości przetwarzania. Dokładny kształt charakterystyki C4 określa jej parametr  $k$ . QB3 to charakterystyka o łagodniejszym, ale wyżej na skali częstotliwości zaczynającym się spadku sprawności przetwarzania. Jej dokładny kształt określa parametr  $B$ . Przy parametrze  $k=1$  i  $B=0$  charakterystyki C4 i QB3 przechodzą w charakterystykę B4, zapewniającą równomierność przetwarzanego pasma.

Zmniejszenie  $k$  zwiększa nierównomierność charakterystyki, zwiększanie  $B$  zmniejsza jej stromość (rys. 3).



Rys. 3. Charakterystyki typu C4 ( $k = 0,33$  i  $k = 0,5$ ), B4, QB3 ( $B=2$  i  $B = 4$ ). Ich wzajemne położenie na skali częstotliwości jest na tym rysunku przypadkowe. (1, 3)



Rys. 4. Wykresy parametrów układu obudowy z otworem dla trzech wartości dobroci  $Q_B = 5, 7, 10$  (1,3)

Parametrami wyjściowymi są, podobnie jak w przypadku projektowania obudowy zamkniętej, parametry T-S głośnika.

$f_s$  - częstotliwość rezonansowa głośnika niezabudowanego [Hz]

$Q_{TS}$  - dobroć całkowita głośnika niezabudowanego

$V_{AS}$  - objętość ekwiwalentna [m<sup>3</sup>]

Parametry wiążące głośnik z obudową to:

$$\alpha = V_{AS}/V_B \quad [1]$$

gdzie  $V_B$  - objętość obudowy z otworem [m<sup>3</sup>]

$$h = f_B/f_s$$

gdzie  $f_B$  - częstotliwość rezonansowa obudowy z otworem [Hz]

W poprzednim artykule, poświęconym projektowaniu obudów zamkniętych, określono współczynnik  $\alpha = \sqrt{1+V_{AS}/V_C}$ . W tym artykule zmieniono oznaczenie, zgodnie z przyjętym powszechnie w literaturze, gdzie  $\alpha = V_{AS}/V_C$ , lub  $\alpha = V_{AS}/V_B$  ( $V_C$  - objętość obudowy zamkniętej,  $V_B$  - objętość obudowy z otworem).

Ostatnim parametrem, który na tym etapie należy ustalić, jest dobroć obudowy  $Q_B$ . Jej wartość wynika ze strat powstających na skutek pochłaniania dźwięku przez wnętrze obudowy, jej nie szczelności i tarcia powietrza w otworze. Zawiera się najczęściej w przedziale 5...10 (dla obudowy bez-

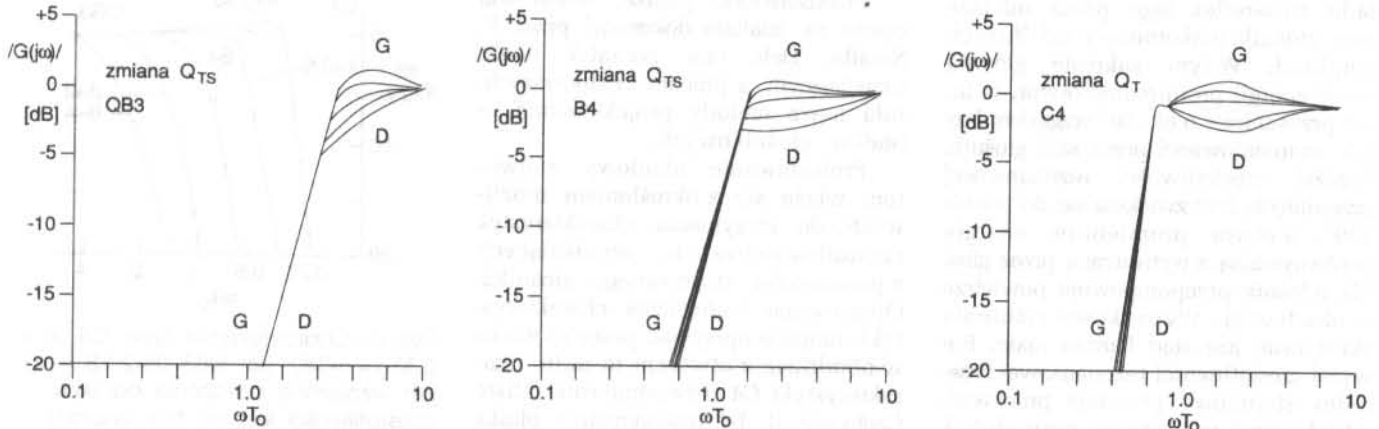
stratnej  $Q_B = \infty$ )

Wyniki analizy działania obudów z otworem zilustrowano na rys. 4. Przedstawiono na nim wykresy parametrów układu dla  $Q_B = 5, 7, 10$ . Dodatkowo przedstawiono wykres funkcji  $f_3/f_s$ , pozwalającej określić uzyskiwaną częstotliwość 3dB spadku sprawności przetwarzania ( $f_3$ ). Wartość  $Q_{TS}$  zastosowanego głośnika, przy określonej dobroci obudowy  $Q_B$  dokładnie określa wszystkie parametry układu, również zakres i charakterystykę przetwarzania. Np. dla  $Q_B=10$  i  $Q_{TC} = 0,3$  odczytujemy  $\alpha=3$ ,  $h=1,3$ , przy charakterystyce typu QB3 ( $B=2,5$ ) i stosunku  $f_3/f_s = 1,55$ . Jak również widać z powyższych wykresów, przy określonej dobroci obudowy  $Q_B$  jest tylko jedna wartość  $Q_{TS}$ , która pozwala realizować charakterystykę maksymalnie płaską B4.

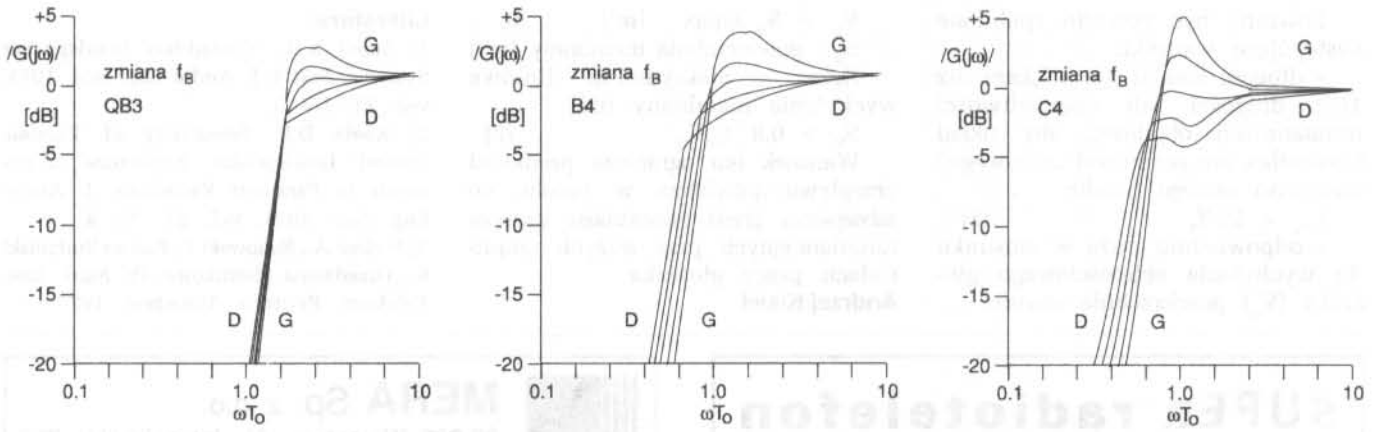
Regulowanie wartości  $Q_B$  jest trudne, dla średniej wielkości obudów zakłada się zwykle  $Q_B=7$ , dla obudów małych i dużych przyjmuje się  $Q_B=5$ . Ponadto zmiany wartości  $Q_B$  w niewielkim stopniu wpływają na zmianę odpowiedniej dla charakterystyki B4 wartości  $Q_{TS}$  (dla  $Q_B = 5$  pożądana wartość  $Q_{TS} \approx 0,41$ , dla  $Q_B=10$   $Q_{TS} \approx 0,39$ ). Można przyjąć, że bez względu na wartość jakichkolwiek innych parametrów układu, (w tym  $Q_B$ ), tylko

$Q_{TS} \approx 0,4$  pozwala realizować płaską charakterystykę przetwarzania. Jest to sytuacja odmienna, niż w przypadku obudowy zamkniętej, gdzie praktycznie zawsze (o ile głośnik nie ma ekstremalnie wysokich wartości  $Q_{TS}$  lub  $V_{AS}$ ) można uzyskać charakterystykę płaską (dla  $Q_{TC} \approx 0,7$ ).

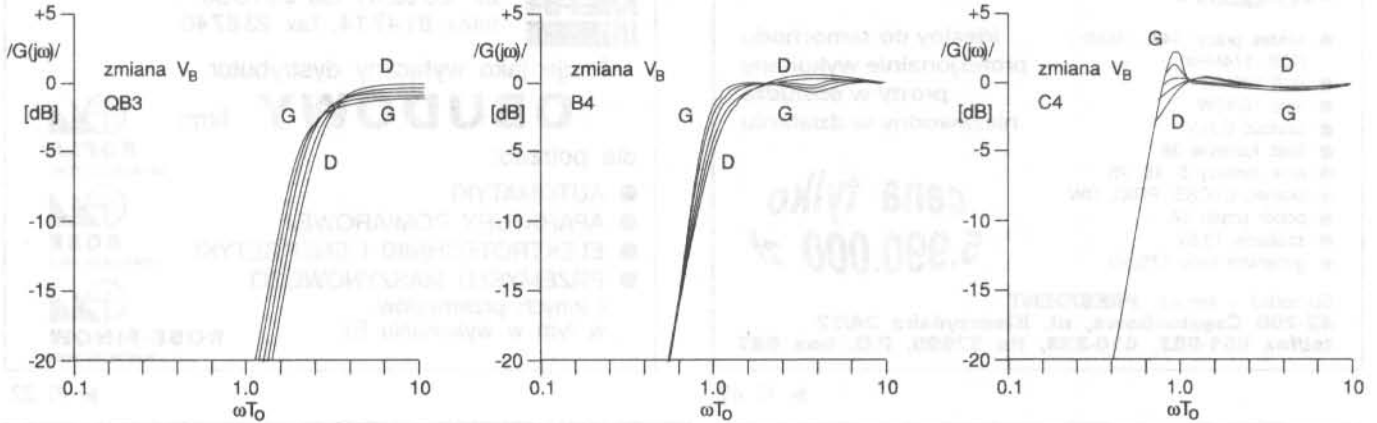
Kolejny wniosek z rysunku to konieczność ograniczenia możliwych wartości  $Q_{TS}$  stosowanego głośnika do niższych od 0,6. Już wartości większe od 0,4 wymuszają dużą objętość obudowy, większą od objętości ekwiwalentnej ( $\alpha < 1$ ), co przy zastosowaniu dużych głośników o wysokich wartościach  $V_{AS}$  jest trudne do zaakceptowania. Łącząc założenia przedstawionej metody z praktycznym działaniem należy przyjąć, że do użycia w obudowach z otworem nadają się głośniki o małej i średniej wielkości o wartościach  $Q_{TS} < 0,5$ , duże głośniki o wartościach  $Q_{TS} \leq 0,4$ . Ten kolejny warunek znacząco różni się od warunku dopuszczalności użycia głośnika w obudowie zamkniętej, gdzie wartości  $Q_{TS}$  mogą być wyższe. Poza wskazaną wartość 0,4 jako jedyną odpowiednią dla otrzymania charakterystyki płaskiej, wartość znacznie niższa nie tylko wiąże się z inną charakterystyką, ale znacznie zwiększa wartość  $f_3/f_s$ , a więc przy określonej częstotliwości



Rys. 5. Wpływ zmiany  $Q_{TS}$  na charakterystyki częstotliwościowe QB3, B4, C4 (2, 3)



Rys. 6. Wpływ zmiany  $f_B$  na charakterystyki częstotliwościowe QB3, B4, C4 (2, 3)



Rys. 7. Wpływ zmiany  $V_B$  na charakterystyki częstotliwościowe QB3, B4, C4 (2, 3)

rezonansowej głośnika zawęża pasmo przetwarzania. Z drugiej strony zwiększa wartość  $\alpha$ , co pozwala stosować obudowę o małej objętości. Sytuacja jest tu odwrotna niż dla wartości  $>0,5$ , które pozwalałyby uzyskać pożądaną niską wartość  $f_B$ , ale przy użyciu bardzo dużej obudowy. Odpowiedni stosunek wielkości  $Q_{TS}$  i  $f_B$ , podobnie jak w przypadku obudowy zamkniętej, ma decydujące znaczenie dla zapewnienia przetwarzania najniższych częstotliwości.

Jak wykazano w poprzednim artykule, przy pracy nad obudową zamkniętą, nawet duże niedokładności w projektowaniu i realizacji nie są niebezpieczne dla poprawności działania układu. Obudowa z otworem jest bardziej wrażliwa na błędy w określeniu rzeczywistych parametrów głośnika ( $f_S, Q_{TS}, V_{AS}$ ) i wyznaczeniu parametrów obudowy ( $f_B, V_B$ ). Tutaj skutkiem kilkunastoprocentowej różnicy w stosunku do prawidłowej wartości parametru mogą być poważne nierównomierności charakterystyki. Na rys. 5...7 przedstawiono wpływ zmian odpowiednio:  $Q_{TS}, f_B, V_B$  na charakterystyki przetwarzania typu C4, B4, QB3. Pięć charakterystyk odpowiada zmianom: -20%, -10%, 0%, +12%, +25%.

Jak widać na rysunkach, wyższa od założonej wartość  $Q_{TS}$  powoduje uwypuklenie charakterystyki w szerokim zakresie powyżej dolnej granicy przetwarzania, niższa - spadek sprawności.

Zmiany  $f_B$  na rysunku najbardziej zakłócają charakterystykę C4, a w najmniejszym stopniu QB3. Zbyt wysoko nastrojony bass-reflex podbija zakres częstotliwości powyżej rezonansu, zbyt nisko - powoduje spadek sprawności przetwarzania przy nieznacznym przesunięciu zbrocza charakterystyki, w kierunku częstotliwości niższych.

Najmniejszy wpływ, choć też zaznaczający się na przebiegu charakterystyki, ma niewłaściwa objętość obudowy. Pozwala to, w razie konieczności na kilkunastoprocentowe zmniejszenie jej wielkości. Prowadzić to będzie do lekkiego uprzywilejowania wyższego zakresu częstotliwości, przy pewnej utracie sprawności przetworzenia tuż powyżej częstotliwości granicznej.

Obudowy typu bass-reflex często oskarża się o złe przenoszenie impulsów. W rzeczywistości zdolność do przetwarzania impulsów wiąże się z kształtem charakterystyki częstotliwościowej. Im bardziej strome jest nachylenie jej zbrocza, tym odpowiedź impulsowa jest gorsza. Dlatego najsłabsze pod tym

względem są układy opisane charakterystyką C4, zwłaszcza o niskich wartościach  $k$ . Charakterystyka B4 ma znacznie lepszą odpowiedź impulsową. Najszybsze są obudowy z otworem związane z charakterystyką QB3 o wysokiej wartości  $B$ . Te ostatnie swoimi właściwościami zbliżają się do charakterystyk impulsowych obudowy zamkniętej. Zależności te wynikają również z dobroci  $Q_{TS}$  głośnika. Wysoka jej wartość wymusza przyjęcie charakterystyki C4. Głośniki z niskim  $Q_{TS}$  pozwalają natomiast zrealizować „szybki” bass-reflex.

Po wyznaczeniu wartości  $f_B$  i  $V_B$  pozostaje zaprojektowanie otworu w obudowie, więc jego powierzchni i długości (tunelu).

$$f_B = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S_v}{L_{VB} V_B}} \quad [3]$$

gdzie:

- C - prędkość dźwięku 344m/s
- $S_v$  - powierzchnia otworu [m<sup>2</sup>]
- $L_{VB}$  - efektywna długość tunelu [m]
- $L_{VB} = L_v + 0,825 \sqrt{S_v}$  [4]
- $L_v$  - długość tunelu [m]

Efektywna długość tunelu jest większa ze względu na współdrgające z masą powietrza w tunelu masy powietrza, przy wlocie i wylocie tunelu.

Powinny być ponadto spełnione następujące warunki:

- długość kanału nie większa niż 1/12 długości fali częstotliwości rezonansowej obudowy, aby układ bass-reflex nie generował „rurowego“ rezonansu samego tunelu:

$$L_{VE} < 29/f_B \quad [5]$$

- odpowiednio duża w stosunku do wychylenia objętościowego głośnika ( $V_D$ ) powierzchnia otworu.

$$V_D = S_D X_{max} \quad [m^2] \quad [6]$$

$S_D$  - powierzchnia membrany [m<sup>2</sup>]  
 $X_{max}$  - maksymalnie liniowe wychylenie membrany [m<sup>2</sup>]

$$S_v > 0,8 f_B V_D \quad [7]$$

Warunek ten ogranicza prędkości przepływu powietrza w tunelu, co zabezpiecza przed powstaniem szumów turbulencyjnych przy dużych amplitudach pracy głośnika

**Andrzej Kisiel**

### Literatura:

- 1) Small R.H., Vented-box Loudspeaker Systems, Part I, J. Audio Eng. Soc. 1973, vol. 21, No 5.
- 2) Keele D.B. Sensitivity of Thiele's Vented Loudspeaker Enclosure Alignments to Parametr Variations, J. Audio Eng. Soc. 1973, vol. 21, No 4.
- 3) Podrez A., Renowski J., Rudno-Rudziński K., Urządzenia głośnikowe, Pr. Nauk. Inst. Telekom. Politech. Wrocław. 1977.