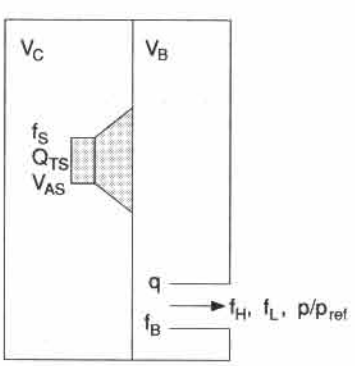
# Obudowy głośnikowe część 6 Obudowa typu band-pass, dokończenie

*W poprzednim artykule (EP 12/94) przedstawiono zasadę działania i różne odmiany obudowy pasmowo-przepustowej (band-pass). Jedną z najpowszechniej stosowanych i najprostszą konstrukcją jest obudowa pasmowo-przepustowa zamknięta. Dokładne teoretyczne zasady projektowania obudowy tego typu zawdzięczamy głównemu inżynierowi firmy KEF, L. R. Finchamowi. Opierają się one na podstawowych, wcześniejszych pracach R. Smalla dotyczących obudów zamkniętych i z otworem. Wykorzystane w poniższych wzorach i obliczeniach parametry głośnika zostały dokładnie opisane w artykułach poświęconych obudowom zamkniętym i z otworem (EP 8, 9, 10/94). W tym miejscu zostały przypomniane tylko w zakresie niezbędnym dla płynnego omówienia procesu projektowania obudowy band-pass.*




Rys. 1. Obudowa pasmowo-przepustowa zamknięta i jej podstawowe parametry

Podstawowe, wykorzystywane w obliczeniach parametry głośnika to:
częstotliwość rezonansowa głośnika niezabudowanego - fs
dobroć całkowita głośnika niezabudowanego - $Q_{TS}$
objętość ekwiwalentna głośnika - $V_{AS}$

Obliczane parametry obudowy to:
objętość komory zamkniętej - Vc
objętość komory z otworem - $V_B$
częstotliwość rezonansowa komory z otworem - $f_B$

Częstotliwość $f_B$ określa środek pasma przepustowego obudowy. Częstotliwości $f_L$ i $f_H$ to częstotliwości graniczne, określone przy spadku - 3dB, położone symetrycznie względem częstotliwości $f_B$
częstotliwość graniczna dolna - $f_L$
częstotliwość graniczna górna - $f_H$
pasmo przenoszenia (w oktawach) - $f_H/f_L$

$$f_L = \frac{f_B}{\sqrt{f_H / f_L}} \quad (1)$$

$$f_H = f_B\sqrt{f_H / f_L} \quad (2)$$

efektywność względna -$p/p_{ref.}$
(gdzie p - efektywność przetwarzania układu w środku pasma przepustowego, $p_{ref}$ - efektywność samego głośnika niskotonowego)
dobroć obudowy pasmowo-przepustowej - q

Parametry pomocnicze, wynikające z powyższych i wzory służące obliczeniom są następujące:

$$\beta = (q/Q_{TS})^2 \quad (3)$$

$$V_B = V_{AS}/\beta \quad (4)$$

$$\alpha = (f_B/f_S)^2 - 1 \quad (5)$$

$$V_C = V_{AS}/\alpha \quad (6)$$

Określeniu pasma przepustowego służy **rysunek 2**, względną efektywność można wyznaczyć posługując się **rysunkiem 3**.

W pierwszym kroku zakładamy dobroć obudowy q. Optymalna wartość q≈0,7, co zapewnia dobre przetworzenie impulsów i płaską charakterystykę w pasmie przepustowym. Dopuszczalne jest przyjęcie q o wartości do 1, co spowoduje lekkie „zapadnięcie" charakterystyki w środku pasma przepustowego, ale pozwala na zastosowanie mniejszej obudowy (mniejsza objętość komory z otworem). Objętość komory $V_B$ określamy ze wzorów (3) i (4).

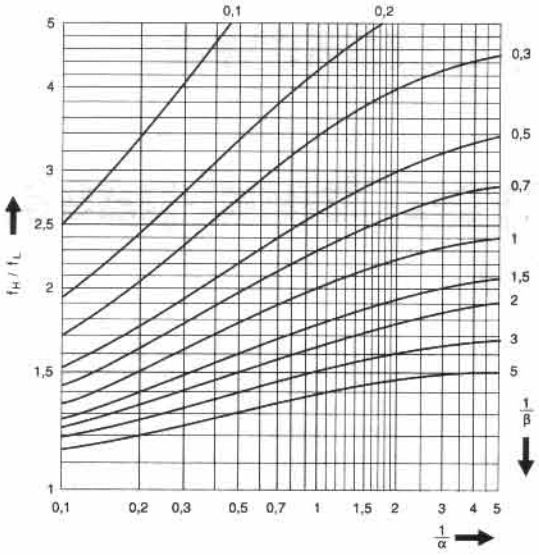
Określamy żądaną częstotliwość środkową pasma przepustowego $f_B$, która powinna być wyższa od częstotliwości $f_S$ (w przeciwnym wypadku efektywność układu będzie bardzo niska). Im wyższą założymy wartość $f_B$, tym mniejszą musimy zbudować obudowę, tym razem ze względu na objętość komory zamkniętej. Objętość komory $V_L$ wyznaczamy ze wzorów (5) i (6). Wykorzystując współczynniki α i β, po określeniu z nomogramu 1 (rys. 2) pasma przepustowego możemy obliczyć częstotliwości graniczne $f_L$ i $f_H$ ze wzorów (1) i (2);

względną efektywność wyznaczamy również przy użyciu współczynników α i β oraz nomogramu 2 (rys. 3).

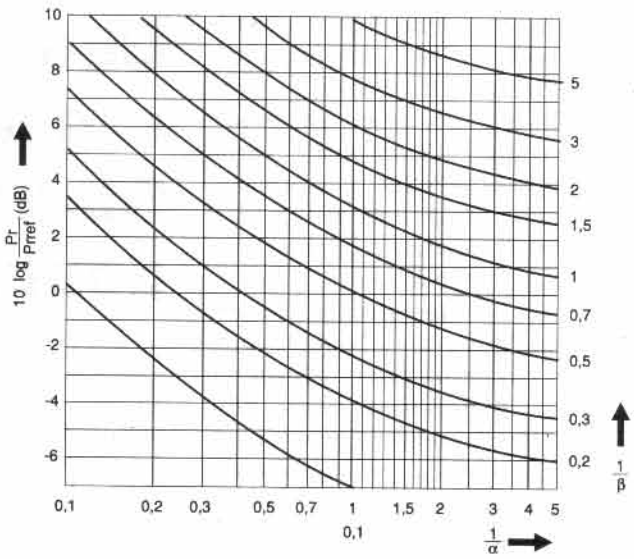
Jak widać, zasady projektowania obudowy typu band-pass nie są tak krytyczne jak w przypadku klasycznej obudowy bass-reflex. Parametry głośnika nie determinują wszystkich parametrów obudowy i nie określają jednoznacznie charakterystyki częstotliwościowej układu. Właściwości głośnika ograniczają zakres możliwych do uzyskania charakterystyk, ale dopuszczalne są różne rozwiązania, w zależności od stawianych wymagań.

Filtrujące działanie obudowy pasmowo-przepustowej teoretycznie zastępuje działanie dolnoprzepustowego filtru elektrycznego, stosowanego zawsze dla ograniczenia pasma przetwarzanego przez głośnik niskotonowy.

Nachylenie zbocza charakterystyki częstotliwościowej, powyżej częstotliwości $f_H$ waha się w granicach 12...18 dB/okt. co wydaje się zupełnie wystarczające. W praktyce filtr elektryczny stosuje się ze względu na pojawiające się już w zakresie zaporowym, 1-2 oktawy poza właściwym zakresem pracy obudowy, szkodliwe rezonanse wynikające z geometrii obudowy i otworu (w zakresie częstotliwości średnich, gdzie długość fali jest porównywalna z ich wymiarami). Stosowany filtr elektryczny nie musi w związku z tym być obliczany na bardzo niską częstotliwość graniczną, pokrywającą się z zakładanym pasmem przepustowym, ale może działać dopiero jedną - dwie oktawy powyżej tego zakresu. W takim przypadku konieczna cewka (lub cewki) filtru nie będzie miała tak dużej wartości indukcyjności i rezystancji, jak w przypadku tylko elektrycznego filtrowania przy bardzo niskich częstotliwościach. Jest to duża




Rys. 2. Szerekość pasma przepustowego $f_H/f_L$




Rys. 3. Efektywność względna $p/p_{ref}$

zaleta obudowy pasmowo-przepustowej. Do przykładu projektowania obudowy typu band-pass ponownie wykorzystany zostanie głośnik GDN 30/80, znany z odcinka poświęconego obudowie bass-reflex. Przypominamy jego podstawowe parametry:

$f_S$ = 25Hz
$Q_{TS}$ = 0,24
$V_{AS}$ = 270dm³

Po uwzględnieniu rezystancji cewki filtru o dopuszczalnej wartości do 1Ω, skorygowana wartość dobroci całkowitej głośnika $Q'_{TS}$ = 0,27 (obliczenia w EP 11/94).

Poniżej zostaną przeprowadzone obliczenia i porównane wyniki czterech rozwiązań, kombinacji różnych zakładanych wartości dobroci obudowy q i częstotliwości środkowej pasma $f_B$.

1. Przyjęcie założenia q = 0,7 zapewnia najlepsze charakterystyki impulsowe i maksymalnie płaską charakterystykę częstotliwościową. Przy $f_B$ = 50Hz można oczekiwać uzyskania bardzo niskiej częstotliwości $f_L$.

$\beta = (07/027)^2 = 6,72$
$V_B = 270/6,72 = 40dm^3$
$\alpha = (50/25)^2 - 1 = 3$
$V_C = 270/3 = 90dm^3$

Objętość komory z otworem wynosi 40dm³, zamkniętej 90dm³. W praktyce, objętość komory zamkniętej, po jej całkowitym wypełnieniu materiałem tłumiącym, zgodnie z regułami dotyczącymi obudów zamkniętych, może zostać zredukowana nawet o 30%, przy zachowaniu wszystkich parametrów elektroakustycznych układu:

$V'_C = 63dm^3$

Dla określenia pasma przepustowego korzystamy z nomogramu 1 (1/α = 0,33, 1/β = 0,15)

$f_H/f_L \approx 3,4$

i następnie obliczamy

$f_L = 50/\sqrt{3,4} = 27Hz$

$f_H = 50\sqrt{3,4} = 92Hz$

Względna efektywność wyznaczona z nomogramu 2, wyrażona w decybelach:

$p/p_{ref} \approx -2,2dB$

Uzyskane wyniki są bardzo obiecujące, zapewniają znacznie lepsze przetwarzanie najniższych częstotliwości ($f_L$ = 27Hz), niż w przypadku zastosowania obudowy bass-reflex, gdzie przy objętości 75dm³ uzyskujemy dolną częstotliwość graniczną (-3dB) 45Hz (EP 11/94). Okupione jest to stratą efektywności ok 2,2dB i wymaga o ok. 35% większej obudowy (suma objętości obydwu komór wynosi 103dm³). Niska górna częstotliwość graniczna $f_H$ = 92Hz predestynuje to rozwiązanie do zastosowań w ramach bardzo dobrego systemu subniskotonowego, uzupełniającego pracę małych zespołów głośnikowych o nie dość zadowalającym przetwarzaniu basów. Zastosowanie w przypadku typowego zespołu głośnikowego wymagać będzie użycia w roli głośnika średniotonowego dużego (16cm) głośnika niskośredniotonowego o odpowiednich parametrach (dość niskie $f_S$ i $Q_{TS}$).

2. Zwiększając częstotliwość $f_B$ do 70Hz, zmniejszamy objętość komory zamkniętej:

$\alpha = (70/25)^2 - 1 = 6,84$
$V_C = 270/6,84 = 39,5dm^3$

a po wytłumieniu:

$V'_C = 27,5dm^3$

Wielkość komory z otworem pozostaje nie zmieniona: $V_B = 40dm^3$.

Pasmo przepustowe i częstotliwości graniczne wynoszą odpowiednio 1/α = 0,15, 1/β = 0,15:

$f_H/f_L \approx 2,5$
$f_L$ = 44Hz
$f_H$ = 111Hz

Względna efektywność:

$p/p_{ref} \approx +0,5dB$

Jak widać, znacznie spadła zdolność przetwarzania najniższych częstotliwości, wzrosła w mniejszym stopniu górna częstotliwość graniczna, natomiast istotnie zwiększyła się efektywność - o prawie 3dB, do daje dwukrotną różnicę w natężeniu dźwięku. Warto znowu porównać te wyniki z obliczeniami obudowy bass-reflex. Częstotliwość trzy-decybelowego spadku jest prawie taka sama, przy wyższej o 0,5dB efektywności i mniejszej o ok. 10% objętości układu band-pass.

3. Dążąc do zaprojektowania obudowy o jeszcze mniejszej objętości całkowitej, a nie chcąc dalej pogorszyć przetwarzania najniższych częstotliwości, trzeba odstąpić od optymalnej wartości q = 0,7 i zwiększyć ją np. do maksymalnej dopuszczalnej q = 1. W takim przypadku zmniejszamy objętość $V_B$:

$\beta = (1/0,27)^2 = 13,7$
$V_B = 270/13,7 = 20dm^3$

Objętość komory zamkniętej pozostaje nie zmieniona (przy $f_B$ = 70Hz i wytłumieniu wynosi 27,5dm³)

Dalej otrzymujemy (dla 1/α = 0,15, 1/β = 0,07)

$f_H/f_L \approx 3,5$
$f_L$ = 37Hz
$f_H$ = 131Hz
$p/p_{ref} \approx -3dB$

Tym razem układ ponownie pracuje z małą efektywnością, zapewniając za to nawet nieco lepsze niż w poprzednim przypadku przetwarzenie najniższych częstotliwości, rozszerzenie pasma w kierunku częstotliwości wyższych i możliwość zastosowania relatywnie małej objętości (47,5dm³).

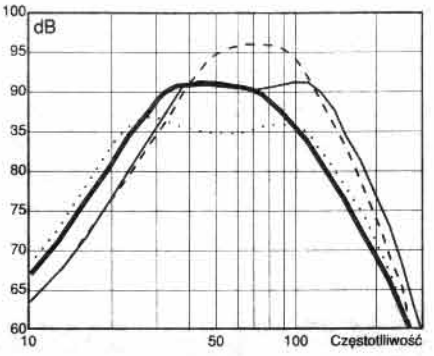
4. Ostatnia obliczona wersja opiera się na założeniu q = 1 i $f_B$ = 50Hz. W takim przypadku $V_B$ = 20dm³, $V_C$ = 63dm³. Parametry są następujące (1/α = 0,33, 1/β = 0,07):

$f_H/f_L \approx 5$
$f_L$ = 22Hz
$f_H$ = 112Hz
$p_r/p_{ref} \approx -5,5dB$

Ten wariant zapewnia bardzo dobre przetwarzanie najniższych częstotliowści, ale przy bardzo niskiej efektywności.

Pożądana relatywna efektywność $p/p_{ref}$ układu zależy od efektywności samego głośnika niskotonowego ($p_{ref}$) i zakładanej efektywności całego zespołu głośnikowego. Użycie głośnika GDN 30/80, o stosunkowo wysokiej efektywności ok. 91dB, pozwala wybrać nawet ostatni „ czwarty wariant, jeśli nie wymagamy od całego zespołu głośnikowego efektywności wyższej od 85dB. Optymalny pod względem wszystkich parametrów elektroakustycznych wydaje się wariant pierwszy, wariant trzeci jest natomiast atrakcyjny ze względu na małą objętość obudowy. Wariant drugi zapewnia przede wszystkim wysoką efektywność, ale najsłabsze przetwarzanie najniższych częstotliwości.

Na **rys. 4** przedstawiono wyniki symulacji komputerowej dla czterech wariantów (kombinacji $q=0,7/f_B=50Hz$, $q=0,7/f_B=70Hz$, $q=1/f_B=70Hz$, $q=1/f_B=50Hz$), dla głośnika o parametrach bardzo podobnych do GDN 30/80. Jak dobrze ilustruje to rysunek, szersze pasmo przetworzenia kombinacji czwartej w stosunku do pierwszej wynika nie z lepszej sprawności przetwarzania najniższych częstotliwości, ale ze spadku efektywności przetwarzania w środku pasma przepus-




Rys. 4. Cztery warianty obudowy band-pass: I
linia ciągła gruba - $q = 0,7/f_B = 50Hz$
linia przerywana - $q = 0,7/f_B = 70Hz$
linia ciągła cienka - $q = 1/f_B = 70Hz$
linia punktowana - $q = 1/f_B = 50Hz$

towego, co zmieniło poziom odniesienia dla określenia częstotliwości granicznych. Podobnie jest w przypadku porównania kombinacji trzeciej i drugiej.

Podczas gdy komora zamknięta może zostać całkowicie wytłumiona, w komorze z otworem powinny zostać wytłumione materiałem o grubości 2-5cm (np. pianka poliuretanowa) tylko same ścianki. Dla żądanej częstotliwości rezonansowej $f_B$, przy określonej średnicy otworu okrągłego $d_V$ i objętości komory $V_B$, długość tunelu $L_V$ można obliczyć ze wzoru (jak dla obudowy bass-reflex):

$$L_V = \frac{23400\, d_V^2}{f_B^2 V_B} - 0,73 d_V$$

Np. dla wariantu pierwszego i średnicy $d_V = 10cm$

$$L_V = \frac{23400 \cdot 10^2}{50^2 \cdot 40} - 0,73 \cdot 10 = 16\,cm$$

W obudowie typu band-pass, ze względu na umieszczenie głośnika (głośników) wewnątrz obudowy, bardzo łatwo i z dużą korzyścią można stosować układ głośników push-pull (dokładny opis w poprzednim artykule). Pozwala to zmniejszyć objętość obydwu komór, a więc całej obudowy, dwukrotnie, co dla typowych zespołów głośnikowych, a szczególnie zespołów sub-niskotonowych jest wielkim plusem. W tym ostatnim przypadku, gdy jeden zespół sub-niskotonowy obsługuje obydwa kanały stereofoniczne, jeden głośnik podłączony jest do zacisków kanału lewego, drugi prawego. Należy przy tym pamiętać o właściwej polaryzacji, zapewniającej współpracę obydwu głośników w zgodnej fazie akustycznej. (EP 12/94).

**Andrzej Kisiel**