

Obudowy głośnikowe

Parametry Thiele'a-Smalla, obudowa zamknięta

Profesjonalne konstruowanie zespołów głośnikowych wymaga bardzo dużej wiedzy technicznej. Jednak budowanie zespołów głośnikowych przez konstruktorów - amatorów o różnym stopniu zaawansowania jest bardzo popularne. W Polsce spowodowały to wieloletnie braki rynkowe w ofercie zespołów głośnikowych. Trochę łatwiejszym zadaniem było zaopatrzenie się w same głośniki firmy TONSIL. Tą drogą powstały konkurencyjne cenowo kopie popularnych Altusów itp., a czasami były to konstrukcje odmienne i bardziej interesujące.

Na całym świecie, a dzisiaj już również w Polsce, przy ogromnym wyborze fabrycznych zespołów głośnikowych, motywacja do podobnego majsterkowania musi być inna zamiłowanie do realizacji własnych, oryginalnych pomysłów.

Projektowanie zespołów głośnikowych daje szerokie możliwości. Zbudowanie zespołów wysokiej klasy jest możliwe przy wysokich kosztach i dużym doświadczeniu, ale zaczynać można od konstrukcji bardzo prostych, w oparciu o tanie głośniki i części oraz znajomość podstawowych praw. Efekt pracy jest zawsze spektakularny - nie ma dwóch zespołów głośnikowych brzmiących tak samo!

Najpowszechniej stosowany rodzaj głośnika - przetwornika elektroakustycznego, nazywany głośnikiem dynamicznym, wytwarza ciśnienie akustyczne po obydwu stronach membrany. Ze względu na przeciwną fazę fal promieniowanych przez każdą ze stron (zagęszczeniu środowiska po jednej stronie towarzyszy rozrzedzenie po stronie przeciwnej), konieczne jest zapobieganie ich wzajemnym interferencjom i znoszeniu się.

Dla doskonałej separacji energii promieniowanych przez obydwie strony membrany wprowadza się teoretyczne pojęcie nieskończenie wielkiej odgrody, której praktyczna realizacja jest niemożliwa. Odgroda o wymiarach skończonych i możliwych do zaakceptowania, przy najniższych częstotliwościach (przy dużych długościach fal) nie zapewnia wystarczającego przesunięcia fazy, wynikającego z różnicy dróg od obydwu stron membrany do ucha słuchacza. Dlatego ta popularna dawniej forma obudowy straciła dzisiaj rację bytu w systemach Hi-Fi, które mają odtwarzać pełen zakres częstotliwości akustycznych.

W przypadku głośników przetwarzających zakres wysokich częstotliwości, sama konstrukcja głośnika zamyka tylną stronę membrany i wytłumia promieniowaną przez nią falę. Dopiero zapewnienie właściwych warunków pracy głośników średniotonowych, a szczególnie niskotonowych, wymaga zastosowania specjalnych zabiegów.

Jak zostanie dalej wykazane, przy zastosowaniu głośnika o dużej średnicy membrany, potrzebnej do wytworzenia odpowiedniego ciśnienia akustycznego, obudowa o bardzo małej objętości nie zapewni właściwych parametrów układu głośnik - obudowa, wymaganych dla prawidłowego przetwarzania najniższych częstotliwości.

Rozwiązanie problemu energii promieniowanej przez tylną stronę membrany może postępować dwoma podstawowymi kierunkami. Po pierwsze, z użyciem obudów - układów akustycznych odwracających w pewnym zakresie fazę fali promieniowanej przez tylną stronę membrany i wypromieniowujących jej energię na zewnątrz. Po drugie, przez zastosowanie obudów tłumiących energię promieniowaną przez tylną stronę membrany. Niektóre konstrukcje łączą obie te metody. Tylko nieliczne eksperymenty zmierzają do eliminacji obudowy głośnika niskotonowego. Wśród współczesnych praktycznych rozwiązań wymienić należy następujące typy obudów:

- zamknięte;
- z otworem (bass-reflex) i ich szczególny przypadek obudowy z membraną bierną;
- typu band - pass;
- labiryntowe - z akustyczną linią transmisyjną;
- tubowe.

Każdy z wymienionych typów może mieć wiele odmian. Rodzaj i parametry możliwej do zastosowania obudowy ściśle wiążą się z parametrami określonego głośnika.

Wszystkie ważne z tego punktu widzenia parametry elektryczne i mechaniczne głośnika (bez obudowy) zostały zintegrowane w parametrach Thiele'a - Smalla;

f_c - częstotliwość rezonansowa

Q_{TS} - dobroć całkowita

V_{AS} - objętość ekwiwalentna

Podstawowy rezonans mechaniczny głośnika jest rezonansem podatności zawiesznień membrany C_{MS} i masy membrany wraz z masą współdrżającą powietrza M_{MS} . Jego częstotliwość jest określona wzorem:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{MS} \cdot M_{MS}}} \quad (1)$$

gdzie f_s oznacza częstotliwość podstawowego rezonansu mechanicznego głośnika niezabudowanego [Hz], C_{MS} - podatność zawiesznień membrany [m/N], M_{MS} - masę membrany wraz z masą współdrżającą [kg].

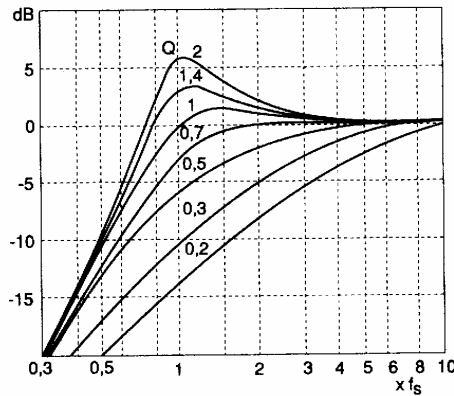
Poniżej częstotliwości rezonansowej spada sprawność przetwarzania energii elektrycznej w akustyczną. Częstotliwościowa charakterystyka przetwarzania w zakresie częstotliwości rezonansowej i poniżej niej (rys. 1), a także zdolność przetwarzania impulsów, zależą od wartości dobroci całkowitej układu rezonansowego głośnika:

$$Q_{TS} = \frac{Q_{MS} \cdot Q_{ES}}{Q_{MS} + Q_{ES}} \quad (2)$$

$$Q_{MS} = \frac{1}{2\pi f_s C_{MS} R_{MS}} \quad (3)$$

$$Q_{ES} = \frac{2\pi f_s M_{MS} R_E}{B_l^2} \quad (4)$$

gdzie Q_{TS} jest dobrocią całkowitą głośnika niezabudowanego, Q_{MS} - dobrocią mechaniczną, Q_{ES} - dobrocią elektryczną, R_{MS} - rezystancją mechaniczną [kg/s], R_E - rezystancją cewki głośnika [Ω], B_l - współczynnikiem siły [N/A].



Rys. 1. Teoretyczne charakterystyki przetwornika dla różnych wartości dobroci Q , przy częstotliwości rezonansowej f_s

Objętość powietrza, której podatność odpowiada podatności zawiesznień przy określonej powierzchni membrany danego głośnika, stanowi o wartości objętości ekwiwalentnej:

$$V_{AS} = \rho_0 \cdot c^2 \cdot S_b \cdot C_{MS} \quad (5)$$

gdzie ρ_0 oznacza gęstość powietrza ($1,18 \text{ kg/m}^3$), c - prędkość dźwięku w powietrzu (345 m/s), S_b - efektywną powierzchnię membrany [m^2], C_{MS} - podatność zawiesznień [m/N].

Wbudowanie głośnika do obudowy zamkniętej powoduje dodatkowe zawieszenie membrany na poduszce powietrznej. Podatność zawiesznień głośnika i podatność powietrza w obudowie dodają się do siebie tak jak pojemności kondensatorów połączonych szeregowo, określając nową podatność układu głośnik - obudowa. Wypadkowa podatność jest więc zawsze niższa od

podatności samego zawieszenia głośnika, co powoduje wzrost częstotliwości rezonansowej określony współczynnikiem α :

$$\alpha = \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V}} \quad (6)$$

gdzie: V - objętość zastosowanej obudowy zamkniętej,

$$f_c = \alpha \cdot Q_{TS} \quad (7)$$

gdzie: f_c - częstotliwość rezonansowa głośnika w obudowie.

Wbudowanie głośnika do obudowy powoduje również zmianę wartości dobroci, gdzie niewielki wpływ ma również - pomijana w tym miejscu - dobroć samej obudowy zamkniętej:

$$Q_{TC} = \alpha \cdot Q_{TS} \quad (8)$$

gdzie: Q_{TC} - dobroć całkowita głośnika w obudowie zamkniętej.

Dobre odtworzenie impulsów uzyskuje się przy dobroci mniejszej od 0,7; również charakterystyki częstotliwościowe dla $Q_{TC} > 0,7$ są nierównomierne, wraz ze wzrostem dobroci w coraz większym stopniu uwypuklając zakres częstotliwości rezonansowej (rys. 1).

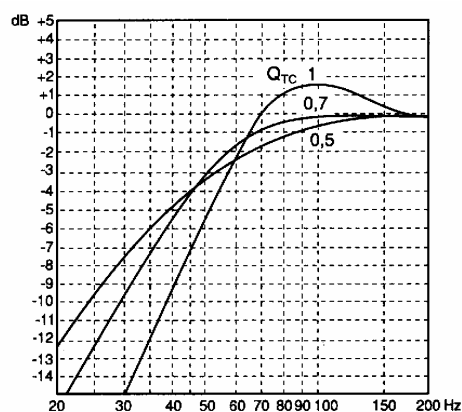
Przykładowe parametry 25 cm głośnika niskotonowego (PEERLESS PT 250M) są następujące:

$$\begin{aligned} f_s &= 28 \text{ Hz} \\ Q_{TS} &= 0,4 \\ V_{AS} &= 160 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

Użycie obudowy zamkniętej o objętości np. 10 dm^3 powoduje wzrost częstotliwości rezonansowej i dobroci do wartości:

$$\begin{aligned} f_c &= 115 \text{ Hz} \\ Q_{TC} &= 1,65 \end{aligned}$$

Są to wartości zdecydowanie zbyt wysokie ze względu na wynikające z nich pasmo przenoszenia, liniowość charakterystyki oraz przetwarzanie impulsów. Z powyższych zależności i przykładu wynika, dlaczego nie można użyć obudowy o małej objętości w przypadku dużych głośników niskotonowych. Dla maksymalnej dopuszczalnej wartości $Q_{TC} = 1$, właściwa objętość obudowy powinna wynosić $V = 30 \text{ dm}^3$, a częstotliwość rezonansowa $f_c = 71 \text{ Hz}$. Dążąc do lepszego przetwarzania impulsów, przy dobroci $Q_{TC} = 0,7$ należy użyć obudowy o objętości ok. 80 dm^3 , uzyskując przy tym częstotliwość rezonansową $f_c = 49 \text{ Hz}$. Dla uzyskania bardzo dobrego odtwarzania impulsów przy dobroci $Q_{TC} = 0,5$ i przy częstotliwości rezonansowej $f_c = 35 \text{ Hz}$ konieczna objętość V wynosi prawie 300 dm^3 . Spadek ciśnienia akustycznego przy f_c wynosi wówczas -6 dB, podczas gdy dla $Q_{TC} = 0,7$ przy f_c wynosi tylko -3dB (rys. 2). Rozwiązanie $Q_{TC} = 0,5$ charakteryzuje się lepszym przetwarzaniem impulsów i samego krańca pasma akustycznego, ale w szerokim zakresie niskich częstotliwości wartość $Q_{TC} = 0,7$, nawet przy relatywnie wyższej wartości f_c , zapewnia wypromieniowanie większej mocy akustycznej. Łagodny spadek charakterystyki przy $Q_{TC} = 0,5$ z kolei łatwiej poddać korekcji elektrycznej, wyrównując jej przebieg i rozszerzając pasmo przenoszenia aż do skraju pasma akustycznego. Również wpływ akustycznych odgród w pomieszczeniu odsłuchowym (podłoga, ściany), zwiększając reaktancję promieniowania głośnika, powoduje zwiększenie natężenia dźwięku w zakresie niskich częstotliwości - w przypadku $Q_{TC} = 0,5$ bez uwypuklania częstotliwości rezonansowej. W praktyce realizację wartości $Q_{TC} = 0,5$ spotyka się rzadko ze względu na konieczność użycia relatywnie dużej obudowy w stosunku do założenia $Q_{TC} = 0,7$.



Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki głośnika PEERLESS PT 250 w obudowach o objętości:

30 dm³ ($Q_{TC} = 1$, $f_c = 71$ Hz)
 78 dm³ ($Q_{TC} = 0,7$, $f_c = 49$ Hz)
 290 dm³ ($Q_{TC} = 0,5$, $f_c = 35$ Hz)

Integralną częścią obudowy zamkniętej jest jej wypełnienie materiałem tłumiącym. Zapobiega ono w dużym stopniu szkodliwym rezansom - nie dopuszcza do powstawania fal stojących między naprzeciwległymi (najczęściej równoległymi) ściankami wewnątrz obudowy, osłabia drgania samej konstrukcji. Dzięki niższej prędkości dźwięku w materiale tłumiącym pozwala zastosować obudowę do kilkunastu procent mniejszą. Głośnik niskotonowy, przeznaczony do obudowy zamkniętej, powinien mieć zarówno jak najniższe wartości Q_{TS} , f_s i V_{AS} , jak również odpowiednią proporcję f_s/Q_{TS} . Wysoka wartość f_s w stosunku do Q_{TS} prowadziłaby do zbyt wysokiej wartości f_c przy optymalnej wartości Q_{TC} , zwłaszcza przy założeniu $Q_{TC} = 0,7$.

Tabela. 1. Parametry T-S przykładowych głośników firmy PEERLESS różnych wielkości i uzyskane wartości f_c i objętość V dla założonych wartości Q_{TC}

Typ głośnika	$Q_{TC}=0,5$	$Q_{TC}=0,7$	$Q_{TC}=1$
S_D [cm ²] f_s [Hz] Q_{TS} V_{AS} [dm ³]	V [dm ³] f_c [Hz]	V [dm ³] f_c [Hz]	V [dm ³] f_c [Hz]
PT 130L 85 55 0,43 11	31 ¹⁾ 64	6,5 90	2,5 128
PT 165L 130 51 0,65 19	2) 	120 ¹⁾ 55	14 78
CC 220 225 25 0,45 87	2) 	61 39	2? 56
PT 250M 310 28 0,4 161	290 ¹⁾ 35	78 49	30 71
CCX 315 520 24 0,44 210	700 27	140 38	50 55

1) W odniesieniu do wielkości głośnika wielkość obudowy w praktyce zbyt duża

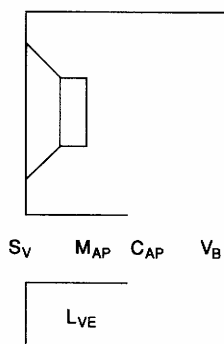
2) Warunek $Q_{TC} = 0,5$ niemożliwy do spełnienia ($Q_{TS} > 0,5$)

W **tabeli 1** przedstawiono typowe, przykładowe parametry T-S dla głośników o różnych wielkościach przeznaczonych do obudów zamkniętych, a także częstotliwości f_c i objętości V (obudowa niewytlumiona) dla założonych wartości Q_{TC} .

Obudowa zamknięta jest najprostszą praktyczną realizacją idei eliminacji energii promieniowanej przez tylną stronę membrany. Jest również łatwa w zaprojektowaniu. Przyjęcie założenia np. $0,5 < Q_{TC} < 0,7$ wyznacza bardzo duży zakres objętości obudowy możliwej do użycia. Duża tolerancja, jeśli chodzi o ten najistotniejszy konstrukcyjny parametr, zachęca konstruktorów – amatorów do projektowania i budowy tego typu obudów. Obudowa zamknięta jest „najbezpieczniejszym” rozwiązaniem zwłaszcza wtedy, gdy nie są znane dokładnie wartości parametrów T-S. Prawdopodobieństwo wykroczenia poza graniczne dopuszczalne wartości Q_{TC} jest niewielkie.

Podstawową wadą obudowy zamkniętej, będącą cechą samej koncepcji, jest niewykorzystanie energii tylnej strony membrany. Dlatego obecnie dominującą konstrukcją firm głośnikowych jest wytwarzająca część tej energii obudowa z otworem. Zaprojektowanie takiej obudowy jest znacznie trudniejsze, a wymagania stawiane używanemu głośnikowi niskotonowemu surowsze [1].

Obudowa bass-reflex



Rys. 3. Układ rezonansowy obudowy z otworem

CAP – podatność powietrza w obudowie

MAP – masa powietrza w otworze

VB – objętość obudowy

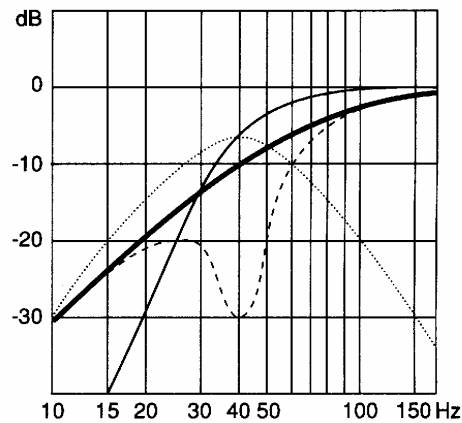
SV – powierzchnia otworu

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. 3).

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. 4).



Rys. 4. 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)

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 zawieszonego). 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.

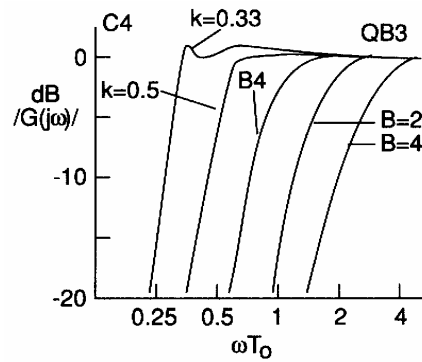
Projektowanie

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-maksymalnie 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 nierówno-mierność charakterystyki, zwiększanie B zmniejsza jej stromość (rys. 5).



Rys. 5. 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

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^3]

Parametry wiążące głośnik z obudową to:

$$\alpha = \frac{V_{AS}}{V_B} \quad (9)$$

gdzie V_B – objętość obudowy z otworem [m^3]

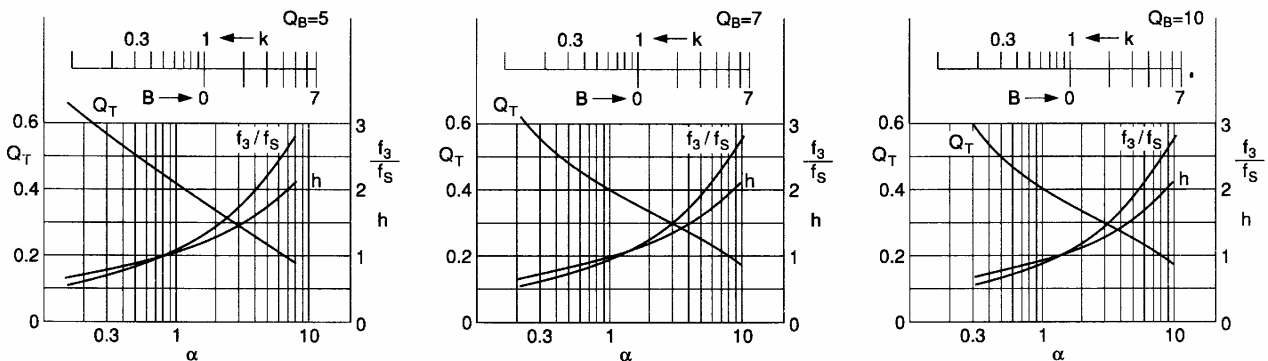
$$h = \frac{f_B}{f_s} \quad (10)$$

gdzie f_B – częstotliwość rezonansowa obudowy z otworem [Hz]

Poprzednio określono współczynnik $\alpha = \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}}$. Teraz zmieniono oznaczenie, zgodnie z

przyjętym powszechnie w literaturze, gdzie $\alpha = \frac{V_{AS}}{V_C}$ lub $\alpha = \frac{V_{AS}}{V_B}$ (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 nieszczelności i tarcia powietrza w otworze. Zawiera się najczęściej w przedziale 5...10 (dla obudowy bezstratnej $Q_B = \infty$)



Rys. 6. Wykresy parametrów układu obudowy z otworem dla trzech wartości dobroci $Q_B = 5, 7, 10$

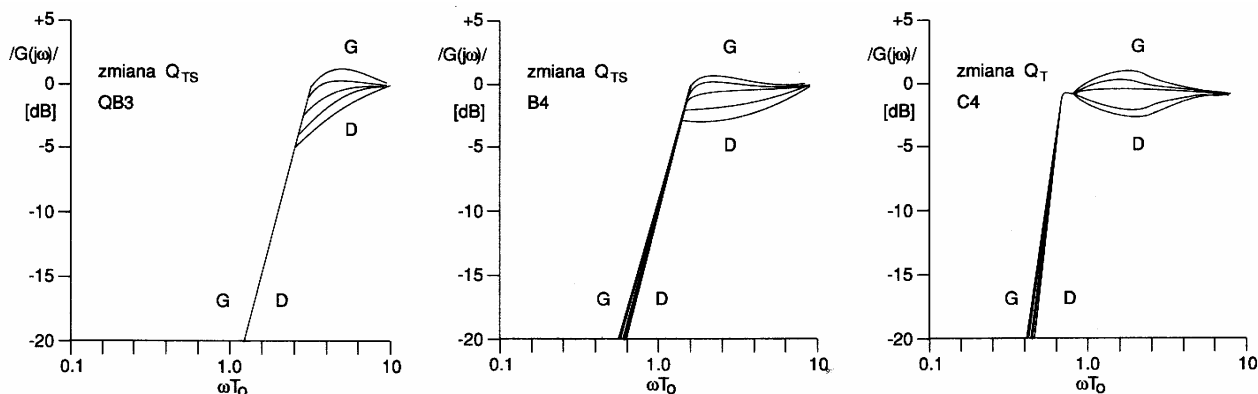
Wyniki analizy działania obudów z otworem zilustrowano na rys. 6. Przedstawiono na nim wykresy parametrów układu dla $Q_B = 5, 7, 10$. Dodatkowo przedstawiono wykres funkcji f_3/f_s , pozwalającej określić uzyskiwaną częstotliwość 3dB spadku sprawności przetwarzania (f_3).

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 $Q_{TS}=0,4$ 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 $Q_{TC}=0,7$).

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 wartością 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 rezonansowej głośnika zawęża pasmo przetwarzania. Z drugiej strony zwiększa wartość α , co pozwala stosować obudowę o małej objętości. Sytuacja jest tu odwrotna niż dla wartości $> 0,5$, które pozwalałyby uzyskać pożądaną niską wartość f_3 , ale przy użyciu bardzo dużej obudowy. Odpowiedni stosunek wielkości Q_{TS} i f_s , podobnie jak w przypadku obudowy zamkniętej, ma decydujące znaczenie dla zapewnienia przetwarzania najniższych częstotliwości.

Jak wykazano poprzednio, 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. 7 – 8 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%.



Rys. 7. Wpływ zmian Q_{TS} na charakterystyki częstotliwościowe QB3, B4 i C4

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 zbocza 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 zbocza, 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).

$$f_B = \frac{C}{2\pi} \sqrt{\frac{S_V}{L_{VE} V_B}} \quad (11)$$

gdzie:

C – prędkość dźwięku 344 m/s

S_V – powierzchnia otworu [m^2]

L_{VE} – efektywna długość tunelu [m]

$$L_{VE} = L_V + 0,825\sqrt{S_V} \quad (12)$$

L_V – długość tunelu [m]

Efektywna długość tunelu jest większa ze względu na współdrżące 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:

$$L_{VE} < \frac{29}{f_B} \quad (13)$$

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

$$V_D = S_D \cdot X_{max} [m^2] \quad (14)$$

S_D – powierzchnia membrany [m^2]

X_{max} - maksymalnie liniowe wychylenie membrany [m^2]

$$S_V > 0,8 \cdot f_B V_D \quad (15)$$

Warunek ten ogranicza prędkości przepływu powietrza w tunelu, co zabezpiecza przed powstaniem szumów turbulencyjnych przy dużych amplitudach pracy głośnika [2].

Projektowanie według Bullocka i Hoge'a

W poprzedniej części przedstawiono podstawy projektowania obudowy z otworem (bass-reflex) według prac R. Smalla. Stwierdzono, że parametry głośnika determinują wszystkie parametry obudowy, konstruowanej zgodnie z założeniami metody, opierającej się na teoretycznych charakterystykach częstotliwościowych typu C4, B4 i QB3. Jak wykazano, kilkunastoprocentowy błąd w wyznaczeniu któregoś z parametrów głośnika lub obudowy może w poważnym stopniu zniekształcić pożądaną charakterystykę częstotliwościową. Kolejni badacze właściwości obudów głośnikowych, wykorzystując podstawy stworzone przez R. Smalla opracowali inne modele teoretyczne, wychodzące poza schemat trzech powyższych charakterystyk.

Podana poniżej metoda (Bullocka i Hoge'a) jest w swoim rdzeniu bardzo podobna do poprzedniej - jako wyjściowe parametry przyjmuje się: Q_B (dobroć obudowy), Q_{TS} (dobroć całkowitą głośnika niezabudowanego), f_s (częstotliwość rezonansową głośnika niezabudowanego) i V_{AS} (objętość ekwiwalentną).

Określenie wartości parametrów obudowy: f_B (częstotliwości rezonansowej obudowy z otworem), V_B (objętości obudowy) i częstotliwości f_3 (trzydecybelowy spadek) następuje przez użycie formuły:

$$y = x \cdot A \cdot Q_{TS}^B \quad (16)$$

gdzie A i B są stałe dla danej wartości Q_B i danej pary (x, y), która oznacza następujące pary parametrów głośnika i obudowy: (V_{AS} , V_B), (f_s , f_B), (f_s , f_3).

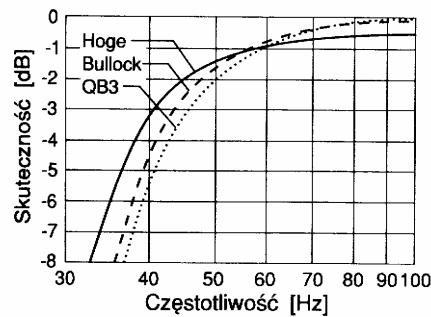
Tabela 2. Wartości współczynników A i B dla różnych par parametrów (x, y)

	X	Y	A	B
BULLOCK, $Q_B = 5$	V_{AS}	V_B	13,5	3,357
	f_s	f_B	0,419	- 0,9721
	f_s	f_3	0,315	-1,323
BULLOCK, $Q_B = 7$	V_{AS}	V_B	17,6	3,153
	f_s	f_B	0,42	-0,953
	f_s	f_3	0,305	-1,33
BULLOCK, $Q_B = 10$	V_{AS}	V_B	14,5	3,019
	f_s	f_B	0,421	-0,933
	f_s	f_3	0,296	-1,335
HOGE, $Q_B = 7$	V_{AS}	V_B	15	2,87
	f_s	f_B	0,42	-0,9
	f_s	f_3	0,26	- 1,4

Jak widać, odpowiednia formuła matematyczna zastępuje użycie nomogramów, a także eliminuje parametry wiążące głośnik z obudową (h i α). Merytoryczna różnica polega jednak na modelowaniu różniących się charakterystyk częstotliwościowych.

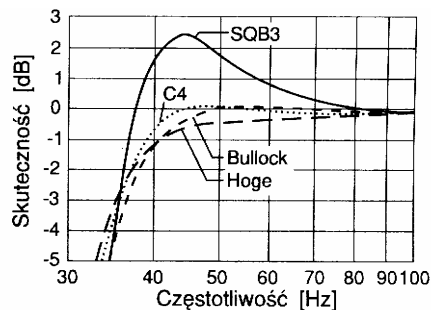
Głośnikom o wysokiej wartości Q_{TS} (powyżej 0,4) przypisana była wg poprzedniego schematu charakterystyka C4. Przy użyciu głośników o niższej wartości Q_{TS} właściwe były charakterystyki QB3 (charakterystyka maksymalnie płaska B4 osiągalna jest tylko przy $Q_{TS} \approx 0,4$). Na rys. 8 i 9 oraz w tab. 3 i 4 przedstawiono wyniki (symulacja komputerowa) użycia obydwu metod dla dwóch różnych głośników o wartościach $Q_{TS} = 0,3$ i $Q_{TS} = 0,5$.

W przypadku użycia głośnika o wartości $Q_{TS} = 0,5$ charakterystyki są bardzo podobne (co wynika ze zbliżonych wartości f_B i V_B). Dla głośnika $Q_{TS} = 0,3$ charakterystyka według Bullocka daje spadek 2Hz częstotliwości f_3 , według Hoge'a częstotliwość f_3 przesuwają się w kierunku częstotliwości niższych aż o 5Hz, kosztem niewielkiego spadku efektywności o 0,5 dB. (Bezwzględne wartości f_3 i ich różnice są oczywiście związane z wartością f_s głośnika). Korzystne obniżenie częstotliwości f_3 jest tutaj spowodowane przede wszystkim wzrostem objętości V_B o kilkanaście (według Bullocka) lub nawet kilkadziesiąt procent (według Hoge'a), czemu w tym ostatnim przypadku towarzyszy obniżenie częstotliwości f_B o kilka procent.



Rodzaj charakterystyki	V_B [dm ³]	f_B [Hz]	f_3 [Hz]
QB3	17,6	39,4	47
BULLOCK	19,7	39,7	45
HOGUE	23,7	37,2	42

Rys. 8, Tabela 3. Charakterystyki typu QB3, Bullocka, Hoge'a i parametry odpowiedniej dla nich obudowy przy parametrach głośnika: $f_s=30\text{Hz}$, $Q_{TS}=0,3$, $V_{AS}=50\text{l}$ i dobroci obudowy $Q_B=7$



Rodzaj charakterystyki	V_B [dm ³]	f_B [Hz]	f_3 [Hz]
C4	38,8	40,2	36
BULLOCK	35,6	40,7	37
HOGUE	36,9	39,2	36
SQB3	60	40,2	36

Rys. 9, Tabela 4. Charakterystyki typu C4, SQB3, Bullocka, Hoge'a i parametry odpowiedniej dla nich obudowy przy parametrach głośnika: $f_s=50\text{Hz}$, $Q_{TS}=0,5$, $V_{AS}=18\text{l}$ i dobroci obudowy $Q_B=7$

Dysponując głośnikiem o niskiej wartości Q_{TS} i możliwością zastosowania obudowy większej niż to wynika z warunków charakterystyki QB3, metoda Bullocka, a zwłaszcza Hoge'a daje lepsze rezultaty. Żadna z nich nie jest za to lepsza od charakterystyki C4 w przypadku głośników o wysokim Q_{TS} .

Na rys. 9 przedstawiono również charakterystykę oznaczoną jako SQB3 (Super-Quasi-Butterworth 3 rzędu). Wyraźne jest kilkudecybelowe uprzywilejowanie zakresu częstotliwości rezonansowej. Charakterystyce o takim kształcie towarzyszą dość złe charakterystyki impulsowe. Jednak efekt taki może być dopuszczalny w przypadku małych i tanich głośników o wystarczająco niskiej częstotliwości rezonansowej f_s , gdy pierwszoplanowym zadaniem konstruktora jest wydobyć jak największą ilość choćby nie najlepszej jakości basu. Charakterystyka ta możliwa jest do uzyskania przy użyciu głośników o wartości $0,4 < Q_{TS} \leq 0,5$ i zastosowaniu dość dużej obudowy. Przybliżony sposób obliczenia parametrów obudowy jest następujący: wielkość V_B powinna spełniać warunek:

$$0,57 \approx Q_{TS} \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_B}} \quad (17)$$

a częstotliwość f_B może być ustalona według monogramu (dla charakterystyki C4), lub według Bullocka. W powyższym przykładzie parametry T-S charakterystyczne dla głośnika o średnicy

12...17 cm wymusiły objętość obudowy 60l. Dla większych głośników, o wyższej wartości V_{AS} osiągnięcie tej charakterystyki wymagałoby stosowania bardzo dużych obudów.

Działanie głośnika w warunkach pomieszczenia zamkniętego

Funkcjonowanie obudowy z otworem, podobnie jak innych typów obudów i rzeczywiste zdolności odtworzenia najniższych częstotliwości w pomieszczeniu zamkniętym zależą od kilku czynników nie uwzględnionych w teorii. Otaczające zespół głośnikowy powierzchnie odbijające (ściany pomieszczenia) zwiększają reaktancję promieniowania (zmniejszają kąt bryłowy, w który promieniowana jest energia, kumulując ją i zwiększając ciśnienie akustyczne). „Wzmacniający” wpływ ścian występuje, gdy długość fali jest większa od odległości do ściany, a więc dotyczy właśnie częstotliwości niskich (od ustawienia zespołów w pomieszczeniu zależy również powstawanie szkodliwych rezonansów, których obliczenie i zapobieganie to już oddzielny temat).

Efektywność przetwarzania niskich częstotliwości zależy także od wzajemnego usytuowania głośnika (głośników) niskotonowego i otworu. Umieszczenie ich blisko siebie (otwór w przedniej ścianie, (najczęściej poniżej głośnika) wzmocni zakres częstotliwości, w którym współpracują (ok. 1-2 oktav powyżej częstotliwości f_B). Umieszczenie otworu z tyłu, często obecnie stosowane, zmniejsza wzajemną reaktancję promieniowania głośnika i otworu, nie pogarszając przetwarzania najniższych częstotliwości (w zakresie f_B) i nie prowadzi do wyeksponowania „średniego” basu (o ile zespół nie stoi zbyt blisko tylnej ściany).

Otwór z tyłu pozwala, zmieniając jego odległość od tylnej ściany, na regulację w pewnym zakresie natężenia niskich częstotliwości.

Zjawiska te powodują znacznie lepsze przetwarzanie niskich częstotliwości niż wynikałoby to z teoretycznych charakterystyk. Poszukując najlepszych rozwiązań układu bass-reflex szczególną uwagę należy zwrócić na charakterystykę QB3 i jej podobne charakterystyki Bullocka i Hoge’a dla głośników o niskiej wartości Q_{TS} . Łagodne opadanie ich zbocza, poddane korygującemu wpływowi pomieszczenia odsłuchowego może dać rezultaty znacznie lepsze od teoretycznie płaskiej B4, czy C4. Pozwala to ponadto uzyskać dobre właściwości impulsowe charakterystyk o małej stromości zbocza.

Wzrost wartości Q_{TS}

Należy także pamiętać o tym, że wartość Q_{ES} ulega w praktyce zmianie (zwiększeniu) na skutek podłączenia szeregowych rezystancji, zwiększając tym samym Q_{TS} .

Niewielka rezystancja wyjściowa wzmacniaczy tranzystorowych może pozostać nieuwzględniona, rezystancja wzmacniaczy lampowych przybiera już wartości znaczące. Największe znaczenie dla konstruktora zespołów głośnikowych ma rezystancja cewek filtrów dolnoprzepustowych dla głośników niskotonowych.

Dla dokładnego określenia nowej wartości Q_{TS} konieczna jest znajomość wartości Q_{MS} i Q_{ES} , z których ta ostatnia musi zostać obliczona na nowo z uwzględnieniem wartości rezystancji szeregowej R_S , według wzoru:

$$Q'_{ES} = Q_{ES} \frac{R_C + R_S}{R_C} \quad (18)$$

Q'_{ES} – dobroć elektryczna po uwzględnieniu rezystancji szeregowej

Q_{ES} – wyjściowa wartość dobroci elektrycznej

R_C – rezystancja cewki głośnika

R_S – rezystancja szeregową

$$Q'_{TS} = \frac{Q'_{ES} Q_{MS}}{Q'_{ES} + Q_{MS}} \quad (19)$$

Q'_{TS} – dobroć całkowita po uwzględnieniu rezystancji szeregowej

Q_{MS} – dobroć mechaniczna

Ponieważ na wartość Q_{TS} w przypadku głośników niskotonowych decydujący wpływ ma Q_{ES} , zatem z dobrym przybliżeniem wartość Q_{TS} można wyznaczyć bezpośrednio:

$$Q'_{TS} = Q_{TS} \frac{R_C + R_S}{R_C} \quad (20)$$

Powyższe względy decydują o tym, że za najlepsze do obudów z otworem uznaje się głośniki o niskiej wartości Q_{TS} . Najlepsze rezultaty osiągnięte będą jednak dopiero wtedy, gdy niskiej wartości Q_{TS} towarzyszyć będzie niska częstotliwość rezonansowa f_s . Zapewni to zarówno najkorzystniejszy kształt charakterystyki, przetwarzanie najniższych częstotliwości i dobre odtwarzanie impulsów. Taka kombinacja parametrów możliwa jest jednak tylko dla dużych głośników niskotonowych. Rozciągnięcie równomiernej charakterystyki do najniższych częstotliwości w przypadku małych głośników wymuszałoby bardzo dużą amplitudę ruchu membrany o małej powierzchni dla uzyskania pożądanego ciśnienia akustycznego.

Szereg ograniczeń konstrukcyjnych powoduje więc, że małe głośniki niskotonowe reprezentują kompromis pomiędzy trudnymi do jednoczesnego spełnienia warunkami - wysokiej mocy dopuszczalnej, wysokiej efektywności, niskiej wartości Q_{TS} i f_s . Jedynie niska wartość V_{AS} , decydująca w dużym stopniu o małej objętości obudowy jest naturalną zaletą małych głośników niskotonowych.

Gdy narzucona jest wielkość obudowy

Jako uzupełnienie metod zakładających dokonanie wyboru głośnika i zaprojektowanie do niego obudowy z otworem, przedstawiono sposób określenia wartości częstotliwości rezonansowej f_B , gdy narzucona jest wielkość obudowy V_B (i oczywiście znane parametry głośnika). Przypadkowa wielkość obudowy nie zapewni najlepszej charakterystyki przetwarzania, ale i w tym wypadku optymalna częstotliwość rezonansowa może być wyznaczona według wzoru:

$$f_B = f_s \cdot \left(\frac{V_{AS}}{V_B} \right)^{0,32} \quad (21)$$

Tabela 5. Parametry T-S głośników niskotonowych OCAL przeznaczonych do zastosowania w obudowach z otworem (przykłady)

Parametr	Typ głośnika, średnica						
	5N411L 13cm	6V415 16,5cm	7V412 18cm	8N515 21cm	10KG17 26cm	12VX 31cm	15VX2 38cm
Powierzchnia membrany [cm ²]	87	125	163	222	360	531	855
f_s [Hz]	45	40	31	29	25	24	20
V_{AS} [dm ³]	14	26	57	87	147	238	718
Q_{TS}	0,35	0,29	0,25	0,24	0,23	0,21	0,21
Q_{ES}	0,42	0,32	0,27	0,26	0,24	0,23	0,24
Q_{MS}	2,03	3,78	2,62	2,41	7,19	1,69	1,71
Efektywność 2,8V/1m [dB]	87	88	89	90	92	93	95

Głośniki do bass-reflexu są najdroższe

Uzyskiwanie niskiej wartości Q_{TS} , najodpowiedniejszej dla obudowy z otworem, wymaga przede wszystkim dużej wartości indukcji w szczelinie (niska wartość Q_{ES}), a więc silnego układu magnetycznego. Duży magnes to najkosztowniejsza część przetwornika, a więc najlepsze głośniki do obudów z otworem są zwykle najdroższe. W tabeli 5 przedstawiono parametry doskonale nadających się do tego celu głośników francuskiej firmy FOCAL o różnych średnicach. Pozwala to na ich porównanie z parametrami głośników przeznaczonych do obudów zamkniętych [3].

Przykłady projektowania obudowy z otworem

Jak wynika z dotychczasowych rozważań, w obudowie z otworem mogą być zastosowane głośniki o niskiej wartości dobroci całkowitej ($Q_{TS} < 0,5$). Jak pokażą to poniższe przykłady, nie wszystkie głośniki spełniające tylko ten warunek zapewniają uzyskanie zadowalających rezultatów; najbardziej pożądana wartość Q_{TS} zależy od innych parametrów głośnika.

Spośród produkowanych przez ZWG Tonsil odpowiednie wydają się dwa duże głośniki niskotonowe, typu GDN 30/80 i GDN 30/100, o średnicy membrany 30 cm. Parametry Thiele'a - Smalla obydwu głośników są następujące:

GDN 30/80:

$$\begin{aligned} f_s &= 25 \text{ Hz} \\ Q_{TS} &= 0,24 \\ V_{AS} &= 270 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

GDN 30/100:

$$\begin{aligned} f_s &= 25 \text{ Hz} \\ Q_{TS} &= 0,37 \\ V_{AS} &= 270 \text{ dm}^3 \end{aligned}$$

Ich konstrukcje różnią się przede wszystkim silniejszym magnesem w głośniku GDN 30/80, czemu zawdzięcza on niższą wartość Q_{TS} .

GDN 30/80

Ponieważ jest to typowy głośnik niskotonowy, którego przetwarzanie powinno być ograniczone do kilkuset Hz, konieczne jest użycie w zwrotnicy elektrycznej dużej cewki filtrującej, łączonej szeregowo z głośnikiem. Odpowiednia cewka, o indukcyjności 5...10 mH, może mieć znaczącą wartość rezystancji 1Ω .

Przy rezystancji cewki głośnika $R_C = 7\Omega$, skorygowana wartość Q_{TS} według wzoru (20) wynosi

$$Q'_{TS} \approx Q_{TS} \cdot \frac{R_C + R_s}{R_C} = 0,24 \cdot \frac{7+1}{7} \approx 0,27$$

Zakłada się, że dobroć obudowy $Q_B = 7$.

Po ustaleniu Q_{TS} i Q_B wszystkie podstawowe parametry obudowy z otworem można odczytać z rys. 6 (według Smalla):

$$\begin{aligned} \alpha &= 3,6 \\ h &= 1,4 \\ f_3/f_s &= 1,8 \\ V_B &= V_{AS}/\alpha = 270/3,6 = 75 \text{ dm}^3 \\ f_B &= h \cdot f_s = 1,4 \cdot 25 = 35 \text{ Hz} \\ f_3 &= 1,8 \cdot 25 = 45 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Dla powierzchni membrany $S_D = 440 \text{ cm}^2$ i maksymalnego zakładanego wychylenia $X_{\max} = 5 \text{ mm}$ wychylenie objętościowe (wg wzoru (14))

$$V_D = S_D \cdot X_{\max} = 220 \text{ cm}^3$$

Zakładając, że otwór będzie okrągły, wzór (15) po przekształceniu określa minimalną średnicę otworu dla uniknięcia generacji szumów:

$$\begin{aligned} d_v &> \sqrt{f_B \cdot V_D} \\ d_v &= \sqrt{35 \cdot 200} = 88 \text{ mm} \end{aligned} \tag{22}$$

Przy średnicy $d_v = 10 \text{ cm}$ wymagana długość tunelu może być wyliczona po przekształceniu wzoru (11) i (12)

$$L_v = \frac{23400 \cdot d_v^2}{f_B^2 \cdot V_B} - 0,73 \cdot d_v = \frac{23400 \cdot 10^2}{35^2 \cdot 75} - 0,73 \cdot 10 = 16 \text{ cm} \tag{23}$$

GDN 30/100

Podobnie jak dla GDN 30/80 i przy uwzględnieniu rezystancji cewki filtru

$$Q'_{TS} = 0,37 \cdot \frac{7+1}{7} \approx 0,42$$

Zakładając $Q_B = 7$, parametry obudowy są następujące (rys. 6):

$$\alpha = 0,9$$

$$\begin{aligned}
 h &= 0,95 \\
 f_3/f_s &= 0,9 \\
 V_B &= 300 \text{ dm}^3 \\
 f_B &= 23,7 \text{ Hz} \\
 f_3 &= 22,5 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Dla średnicy otworu $d_v = 10$ cm długość tunelu L_v (wzór (23)) wynosi 13,2 cm.

Głośnik GDN 30/100 pozwala uzyskać znacznie szersze pasmo przetwarzania (dwukrotnie niższa częstotliwość trzydecybelowego spadku w stosunku do GDN 30/80). Ten doskonały rezultat wiąże się jednak z koniecznością zastosowania bardzo dużej obudowy, czterokrotnie większej niż dla GDN 30/80. Znaczne zmniejszenie obudowy, na przykład dwukrotne, prowadziłoby do osłabienia przetwarzania najniższych częstotliwości, znacznego uwypuklenia zakresu 50-100 Hz oraz pogorszenia właściwości impulsowych, dlatego nie powinno być brane pod uwagę. Dopuszczalne zmniejszenie obudowy w granicach kilkunastu procent nie rozwiązuje problemu jej wielkości. Jak widać z powyższego porównania, w przypadku dużych głośników (o dużej objętości ekwiwalentnej V_{AS}), tylko bardzo niskie wartości Q_{TS} pozwalają uniknąć bardzo dużych objętości obudowy. GDN 30/100 może być z dobrym rezultatem zastosowany w obudowie zamkniętej, jednak nawet taka obudowa dla $Q_{TC} = 0,7$ i częstotliwości $f_C = f_3 = 41$ Hz musi mieć znaczną objętość 120...150 dm³ (w zależności od ilości materiału wytłumiającego).

Kolejny przykład dotyczy dwóch głośników norweskiej firmy SEAS – typy WP171 i W170NP. Są to głośniki nisko-średniotonowe o średnicach 17cm, różniące się w parametrach T-S również tylko wartością Q_{TS} (silniejszy układ magnetyczny posiada WP 171).

WP 171:

$$\begin{aligned}
 f_s &= 40 \text{ Hz} \\
 Q_{TS} &= 0,27 \\
 V_{AS} &= 40 \text{ dm}^3
 \end{aligned}$$

W 170NP:

$$\begin{aligned}
 f_s &= 40 \text{ Hz} \\
 Q_{TS} &= 0,37 \\
 V_{AS} &= 40 \text{ dm}^3
 \end{aligned}$$

Ze względu na to, że stosowana w filtrze dolnoprzepustowym układu dwudroźnego (do jakiego przeznaczone są te głośniki) cewka o małej indukcyjności nie ma dużej rezystancji, jej wpływ można pominąć.

WP 171:

Dla $Q_{TS} = 0,27$ i $Q_B = 7$, po odczytaniu z rys. 6 wartości współczynników α , h i stosunku f_3/f_s obliczone zostały wartości:

$$\begin{aligned}
 V_B &= 11 \text{ dm}^3 \\
 f_B &= 56 \text{ Hz} \\
 f_3 &= 72 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

W 170NP

$$\begin{aligned}
 V_B &= 27 \text{ dm}^3 \\
 f_B &= 44 \text{ Hz} \\
 f_3 &= 48 \text{ Hz}
 \end{aligned}$$

Głośnik WP171, wymagając objętości tylko 11 dm³, pozwala zaprojektować bardzo mały zespół głośnikowy, (tzw. „regałowy”), nie obiecując jednak przetwarzania najniższych częstotliwości. Skonstruowany według takiej recepty zespół głośnikowy powinien wykorzystywać zjawisko wzrostu reaktancji promieniowania powodowanego bliskością ścian; charakterystyka częstotliwościowa, związana z niskimi wartościami Q_{TS} , ma łagodne zbocze, dobrze poddające się takiej akustycznej korekcji. Przetwarzanie niskich częstotliwości może być wtedy zupełnie zadowalające.

Głośnik W170NP musi być zastosowany w większej obudowie, ale objętość 27 dm³ to wielkość małych zespołów wolnostojących, obecnie najpopularniejszych. Przetwarzanie niskich częstotliwości jest znacznie lepsze. Zwraca uwagę, że uzyskana częstotliwość f_3 jest niewiele

wyższa niż w przypadku głośnika GDN 30/80 w obudowie prawie trzykrotnie większej (oczywiście wielkość głośnika GDN 30/80 zapewnia możliwość wytworzenia większych natężeń dźwięku).

Wraz ze zmniejszaniem średnicy głośnika, czemu towarzyszy zmniejszanie V_{AS} , dążenie do jak najniższych wartości Q_{TS} nie jest już tak jednoznacznie korzystne. Relatywnie większa objętość, wymagana dla głośników o nieco wyższej dobroci Q_{TS} , nie jest już wielkością nie do zaakceptowania, a przetwarzanie niższych częstotliwości jest wyraźnie lepsze.

Pewną poprawę przetwarzania najniższych częstotliwości dla głośników o niskich wartościach Q_{TS} można uzyskać projektując obudowę według formuły Hoge'a (wzór (16), tab. 2). Zastosowano ją dla głośnika WP 171 i uzyskano następujące rezultaty:

$$V_B = 15 \cdot V_{AS} \cdot Q_{TS}^{2,87} = 14 \text{ dm}^3$$

$$f_B = 0,42 \cdot f_s \cdot Q_{TS}^{-0,9} = 54,5 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 0,26 \cdot f_s \cdot Q_{TS}^{-1,4} = 65 \text{ Hz}$$

Częstotliwość f_3 obniżyła się o ok. 10%, co wymagało zastosowania obudowy większej o 3 dm^3 .

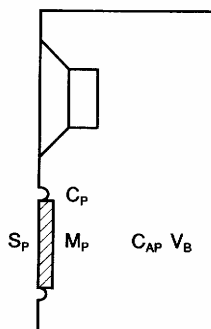
Obudowa z membraną bierną

Przy projektowaniu obudowy z otworem, po określeniu objętości obudowy V_B i częstotliwości rezonansowej f_B wraz ze wzrostem powierzchni zwiększa się wymagana długość tunelu (wzory (11) i (23)). Chociaż zwiększaniu powierzchni otworu towarzyszy proporcjonalny wzrost objętości i masy powietrza w tunelu, to jednak wraz ze wzrostem powierzchni działającej na powietrze w obudowie znacznie silniej spada jego podatność (odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu powierzchni). To właśnie powoduje, że zwiększanie powierzchni otworu prowadzi do wzrostu częstotliwości rezonansowej. Aby otrzymać żadaną wartość częstotliwości rezonansowej należy jeszcze bardziej zwiększyć masę powietrza poprzez wydłużenie tunelu.

Gdy powierzchnia otworu jest większa niż ok. 20% powierzchni membrany głośnika, jego działanie można uznać za efektywne. Gdy jednak wymagane parametry obudowy i ograniczenie długości tunelu (ze względu na głębokość obudowy, która powinna być co najmniej 50% większa od długości tunelu) wymuszają użycie otworu o małej powierzchni, jego działanie nie będzie już dość skuteczne, może nie zostać również spełniony warunek ograniczający prędkość przepływu powietrza w otworze - wzory (15) i (22).

Membrana bierna (jej masa) jest w stanie zastąpić masę powietrza bardzo długiego tunelu pozwalając wielokrotnie zwiększyć powierzchnię drgającą, eliminuje ponadto przekazywanie na zewnątrz wyższych, szkodliwych rezonansów obudowy i samego tunelu, jak to ma miejsce w przypadku obudowy z otworem.

Wymagania stawiane membranie biernej, poza jej odpowiednią masą i podatnością zawiesznień, to przede wszystkim zdolność do dużych wychyleń objętościowych, co najmniej dwukrotnie w stosunku do wychYLENIA objętościowego głośnika. Oznacza to, że przy takiej samej powierzchni membrany biernej i membrany głośnika, ta pierwsza musi znosić dwukrotnie większe amplitudy maksymalne.



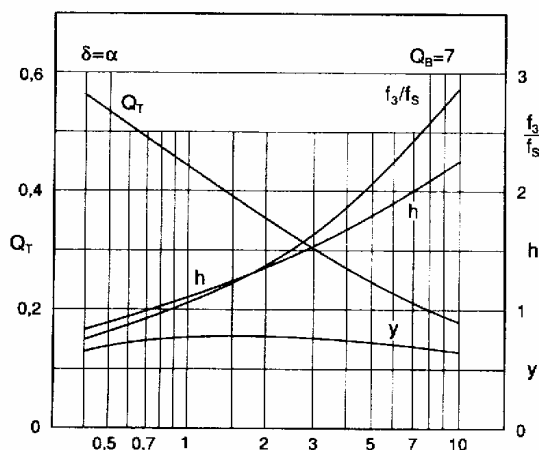
Rys. 10. Układ rezonansowy obudowy z membraną bierną:

C_{AP} – podatność powietrza w obudowie, C_p – podatność zawiesznień membrany biernej,
 V_B – objętość obudowy, S_p – powierzchnia membrany biernej, M_p – masa membrany biernej

Podczas gdy masa powietrza w otworze zawieszona jest tylko na podatności powietrza w obudowie (rys. 10), masa membrany biernej zawieszona jest dodatkowo, jak membrana głośnika, na podatności własnych resorów. Ten dodatkowy element układu (podatność zawieszeń samej membrany) powoduje, że pełna analiza teoretyczna obudowy z membraną bierną jest bardziej skomplikowana niż w przypadku obudowy z otworem.

Upraszcza się ona jednak przy założeniu, że powierzchnia i podatność zawieszeń membrany biernej są takie same jak stosowanego głośnika niskotonowego. W praktyce jest to najczęstsze rozwiązanie. Poniżej przedstawiono sposób projektowania oparty na takim właśnie założeniu.

Podobnie jak w przypadku projektowania obudowy z otworem, konieczna jest znajomość parametrów f_s , Q_{TS} i V_{AS} ; po założeniu dobroci obudowy Q_B określone zostaną wszystkie parametry obudowy.



Rys. 11. Wykresy parametrów układu obudowy z membraną bierną dla $Q_B = 7$ przy założeniu, że podatność i powierzchnia głośnika i membrany biernej są takie same

W przykładzie projektu obudowy z membraną bierną wykorzystano głośnik GDN 30/80 (parametry powyżej). Dla $Q_{TS} = 0,27$ odczytujemy z rysunku 11:

$$\alpha = 3,6$$

$$h = 1,6$$

$$f_3/f_s = 1,8$$

Wykorzystując znane wzory otrzymujemy:

$$V_B = 75 \text{ dm}^3$$

$$f_B = 40 \text{ Hz}$$

$$f_3/f_s = 45 \text{ Hz}$$

Jak widać, wielkość obudowy i trzy-decybelowego spadku charakterystyki amplitudowej są takie same jak dla obudowy z otworem, jedynie częstotliwość dostrojenia membrany biernej powinna być nieco wyższa od strojenia otworu. Aby uzyskać żadaną częstotliwość rezonansową f_B , membrana bierna swobodnie zawieszona (bez podatności powietrza w obudowie) powinna mieć częstotliwość rezonansową f_p , którą można wyliczyć ze wzoru:

$$f_p = y \cdot f_s \quad (24)$$

gdzie

$$y = \frac{h}{\sqrt{\alpha + 1}} \quad (25)$$

(wartość parametru y można również odczytać z rysunku 11)

$$f_p = 0,75 \cdot 25 = 18,6 \text{ Hz}$$

W praktyce, jako membrany biernej używa się kosza i zawiesznień głośnika takiego typu jak zastosowany głośnik niskotonowy. Przy realizacjach amatorskich jako membranę bierną można stosować kompletny głośnik (wraz z układem magnetycznym). Wymaga to odpowiedniego dociążenia membrany w celu obniżenia częstotliwości rezonansowej ($f_p < f_s$).

Znając masę membrany głośnika M_{MS} , można obliczyć żadaną masę membrany biernej M_P , a więc także brakującą różnicę mas:

$$M_P = M_{MS} \cdot \left(\frac{f_s}{f_P} \right)^2 \quad (26)$$

Masa membrany głośnika GDN 30/80 wynosi ok. 50 g.

$$M_P = 50 \cdot (25/18,6)^2 = 90 \text{ g}$$

Do membrany głośnika GDN 30/80, pełniącego rolę membrany biernej, należy dołączyć dodatkową masę 40 g. Używając kompletnego głośnika jako membrany biernej łatwo jest sprawdzić dokładność dociażenia i dostrojenia do częstotliwości f_P , poprzez pomiar charakterystyki impedancji głośnika – membrany biernej swobodnie zawieszonej. Pozwala to, w razie nieznajomości masy membrany głośnika, na ustalenie właściwej częstotliwości f_P metodą kolejnych prób - stopniowego dociażania membrany.

Charakterystyka modułu impedancji głośnika w obudowie z otworem

Znajomość charakterystyki modułu impedancji głośnika w obudowie z otworem służy sprawdzeniu poprawności wykonania obudowy i dokonaniu ewentualnych zmian długości tunelu lub masy membrany biernej.

Na charakterystyce występują dwa maksima (f_L i f_H) oraz leżące między nimi minimum (f_M). Częstotliwość f_M jest bardzo bliska częstotliwości rezonansowej obudowy f_B i dla obudów o dobroci $Q_B > 5$ można przyjąć $f_M \approx f_B$. Jest to podstawowa informacja dla konstruktora zespołu głośnikowego, umożliwiająca zweryfikowanie dostrojenia otworu.

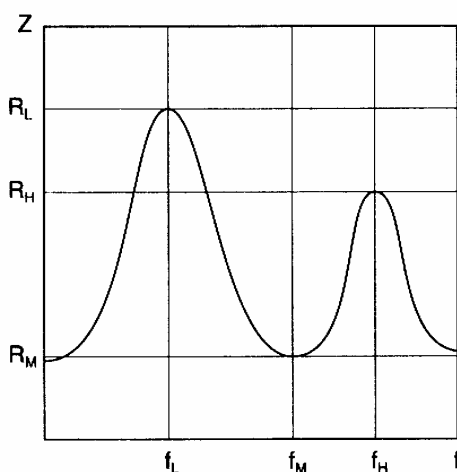
Podczas, gdy

$$h = \frac{f_M}{f_s}$$

współczynnik α można obliczyć znając także częstotliwości f_L i f_H .

$$\alpha = \frac{(f_H^2 - f_M^2)(f_M^2 - f_L^2)}{f_H^2 \cdot f_L^2} \quad (27)$$

Charakterystyka impedancji o dwóch symetrycznych względem minimum maksimach występuje tylko dla $f_B = f_s$. Takie dostrojenie jest właściwe tylko wtedy, gdy $Q_{TS} = 0,4$.



Rys. 12. Przebieg modułu impedancji elektrycznej głośnika w obudowie z otworem

Dla $Q_{TS} > 0,4$; $f_B < f_s$, a położenie minimum impedancji f_M jest bliższe maksimum f_L . Wartość R_L jest w takim przypadku niższa od R_H . Najczęściej, gdy $Q_{TS} < 0,4$; $f_B > f_s$ i wtedy minimum impedancji znajduje się bliżej f_H , $R_L > R_H$ (rysunek 12). W obudowach o $O_B \geq 7$ mamy $R_M \approx R_C$.

Na tym kończymy kilkuodcinkowy wykład podstaw projektowania obudów bass-reflex. Tym Czytelnikom, którzy myślą, że był to cykl artykułów nazbyt teoretycznych jak na profil Elektroniki Praktycznej, przypominamy mądre słowa wielkiego fizyka Boltzmann: „Nie ma rzeczy bardziej praktycznej niż dobra teoria”. Przydatność przedstawionej teorii przetestujemy niebawem w publikacji poświęconej zaprojektowaniu konkretnej obudowy bass-reflex [4].

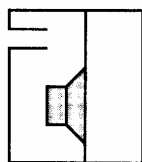
Obudowa typu band-pass

Obudowa pasmowo-przepustowa (band-pass) wykorzystuje zjawisko rezonansu Helmholtza, podobnie jak klasyczna obudowa z otworem. Ta ostatnia pozwala przedniej stronie membrany promieniować bezpośrednio. Konstrukcja obudowy band-pass zamyka obydwie strony głośnika tak, że energia jest wypromieniowywana przez otwór (otwory) obudowy.

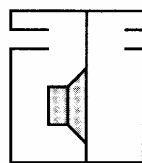
Jak wynika z działania obudowy z otworem [2], energia promieniowana przez tylną stronę membrany jest przekazywana przez otwór na zewnątrz w pewnym ograniczonym zakresie częstotliwości. Powyżej częstotliwości rezonansowej obudowy otwór stopniowo przestaje promieniować i obudowa wytłumia energię wyższych częstotliwości. Sam układ rezonansowy obudowy z otworem ma więc właściwości akustycznego filtra dolnoprzepustowego. Ponieważ sprawność przetwarzania samego głośnika maleje wraz ze spadkiem częstotliwości, energia promieniowana przez tylną stronę membrany i działanie zamykającej ją obudowy z otworem tworzą układ pasmowo-przepustowego filtra akustycznego.



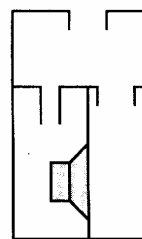
Rys. 13. Obudowa z otworem



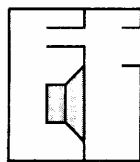
Rys. 14. Obudowa pasmowo-przepustowa zamknięta



Rys. 15. Obudowa pasmowo-przepustowa otwarta



Rys. 16. Obudowa pasmowo-przepustowa z trzecią komorą



Rys. 17. Obudowa pasmowo-przepustowa „szeregową”

W klasycznej obudowie z otworem (rysunek 13) promieniowanie otworu dodaje się jednak do bezpośrednio promieniowanej energii przedniej strony membrany; ograniczenie „od góry” przetwarzanego przez głośnik niskotonowy pasma częstotliwości to rola filtru zwrotnicy elektrycznej zespołu głośnikowego.

Jeżeli energia przedniej strony membrany nie zostanie wypromieniowana, a wytłumiona w obudowie zamkniętej, to cały układ głośnik- obudowa będzie pracował jako pasmowo-przepustowy, nawet bez udziału elektrycznego filtru dolnoprzepustowego. W ten sposób można opisać najprostszą konstrukcję obudowy band-pass, nazywaną obudową zamkniętą pasmowo-przepustową (rysunek 14). „Przednia” i „tylna” strona membrany stają się już tylko określeniami umownymi; można uznać, że „tylna” strona membrany za pośrednictwem obudowy z otworem promieniuje energię na zewnątrz, a energia przedniej strony membrany zostaje wytłumiona. Ustawienie głośnika magnesem w kierunku jednej lub drugiej komory jest praktycznie bez znaczenia.

Można także wykorzystać energię promieniowaną przez drugą stronę membrany; nie tracąc właściwości pasmowo-przepustowych układu - należy zamknąć ją również w komorze z otworem, która będzie pełniła rolę filtru akustycznego (rysunek 15). Jeżeli układ byłby symetryczny - takie same częstotliwości rezonansowe obudów z otworem zamykających obydwie strony głośnika, to na skutek przeciwnych faz promieniowanych ciśnień akustycznych, powstające na zewnątrz ciśnienie akustyczne miałyby wartość zero (podobnie jak w przypadku niezabudowanego głośnika).

Zakres pracy obydwu komór - ich częstotliwości rezonansowe, które wynikają z objętości obudów, powierzchni i długości tuneli muszą być więc różne i starannie dobrane, aby zapewnić równomierną charakterystykę przetwarzania w założonym paśmie przepustowym.

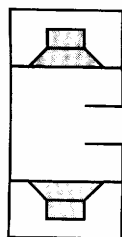
Taki układ dwóch komór z dwoma otworami zastosowano m.in. w zespole głośnikowym Bolero 200, produkowanym przez Tonsil.

Inne, rzadziej stosowane i bardziej skomplikowane odmiany obudowy pasmowo-przepustowej przedstawiono na rysunkach 16 i 17. Układ z rys. 16 zastosowano w zespole sub-niskotonowym popularnego systemu firmy Bose Acoustimas 5. Jak widać, układ z rys. 15 został uzupełniony dodatkową komorą z otworem, filtrującą energię promieniowaną przez otwory obydwu komór zamykających głośnik. Dzięki temu cały układ działa bardziej selektywnie, zwiększając nachylenie spadku charakterystyki przetwarzania powyżej założonej częstotliwości granicznej.

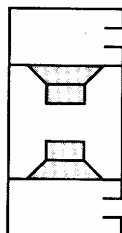
W układzie z rys. 17 komora z otworem wyprowadzonym na zewnątrz filtruje pracę jednej strony membrany i dodatkowo energię promieniowaną przez otwór komory zamykającej drugą stronę.

Wiele konstrukcji, opierając się na przedstawionych powyżej podstawowych odmianach obudowy pasmowo-przepustowej, wykorzystuje więcej niż jeden głośnik niskotonowy.

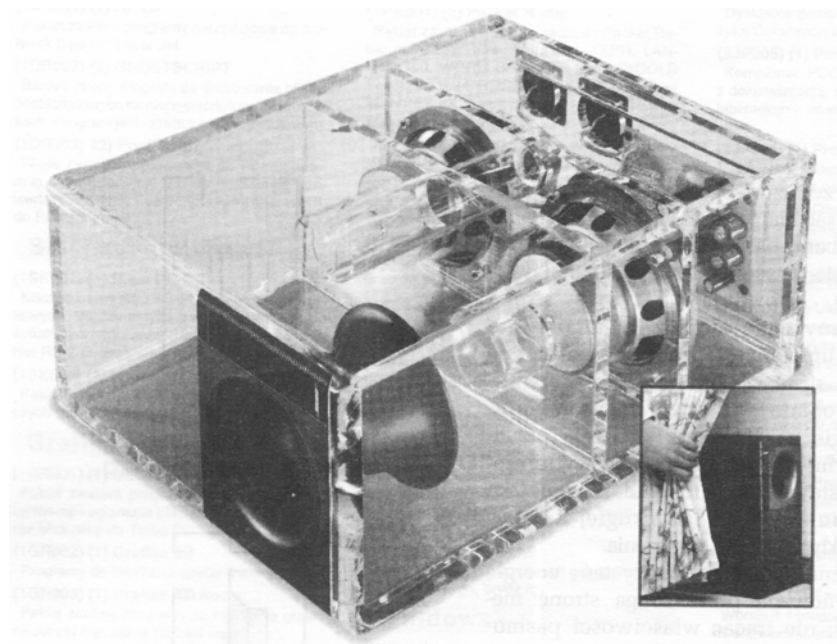
Większość zespołów głośnikowych firmy KEF serii Reference opiera się na układzie według rysunku 18. Jest to rozwinięcie układu z rys. 14, gdzie zastosowano dwa głośniki, promieniujące do wspólnej komory z otworem. Odmienne rozwiązanie zastosowano w zespołach firmy Isophon, gdzie dwa głośniki niskotonowe mają wspólną komorę zamkniętą (rysunek 19). We wspomnianych Bose Acoustimas 5 działają dwa głośniki, umieszczone obok siebie (rysunek 20).



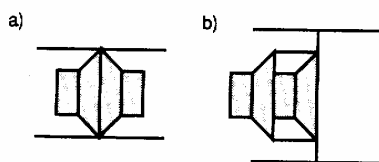
Rys. 18. Obudowa pasmowo-przepustowa zamknięta firmy KEF



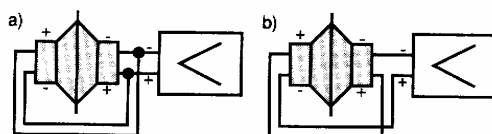
Rys. 19. Obudowa pasmowo-przepustowa firmy Isophon



Rys. 20. Obudowa pasmowo-przepustowa firmy Bose Acoustimas



Rys. 21. Tandem głośników niskotonowych



Rys. 22. Połączenia głośników w tandemie z rys. 21a: a) równoległe, b) szeregowe

W obudowach typu band-pass, zwłaszcza stosowanych w roli specjalnych zespołów subniskotonowych (Subwoofer), występuje często tandem głośników niskotonowych, określany także jako układ push-pull (ang. pchaj-ciągnij).

Układ głośników Push-Pull

Konfiguracja Push-Pull, chociaż spotykana najczęściej w obudowach band-pass, jest rozwiązaniem, które może być stosowane w obudowie dowolnego typu. Dwa głośniki mogą być umieszczone „naprzeciwko” lub „jeden za drugim” (rysunek 21b), co dla teoretycznych rozważań nie ma znaczenia, o ile głośniki są umieszczone blisko siebie. Gdy odległość między głośnikami jest mniejsza od $1/5$ długości fali najwyższych częstotliwości przez nie promieniowanych, wówczas nie występują między nimi niekorzystne zjawiska falowe i przesunięcia fazy; gdy komora sprężająca ma niewielką objętość, masa powietrza przepompowywana między głośnikami jest znacznie mniejsza od masy membrany głośników i może pozostać nieuwzględniona.

W obydwu przypadkach głośniki pracują w zgodnej fazie, nie wytwarzając ciśnienia akustycznego między sobą. Głośniki układu z rysunku 21a należy połączyć „odwrotnie” według oznaczeń biegunów, równolegle lub szeregowo.

Dwa identyczne głośniki, pracujące w układzie push-pull, tworzą jakby nowy głośnik, na którego układ drgający składa się suma mas membran, zawieszona na szeregowo połączonych podatnościach zawiesznień.

Ostatecznie dysponujemy więc głośnikiem o dwa razy większej masie membrany i dwa razy mniejszej podatności zawiesznień. Ponieważ częstotliwość rezonansowa głośnika swobodnie zawieszonego jest określona wzorem

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_{MS}M_{MS}}} \quad (28)$$

(C_{MS} - podatność zawiesznień, M_{MS} - masa membrany), dlatego częstotliwość rezonansowa takiego układu (swobodnie zawieszonego) jest taka sama jak pojedynczego głośnika. Jednak wraz z dwukrotnie mniejszą podatnością, uzyskujemy dwukrotnie niższą wartość objętości ekwiwalentnej V_{AS} . Daje to dużą korzyść praktyczną - pozwala zmniejszyć dwukrotnie objętość obudowy w stosunku do wymaganej dla pojedynczego głośnika.

Przykład

Dysponujemy głośnikiem typu GDN 20/60/3 o następujących parametrach: częstotliwość rezonansowa głośnika niezabudowanego $f_s = 36$ Hz, dobroć całkowita głośnika niezabudowanego $Q_{TS} = 0,45$, objętość ekwiwalentna $V_{AS} = 70$ dm³.

Chcemy go zastosować w obudowie zamkniętej, przy założeniu maksymalnie płaskiej charakterystyki, a więc $Q_{TC} = 0,7$. Możemy użyć jednego lub dwóch głośników. Przypominamy wzory służące obliczaniu obudów zamkniętych:

$$Q_{TC} = Q_{TS} \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}} \quad (29)$$

$$f_C = f_s \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}} \quad (30)$$

gdzie Q_{TC} - dobroć całkowita głośnika w obudowie, f_C - częstotliwość rezonansowa głośnika w obudowie, V_C - objętość obudowy zamkniętej.

Dla $Q_{TC} = 0,7$ częstotliwość trzydecybelowego spadku sprawności przetwarzania $f_3 = f_C$.

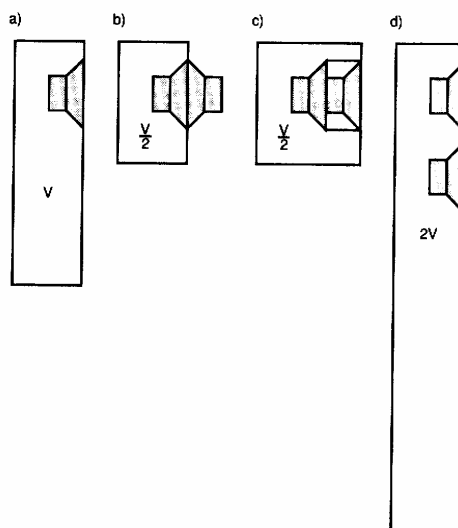
Przypadek 1. Używamy jednego głośnika (rysunek 23a). Konieczna objętość obudowy V_C , wynikająca ze wzoru (29), wynosi 50 dm³. Częstotliwość $f_3 = f_C = 56$ Hz.

Przypadek 2. Używamy dwóch głośników w układzie push-pull (rysunki 23b i 23c).

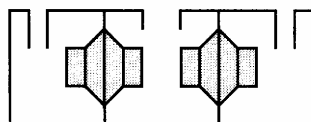
$$V_{AS} = 35 \text{ dm}^3.$$

Konieczna objętość obudowy wynosi 25 dm³, $f_C = f_3 = 56$ Hz

Przypadek 3. Dwa głośniki można użyć w typowy sposób, jednak wówczas wymagana objętość wynosi aż 100 dm³ (rys. 23d).



Rys. 23. Wymagana objętość obudowy przy zastosowaniu: a) jednego głośnika, b) i c) tandemu głośników, d) pary głośników w typowej konfiguracji



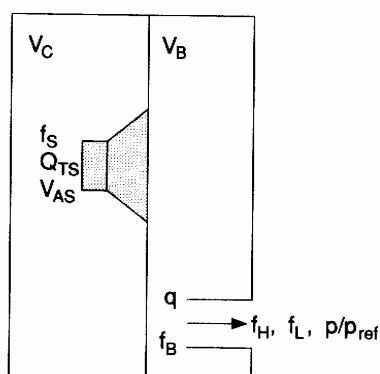
Rys. 24. Schemat subwoofera firmy JBL

Układ push-pull ma jednak pewien minus - jest energetycznie mniej wydajny od pojedynczego głośnika. Np. przez układ dwóch głośników połączonych równolegle płynie dwa razy większy prąd, powodując takie samo wychylenie membrany i wytwarzając takie samo ciśnienie akustyczne co pojedynczy głośnik. Zastosowanie dwóch głośników w sposób tradycyjny, dwukrotnie zwiększając powierzchnię drgającą, zwiększa sprawność przetwarzania. Dlatego układ push-pull stosowany jest wówczas, gdy jednym z głównych celów konstruktora jest ograniczenie wielkości urządzenia głośnikowego, a więc przede wszystkim w przypadku projektowania układów subniskotonowych. Pozwala także na użycie głośników w tradycyjnych zespołach, gdzie pojedynczo stosowane wymagałyby obudowy o trudnej do zaakceptowania wielkości. W poprzedniej części przedstawiono warunki użycia głośnika typu GDN 30/100 w obudowie typu bass-reflex. Z obliczeń wynikała objętość 300 dm^3 . Stosując tandem głośników można już pokusić się o skonstruowanie obudowy o wymaganej w takim przypadku objętości 150 dm^3 .

Zmniejszenie wartości V_{AS} układu głośników push-pull pozwala zmniejszyć objętość każdego rodzaju obudowy, opierającej się na zasadach obudowy zamkniętej lub bass-reflex, a więc także wszystkich odmian obudowy pasmowo-przepustowej. Również we wspomnianych Bolero 200 zastosowano tandem głośników. Na rysunku 24 przedstawiono układ zespołu subniskotonowego dla dwóch kanałów stereofonicznych firmy JBL. Mimo pozornej złożoności, jest to tylko proste rozwinięcie układu z rys. 15

Stosowanie obudów pasmowo-przepustowych upowszechniło się dopiero w ciągu minionych dziesięciu lat, dzięki wykorzystaniu ścisłych analiz pracy obudowy z otworem. Obecnie obudowy tego typu spotyka się nie tylko wśród zespołów sub-niskotonowych. Poza firmą KEF warto wskazać na wiele modeli firmy Jamo, w tym najdroższy model Oriel, w części niskotonowej opierający się na podwójnym systemie zamkniętej obudowy pasmowo-przepustowej. Zespoły firmy Isophon są podobnie skonstruowane, ale komora zamknięta jest wspólna dla obydwu głośników nisko-tonowych, podczas gdy komory z otworami są dwie (odmiennie niż w przypadku zespołów KEF, gdzie wspólna jest komora z otworem) [5].

Przykłady projektowania obudowy pasmowo-przepustowej



Rys. 25. Obudowa pasmowo-przepustowa i jej podstawowe parametry

Podstawowe, wykorzystywane w obliczeniach parametry głośnika to:

- częstotliwość rezonansowa głośnika niezabudowanego – f_s
- dobroć całkowita głośnika niezabudowanego - Q_{TS}
- objętość ekwiwalentna głośnika – V_{AS}

Obliczane parametry obudowy to:

- objętość komory zamkniętej - V_C
- 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 -3 dB, położone symetrycznie względem częstotliwości f_B)
- częstotliwość graniczna dolna – f_L
- częstotliwość graniczna górna - f_H
- pasmo przenoszenia (w oktavach) - f_H/f_L

$$f_L = \frac{f_B}{\sqrt{\frac{f_H}{f_L}}} \quad (31)$$

$$f_H = f_B \sqrt{\frac{f_H}{f_L}} \quad (32)$$

- 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:

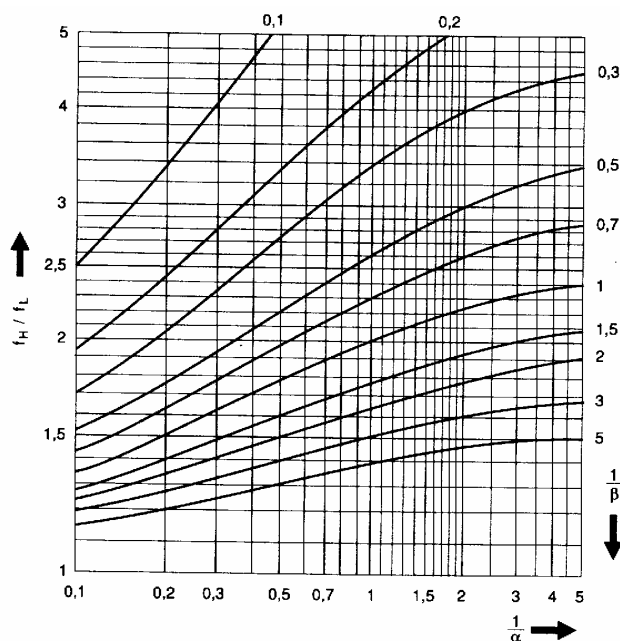
$$\beta = \left(\frac{q}{Q_{TS}} \right)^2 \quad (33)$$

$$V_B = \frac{V_{AS}}{\beta} \quad (34)$$

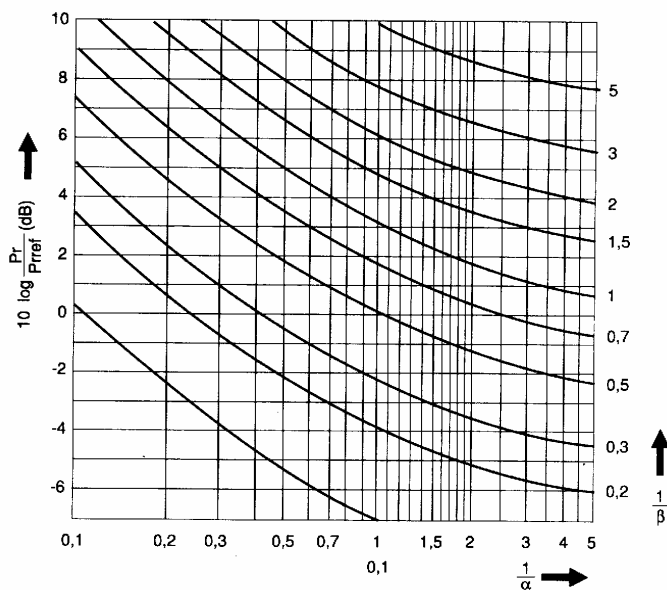
$$\alpha = \left(\frac{f_B}{f_s} \right)^2 - 1 \quad (35)$$

$$V_C = \frac{V_{AS}}{\alpha} \quad (36)$$

Określeniu pasma przepustowego służy rysunek 26, względną efektywność można wyznaczyć posługując się rysunkiem 27.



Rys. 26. Szerokość pasma przepustowego f_H/f_L



Rys. 27. Efektywność względna p/p_{ref}

W pierwszym kroku zakładamy dobroć obudowy q . Optymalna wartość $q \approx 0,7$, co zapewnia dobre przetworzenie impulsów i płaską charakterystykę w paśmie 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 (33) i (34).

Określamy żadaną 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 (35) i (36). Wykorzystując współczynniki α i β , po określeniu z nomogramu 1 (rys. 26) pasma przepustowego możemy obliczyć częstotliwości graniczne f_L i f_H ze wzorów (31) i (32); względną efektywność wyznaczamy również przy użyciu współczynników α i β oraz nomogramu 2 (rys. 27).

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 filtra 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 nitrowania przy bardzo niskich częstotliwościach. Jest to duża 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: $f_s = 25 \text{ Hz}$; $Q_{TS} = 0,24$; $V_{AS} = 270 \text{ dm}^3$.

Po uwzględnieniu rezystancji cewki filtru o dopuszczalnej wartości do 1Ω , skorygowana wartość dobroci całkowitej głośnika $Q'_{TS} = 0,27$ (obliczenia w [4]).

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 $f_B = 50 \text{ Hz}$ można oczekiwać uzyskania bardzo niskiej częstotliwości f_L .

$$\beta = (0,7/0,27)^2 = 6,72$$

$$V_B = 270/6,72 = 40 \text{ dm}^3$$

$$\alpha = (50/25)^2 - 1 = 3$$

$$V_C = 270/3 = 90 \text{ dm}^3$$

Objętość komory z otworem wynosi 40 dm^3 , zamkniętej 90 dm^3 . 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:

$$V'_C = 63 \text{ dm}^3$$

Dla określenia pasma przepustowego korzystamy z nomogramu 1 ($1/\alpha = 0,33$; $1/\beta = 0,15$)

$$f_H/f_L \approx 3,4$$

i następnie obliczamy

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

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

Względna efektywność wyznaczona z nomogramu 2, wyrażona w decybelach:

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

Uzyskane wyniki są bardzo obiecujące, zapewniają znacznie lepsze przetwarzanie najniższych częstotliwości ($f_L = 27 \text{ Hz}$), niż w przypadku zastosowania obudowy bass-reflex, gdzie przy objętości 75 dm^3 uzyskujemy dolną częstotliwość graniczną (-3dB) 45 Hz (patrz [4]). Okupione jest to stratą efektywności ok. 2,2 dB i wymaga o ok. 35% większej obudowy (suma objętości obydwu komór wynosi 103 dm^3). Niska górna częstotliwość graniczna $f_H = 92 \text{ Hz}$ predestynuje to rozwiązanie do zastosowań w ramach bardzo dobrego systemu sub-niskotonowego,

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 (16 cm) głośnika nisko-średniotonowego o odpowiednich parametrach (dość niskie f_s i Q_{TS}).

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

$$\alpha = (70/25)^2 - 1 = 6,84$$

$$V_C = 270/6,84 = 39,5 \text{ dm}^3$$

a po wytłumieniu

$$V'_C = 27,5 \text{ dm}^3$$

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

Pasmo przepustowe i częstotliwości graniczne wynoszą odpowiednio $1/\alpha = 0,15$, $1/\beta = 0,15$:

$$f_H/f_L \approx 2,5$$

$$f_L = 44 \text{ Hz}$$

$$f_H = 111 \text{ Hz}$$

Względna efektywność:

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

Jak widać, znacznie spadła zdolność przetwarzania najniższych częstotliwości, wzrosła w mniejszym stopniu górna częstotliwość graniczna, natomiast istotnie zwiększyła się efektywność - o prawie 3 dB, do daje dwukrotną różnicę w natężeniu dźwięku. Warto znowu porównać te wyniki z obliczeniami obudowy bass-reflex. Częstotliwość trzydecybelowego spadku jest prawie taka sama, przy wyższej o 0,5 dB 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 :

$$\beta = (1/0,27)^2 = 13,7$$

$$V_B = 270/13,7 = 20 \text{ dm}^3$$

Objętość komory zamkniętej pozostaje nie zmieniona (przy $f_B = 70 \text{ Hz}$ i wytłumieniu wynosi $27,5 \text{ dm}^3$).

Dalej otrzymujemy (dla $1/\alpha = 0,15$, $1/\beta = 0,07$)

$$f_H/f_L \approx 3,5$$

$$f_L = 37 \text{ Hz}$$

$$f_H = 131 \text{ Hz}$$

$$p/p_{\text{ref}} \approx -3 \text{ dB}$$

Tym razem układ ponownie pracuje z małą efektywnością, zapewniając za to nawet nieco lepsze niż w poprzednim przypadku przetwarzanie najniższych częstotliwości, rozszerzenie pasma w kierunku częstotliwości wyższych i możliwość zastosowania relatywnie małej objętości ($47,5 \text{ dm}^3$).

4. Ostatnia obliczona wersja opiera się na założeniu $q = 1$ i $f_B = 50 \text{ Hz}$. W takim przypadku $V_B = 20 \text{ dm}^3$, $V_C = 63 \text{ dm}^3$. Parametry są następujące ($1/\alpha = 0,33$, $1/\beta = 0,07$):

$$f_H/f_L \approx 5$$

$$f_L = 22 \text{ Hz}$$

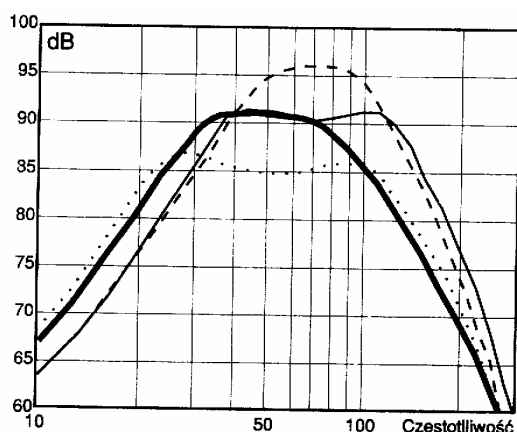
$$f_H = 112 \text{ Hz}$$

$$p_r/p_{\text{ref}} = -5,5 \text{ dB}$$

Ten wariant zapewnia bardzo dobre przetwarzanie najniższych częstotliwości, 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. 91 dB, 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 najslabsze przetwarzanie najniższych częstotliwości.



Rys. 28. Cztery warianty obudowy band-pass:

- linia ciągła gruba – $q=0,7 / f_B=50\text{Hz}$
- linia przerywana – $q=0,7 / f_B=70\text{Hz}$
- linia ciągła cienka – $q=1 / f_B=70\text{Hz}$
- linia punktowana – $q=1 / f_B=50\text{Hz}$

Na rys. 28 przedstawiono wyniki symulacji komputerowej dla czterech wariantów (kombinacji $q=0,7/f_B=50\text{Hz}$, $q=0,7/f_B=70\text{Hz}$, $q=1/f_B=70\text{Hz}$, $q=1/f_B=50\text{Hz}$), 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 przepustowego, 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 – 5 cm (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 o średnicy $d_V = 10 \text{ cm}$:

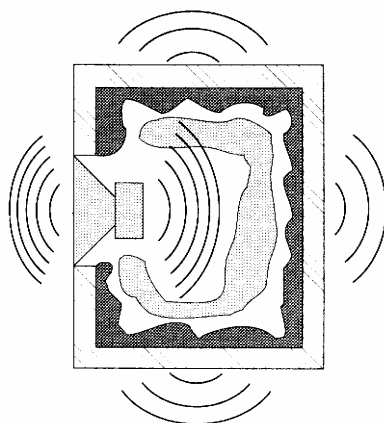
$$L_V = \frac{23400 \cdot 10^2}{50^2 \cdot 40} - 0,73 \cdot 10 = 16 \text{ cm}$$

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 poprzednio). 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 [6].

Linia transmisyjna (obudowa labiryntowa)

„Linia transmisyjna” uznawana jest przez wielu za obudowę stwarzającą najlepsze warunki pracy dla głośnika niskotonowego, a przez to zapewniająca bardzo dobre przetwarzanie niskich częstotliwości, choć tak jak w przypadku każdego innego rodzaju obudowy, możliwości

skuteczność jej działania zależą od właściwości stosowanego głośnika niskotonowego i umiejętności konstruktora.



Rys. 29. Obudowa zamknięta, mimo obecności materiałów wytłumiających i grubych ścianek, nie do końca absorbuje energię promieniowaną przez tylną stronę membrany, co powoduje drgania ścianek i zniekształcenia w przetwarzaniu samego głośnika

Linia transmisyjna jest rzadko spotykanym rozwiązaniem; w jej stosowaniu specjalizuje się niewiele firm. Kilka powodów stoi na przeszkodzie upowszechniania tego rodzaju obudowy.

Obudowy najczęściej spotykane - typu bass-reflex (z otworem) i zamknięte, rozciągają możliwość ich użycia od najmniejszych, już kilkultrowych, do bardzo dużych konstrukcji. Zależy to od typu stosowanego głośnika niskotonowego, i mimo że w dużej mierze determinuje ilość i jakość przetwarzanego basu, to określone parametry i reguły projektowania pozwalają również na tworzenie zespołów bardzo małych.

Zasada działania linii transmisyjnych wymusza konstruowanie obudów relatywnie dużych. Poniżej pewnego pułapu wielkości, bez względu na wielkość i parametry głośnika niskotonowego, obudowa z linią transmisyjną nie ma racji bytu.

Dość duża obudowa nie pozostaje tylko prostą skrzynką. Linia transmisyjna to konstrukcja bardziej skomplikowana, o dużym nakładzie materiałów i pracy. Zawęża to zakres stosowania takich obudów do droższych zespołów głośnikowych.

Przy projektowaniu obudów z otworem, zamkniętych lub pasmowo-przepustowych konstruktor działa przede wszystkim zgodnie ze wzorami, które wraz z parametrami głośnika określają końcowe parametry urządzenia głośnikowego.

Dla linii transmisyjnej nie opracowano ścisłych algorytmów postępowania. Na jej działanie wpływa bardzo dużo zjawisk akustycznych, których opanowanie możliwe jest dzięki doświadczeniu i własnym oryginalnym pomysłom niektórych firm. Proces tworzenia najlepszych konstrukcji jest żmudny i opiera się w wielkiej mierze na metodzie prób i błędów.

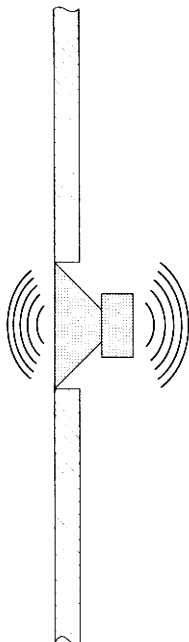
Dla konstruktorów - amatorów droga do skonstruowania udanych zespołów głośnikowych z linią transmisyjną nie jest jednak zamknięta. Trudności, które wymieniano powyżej, są do przewyciężenia, a niektóre z nich mogą być wręcz dodatkową motywacją. Pracochłonna i duża obudowa to dla prawdziwego majsterkowicza wyzwanie, które podejmie z entuzjazmem. Znając zasadę działania, uwzględniając podstawowe założenia i śledząc rozwiązania stosowane przez renomowanych producentów można z dużymi szansami na sukces pokusić się o zbudowanie zespołów głośnikowych, których jakość przetwarzania basów będzie najwyższej próby.

Zasada działania

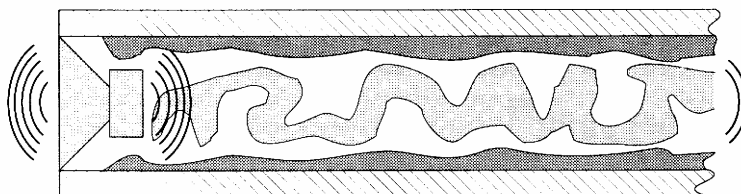
Przedstawienie zasady działania linii transmisyjnej dobrze jest rozpocząć od krótkiego przypomnienia celu stosowania każdego rodzaju obudowy. Jest nim „unieszkodliwienie” promieniowania tylnej strony membrany, będącego w przeciwnej fazie do promieniowania przedniej strony membrany.

Obudowa typu bass-reflex, wykorzystując pewne zjawiska rezonansowe, potrafi wypromieniować energię tylnej strony membrany w fazie zgodnej z promieniowaniem strony przedniej, w pewnym zakresie częstotliwości niskich. Obarczona jest wadami (słabiej lub mocniej zaznaczonymi) pogorszenia właściwości impulsowych i podbarwiania częstotliwości niskich zakresem pracy układu rezonansowego obudowy.

Obudowa zamknięta w prosty sposób tłumi energię promieniowaną przez tylną stronę membrany (rys. 29). Nie czyni tego jednak w sposób doskonały. Ciśnienie powstające wewnątrz obudowy powoduje drgania ścianek, którym nie da się do końca zapobiec nawet bardzo dużą ich grubością i wzmocnieniami konstrukcji. Zamknięcie głośnika w takiej obudowie zmienia także na niekorzyść jego własne parametry. Podatność powietrza w obudowie zamkniętej dodaje się do podatności zawieszon membrany, zmniejszając całkowitą podatność układu drgającego (podatności dodają się tak jak pojemności). Prowadzi to do podwyższenia częstotliwości rezonansowej i dobroci układu rezonansowego głośnika. Skutkiem pierwszego jest ograniczenie przetwarzanego pasma, drugiego pogorszenie charakterystyk impulsowych. Produkowane głośniki niskotonowe są projektowane dla optymalnego zastosowania w określonego typu obudowie, co jednak nie eliminuje wszystkich wad obudowy.



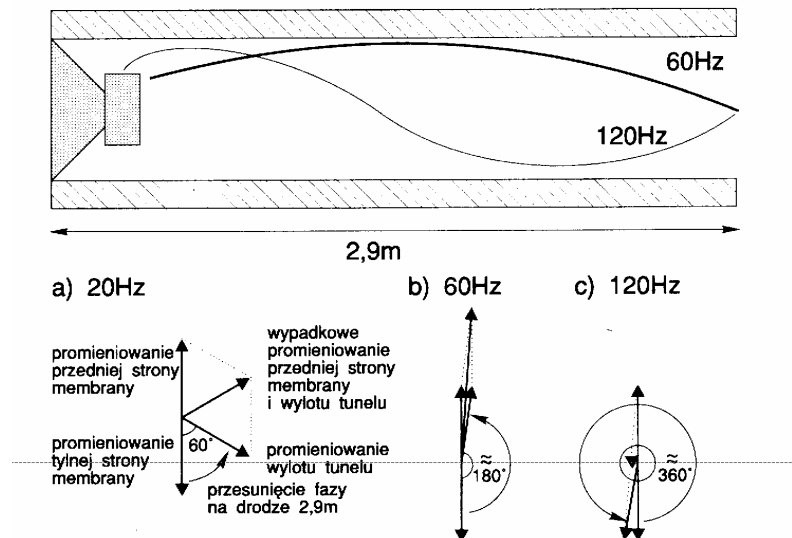
Rys. 30. Nieskończenie wielka odgróda doskonale separująca promieniowanie obydwu stron membrany nie pogarszając parametrów głośnika, ale jest niemożliwa do zrealizowania w praktyce.



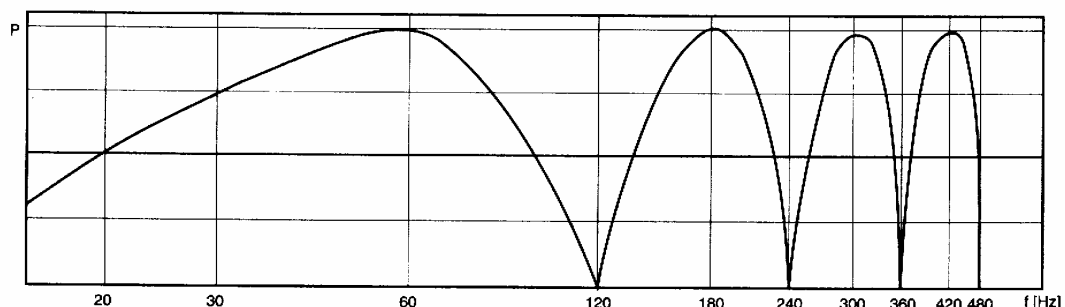
Rys. 31. Bardzo długi tunel, otwarty na końcu, wypełniony materiałem tłumiącym, może zaabsorbować dużą część energii tylnej strony membrany nie pogarszając parametrów głośnika i jest podstawą koncepcji „linii transmisyjnej”

Problem tylnej strony membrany znajduje doskonałe rozwiązanie, ale niestety tylko w teorii. Nieskończenie wielka odgróda, która separuje energię przedniej i tylnej strony membrany, nie zmieniając parametrów głośnika, pozostaje poza możliwością praktycznej realizacji (rys. 30). Linia transmisyjna ma swoim działaniem przypominać funkcjonowanie nieskończenie wielkiej odgródy. Uformowany za głośnikiem długi tunel, wypełniony materiałem tłumiącym, ma za zadanie

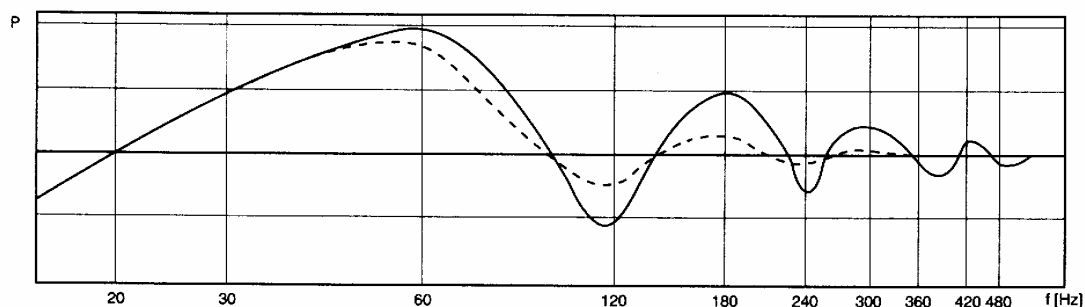
zaabsorbować całość energii promieniowanej przez tylną stronę membrany (rys. 31). Takie są założenia idealnej linii transmisyjnej, które do końca nie są spełnione w praktyce. Tunel nie jest nieskończenie długi i nie jest zdolny wytłumić całej energii tylnej strony membrany. Wylot tunelu promieniuje pewną część energii na zewnątrz. Aby przedstawić znaczenie tego efektu, należy rozważyć zjawiska falowe zachodzące w tunelu o określonej długości. Dla wygody przyjmijmy, że tunel pozostaje nie wytłumiony.



Rys. 32. W tunelu o długości 2,9 m nastąpi przesunięcie fazy fali promieniowanej przez tylną stronę membrany o 60° dla częstotliwości 20 Hz (a), 180° dla 60 Hz (b), 360° dla 120 Hz (c)



Rys. 33. Wypadkowa charakterystyka częstotliwościowa układu przednia strona membrany – wylot tunelu, odniesiona do charakterystyki samego głośnika, przy tunelu nie wytłumionym o długości 2,9 m



Rys. 34. Charakterystyka częstotliwościowa przy tunelu wytłumionym (słabo – linia ciągła, mocniej – linia przerywana), odniesiona do charakterystyki samego głośnika
UWAGA: Rzeczywista charakterystyka głośnika nie jest płaska, lecz ma kształt zgodny (teoretycznie) z krzywymi przedstawionymi na rys. 35. Stąd też i rzeczywiste charakterystyki układu związane są z tymi krzywymi.

Fala promieniowana przez tylną stronę membrany zostaje przesunięta w fazie na drodze od głośnika do wylotu tunelu. Przesunięcie zależy od długości tunelu i długości fali, a więc częstotliwości. Dla odwrócenia fazy o 180° (zapewnienia tej samej fazy promieniowania przedniej strony membrany i wylotu tunelu), przy częstotliwości 20 Hz, tunel musiałby mieć długość połowy długości fali tej częstotliwości, a więc ok. 8,6 m (przyjmując prędkość dźwięku w powietrzu 344 m/s). Jest to bardzo trudne do zrealizowania i nawet niepotrzebne. Z rachunku wektorowego wynika, że już przy przesunięciu fazy o 60° (a więc przy długości tunelu równej $1/6$ długości fali, wypadkowe promieniowanie jest równe promieniowaniu przedniej strony membrany (rys. 32). Dla 20 Hz odpowiednia temu warunkowi długość tunelu wynosi już tylko ok. 2,9 m. Oczywiście, maksymalne wypadkowe promieniowanie wystąpi przy przesunięciu bliskim 180° (rys. 32), czyli przy częstotliwości trzy razy wyższej - ok. 60 Hz i spowoduje uwypuklenie tego zakresu częstotliwości na charakterystyce częstotliwościowej (rys. 33). Przesuwając się wyżej na skali częstotliwości doświadczamy poważnych problemów związanych z funkcjonowaniem tunelu. Przy częstotliwości dwa razy wyższej od 60 Hz (gdzie nastąpiła zgodność faz) w tunelu ułoży się cała długość fali, co da przesunięcie 360° , a w stosunku do fazy przedniej strony membrany 180° . Wylot tunelu promieniuje falę w fazie przeciwnej do fazy przedniej strony membrany, a więc energie te znoszą się. Na charakterystyce częstotliwościowej spowoduje to zapadnięcie. Pojawiające się dalej na przemian rezonanse (zgodność fazy wylotu tunelu i głośnika, nieparzyste wielokrotności 60 Hz) i antyrezonanse (przeciwne fazy, parzyste wielokrotności 60 Hz) zakłócają liniowość charakterystyki w całym paśmie przetwarzanym przez głośnik.

Wytlumienie tunelu, będące integralną częścią linii transmisyjnej, jest mało skuteczne dla zaabsorbowania fal najniższych częstotliwości. Spełnia ono znacznie lepiej swoją rolę przy częstotliwościach nieco wyższych, już od kilkuset Hz.

Praktyczną linię transmisyjną można więc uznać za niedoskonałą realizację idealnej linii transmisyjnej (nieskończenie wielkiej odgrody), w której wytlumienie tunelu nie jest zdolne do zatrzymania najniższych częstotliwości, ale które dzięki korzystnym w tym zakresie przesunięciom fazowym wprowadzonym przez tunel zostają wypromieniowane na zewnątrz w fazie w przybliżeniu zgodnej z promieniowaniem przedniej strony membrany (rys. 34). Rzeczywiste działanie dobrze zaprojektowanej i wykonanej linii transmisyjnej może być więc lepsze od „idealnej” linii transmisyjnej, gdyż pojawia się również zysk energetyczny dzięki wykorzystaniu promieniowania tylnej strony membrany do zwiększenia efektywności przetwarzania najniższych częstotliwości. Pozostają przy tym zachowane zalety linii transmisyjnej - powietrze w obudowie nie jest sprężane i rozprężane, a jedynie „przepompowywane” przez tunel, co nie wywołuje poważnych drgań ścianek. Sztywności obudowy służy również jej naturalne wzmocnienie przegrodami, formującymi wewnątrz tunel o żądanej długości (stąd spotykana nazwa „obudowa labiryntowa”).

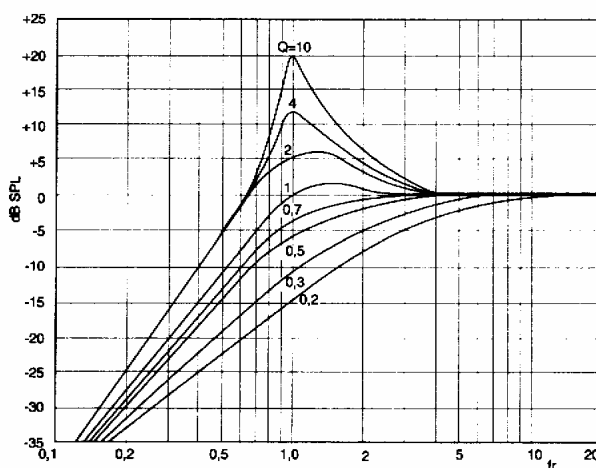
Największym problemem konstruktorów linii transmisyjnych pozostaje wytlumienie pierwszego antyrezonansu, leżącego w zakresie stukilkudziesięciu Hz (w naszym przykładzie 120 Hz). Jego obecność najczęściej zaznacza się na charakterystykach częstotliwościowych, podczas gdy zjawiska rezonansu w wyższym zakresie, już przy częstotliwościach średnich są znacznie słabsze, gdyż skuteczność tłumienia szybko rośnie wraz ze wzrostem częstotliwości.

Parametry głośnika

Należy jeszcze uwzględnić jedno zjawisko rezonansowe - przy częstotliwości, dla której w tunelu „ułoży się” $1/4$ fali, nastąpi redukcja amplitudy ruchu membrany głośnika, większość energii będzie promieniowana przez wylot tunelu (podobnie jak przy częstotliwości rezonansowej obudowy z otworem). Właśnie taką długość tunelu, odpowiadającą rezonansowi ćwierćfalowemu, wiąże się najczęściej z częstotliwością rezonansową głośnika, aby stłumić największe w tym zakresie drgania membrany głośnika. Zapewnia to również właściwe przetwarzanie basów, na miarę możliwości stosowanego głośnika. Strojenie niższe (dłuższy tunel), na skutek spadku sprawności przetwarzania samego głośnika, nie przyniosłoby korzyści. Np. dla głośnika niskotonowego o częstotliwości rezonansowej $f_s = 30$ Hz odpowiednia długość tunelu wynosi 2,9 m (długość fali 30 Hz - 11,5 m).

Przy projektowaniu linii transmisyjnej nieistotna jest wartość objętości ekwiwalentnej V_{AS} , ponieważ służy ona obliczaniu zmiany wartości częstotliwości rezonansowej i dobroci całkowitej głośnika, gdy jest on zawieszony na poduszce powietrznej np. obudowy zamkniętej. W linii transmisyjnej głośnik jest zawieszony swobodnie i zjawisko wzrostu częstotliwości rezonansowej i dobroci nie występuje.

Jeden z najważniejszych parametrów głośnika, którego wartość wyznacza możliwość zastosowania i parametry obudowy zamkniętej, a zwłaszcza bass-reflex, to dobroć całkowita Q_{TS} . W przypadku linii transmisyjnej nie ma ścisłych wzorów uwzględniających ten parametr. Zgodnie z założeniami linii transmisyjnej, która tak jak teoretyczna nieskończona odgroda nie zmienia parametrów głośnika swobodnie zawieszonego, wartość Q_{TS} powinna zawierać się w granicach żądanej dobroci finalnego urządzenia głośnikowego. Za najkorzystniejszą uważa się wartość dobroci z zakresu 0,5...0,7. Zapewnia to dobre właściwości impulsowe przy optymalnej charakterystyce częstotliwościowej (rys. 35). Tak więc dobroć Q_{TS} głośnika niskotonowego swobodnie zawieszonego powinna zawierać się w tych granicach (dla obudowy zamkniętej Q_{TS} musi być niższa, gdyż ulegnie zwiększeniu na skutek działania poduszki powietrznej).



Rys. 35. Charakterystyka częstotliwościowa głośnika dla różnych wartości dobroci

Co wygląda paradoksalnie, w obudowie typu „linia transmisyjna”, uznawanej przez wielu za najlepszą, można stosować głośniki, które są „za słabe” do użycia w obudowie zamkniętej, a tym bardziej bass-reflex.

Wysoka wartość dobroci jest często związana z małym układem magnetycznym - są to głośniki zwykle tańsze od wyposażonych w silne magnesy głośników przeznaczonych do obudów typu bass-reflex. Jednak te ostatnie, o niskiej wartości dobroci również znajdują zastosowanie w liniach transmisyjnych. Im niższa wartość dobroci, tym lepsze właściwości impulsowe, chociaż niższa efektywność w zakresie częstotliwości rezonansowej. Ponieważ w zakresie tej częstotliwości występuje zysk energetyczny, powodowany zgodną w fazie pracą przedniej strony membrany i tunelu (rys. 34), stąd zastosowanie głośnika nawet o niskiej dobroci 0,3...0,5 może zapewnić odpowiednią sprawność przetwarzania częstotliwości najniższych. Uzyskane charakterystyki impulsowe będą przy tym doskonałe, zapewniając kontrolę i „szybkość” basu nieosiągalną dla innych typów obudów. (Teoretyczną charakterystykę przetwarzania można określić odnosząc funkcję z rys. 34 do charakterystyk z rys. 35, dla głośnika o określonej dobroci. Rzeczywiste przetwarzanie niskich częstotliwości może być nawet jeszcze lepsze, na skutek zwiększonej reaktancji promieniowania w pomieszczeniu zamkniętym, gdy zespół głośnikowy znajduje się blisko ścian).

Wielkość głośnika niskotonowego (powierzchnia membrany) nie ma bezpośredniego wpływu na objętość obudowy zamkniętej lub z otworem. Nawet duże głośniki, o ile inne ich parametry na to pozwalają, mogą zostać użyte w obudowach z otworem, a szczególnie zamkniętych, o relatywnie małej objętości. Nie występuje tam również związek między długością fali, której przetwarzanie chcemy zapewnić, a wymiarami obudowy. Jak pokazano powyżej

związek taki występuje w obudowie z linią transmisyjną. Mimo to, gdyby tunel mógł być o dowolnie małym przekroju, wówczas ograniczenie wielkości całej obudowy nie stanowiłoby problemu. Niestety, w przypadku linii transmisyjnych wielkość głośnika narzuca wymagany przekrój tunelu - nie powinien być on mniejszy od powierzchni membrany, a przez to określa w przybliżeniu już całkowitą objętość obudowy.

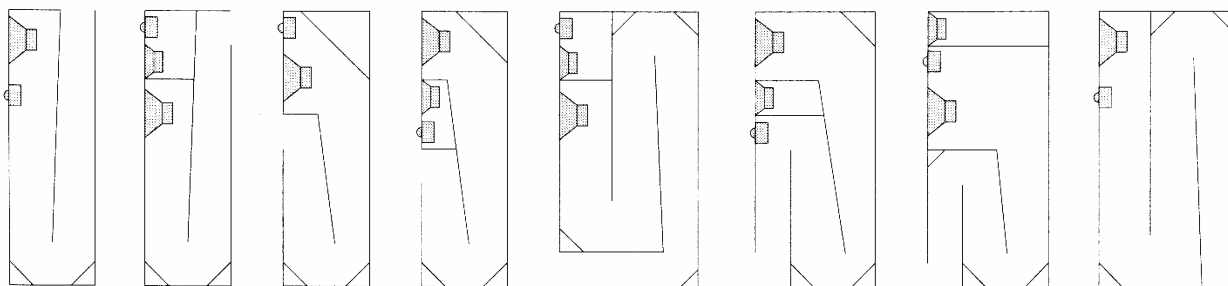
Głośnik niskotonowy, przeznaczony do stosowania w linii transmisyjnej, powinien mieć jak najniższą częstotliwość rezonansową i być zdolnym do pracy w dużym zakresie amplitud. Pierwsze poprzez dużą masę membrany, a drugie poprzez cewkę znacznie dłuższą od szczeliny (lub szczelinę dłuższą od cewki, co jest znacznie rzadsze), wymaga dla osiągnięcia przyzwoitego poziomu efektywności również zastosowania dużych układów magnetycznych, tak jak w przypadku głośników o niskiej dobroci do obudów typu bass-reflex.

Konstrukcja obudowy

Dla zapobiegania powstaniu fal stojących w poszczególnych sekcjach labiryntu i dla skuteczniejszego działania tunelu w jego roli tłumiącej linii transmisyjnej, nie powinien on mieć stałego przekroju na całej długości, lecz zżęzać się ku wylotowi. Zachowując powierzchnię wylotu bliską powierzchni membrany głośnika, należy zwiększyć powierzchnię „wlotu” tunelu (za głośnikiem) o ok. 50%. Jest to najlepsze rozwiązanie, choć wymagające zastosowania dużej obudowy. Można też zgodzić się na kompromis redukujący objętość o ok. 20%, i zastosować tunel o powierzchni wlotu równej 1,2, a powierzchni wylotu 0,8 powierzchni membrany głośnika. Dalej idące zmniejszanie przekroju tunelu nie jest polecane.

Tunel linii transmisyjnej jest w obudowie załamany, co służy wygodnemu jego ułożeniu w bryle o określonym kształcie i proporcjach.

Wylot tunelu może znajdować się w zasadzie w dowolnym miejscu obudowy, choć od jego umieszczenia w dużym stopniu zależy może charakter basu. Umiejscowiony np. na górnej ścianie nie będzie powodował dużych problemów z ustawieniem zespołów blisko ścian. Zlokalizowany na dole obudowy, zwłaszcza z tyłu, może wymagać odsunięcia od ścian, gdyż w przeciwnym wypadku, na skutek zwiększonej reaktancji promieniowania, przetwarzanie pewnego zakresu niskich częstotliwości może być zbyt efektywne i prowadzić do dominacji basu o charakterze dudniącym. Możliwe do realizacji i spotykane w rozwiązaniach firmowych pomysły na ułożenie labiryntu przedstawiono na rys. 36. Są one w dużym stopniu związane z konfiguracją wszystkich głośników w zespole tak, że projektując obudowę z linią transmisyjną dobrze jest już mieć wyobrażenie o całości urządzenia głośnikowego. Należy m. in. uwzględnić (w zespołach trój- lub czterodrożnych) obecność specjalnej komory dla głośnika średniotonowego, która nie powinna zakłócać przebiegu tunelu.



Rys. 36. Przykładowe, schematyczne konstrukcje linii transmisyjnych dla układów dwudrożnych i trójdrożnych

Podstawowym zabiegiem służącym tłumieniu fali w tunelu jest jego wytłumienie. Rodzaj, ilość i miejsce umieszczenia wytłumienia były przedmiotem wielu badań i eksperymentów. W każdym konkretnym przypadku konieczne jest przeprowadzenie serii prób i porównań. Punktem wyjścia jest wyłożenie (najlepiej wszystkich) ścianek kilku centymetrową warstwą gęstego materiału tłumiącego, np. pianką poliuretanową i wypełnienie całego tunelu materiałem o małej

gęstości, ale przymocowanym do ścianek i unieruchamianym tak, aby nie przesuwiał się wraz z powstającym w tunelu ciśnieniem akustycznym.

Za najlepszy materiał do tego celu uznaje się długowłosą wełnę owczą, luźno rozciągniętą w tunelu, ale przy jej braku można próbować użycia np. waty. Zbyt mała ilość materiału tłumiącego pozwoli transmitować przez tunel szeroki zakres częstotliwości, co spowoduje opisane nierównomierności charakterystyki. Za dużo wytłumienia zredukuje korzystne promieniowanie tunelu przy rezonansie ćwierćfalowym lub nawet „zamknie” tylną stronę membrany. Odchylona palcami membrana głośnika powinna natychmiast wracać do pozycji wyjściowej. Opóźnienie tego ruchu, typowe dla obwodów zamkniętych, sygnalizuje problemy ze swobodnym ruchem membrany i zdecydowanie zbyt dużą ilość materiału tłumiącego w linii transmisyjnej.

Obecność materiału tłumiącego przynosi dodatkowy, korzystny efekt. Na skutek mniejszej prędkości dźwięku w materiale tłumiącym niż w powietrzu, dla danej częstotliwości zmniejsza się długość jej fali. Dzięki temu można zastosować tunel krótszy niż wyliczony teoretycznie przy założonej prędkości dźwięku w powietrzu. Korekcja może sięgać do -20%, w zależności od stopnia wytłumienia. Przy projektowaniu można bezpiecznie założyć korekcję ok. -10% (wykonać tunel o 10% krótszy). Przy bardzo słabym wytłumieniu obudowa może okazać się o ok. 5% akustycznie „za krótka”, a przy silnym wytłumieniu do 10% „za długa” w stosunku do założonej teoretycznie długości, co nie będzie poważnym błędem.

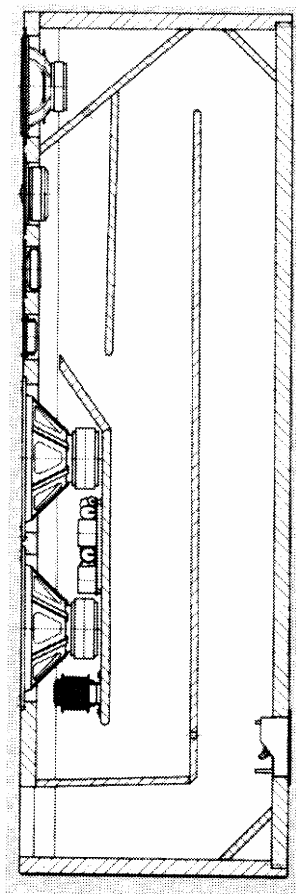
Tak w największym skrócie wygląda zasada działania typowej linii transmisyjnej. W następnym odcinku odkryjemy kolejne tajemnice - pokażemy oryginalne i nietypowe rozwiązania, które wykraczają poza ramy powyższych podstawowych założeń, a ponadto przedstawimy własny projekt linii transmisyjnej [7].

Największym problemem funkcjonowania obudowy z wytłumionym labiryntem – „linii transmisyjnej” są antyrezonanse, pojawiające się gdy fala promieniowana przez tylną stronę membrany zostaje tak przesunięta w fazie na drodze do wylotu labiryntu, że jest wypromieniowana w fazie przeciwnej do fazy promieniowania przedniej strony membrany (zjawisko to występuje, gdy w labiryncie „układają się” pełne długości fali, kiedy wylot labiryntu promieniuje w fazie z promieniowaniem tylnej strony membrany).

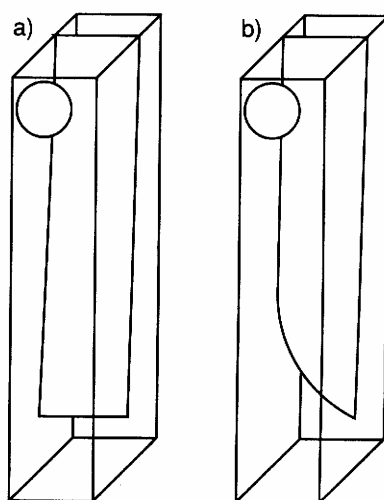
Podstawowym zabiegiem przeciwdziałającym jest wytłumienie, które jednak nie spełnia swojej roli doskonale. Podczas gdy skuteczne jest w zakresie kilkuset Hz, to szczególnie niekorzystnie zaznacza się pierwszy antyrezonans, występujący w zakresie stukilkudziesięciu Hz. Jego dokładne położenie zależy od długości labiryntu - linii transmisyjnej. Niestety, przesuwanie w kierunku częstotliwości wyższych - poprzez skracanie labiryntu nie jest wskazane. Dla uzyskania dobrego przetwarzania najniższych częstotliwości linia musi być odpowiednio długa, co lokalizuje pierwszy antyrezonans dość nisko i czyni walkę z nim trudniejszą. (W przykładzie w poprzedniej części, przy tunelu o długości ok. 2,9 m, dającym zysk sprawności przetwarzania w zakresie 20 - 100 Hz, antyrezonans występuje w okolicach 120 Hz). Poza wytłumieniem pozostaje kilka innych sposobów, mogących w mniejszym lub większym stopniu pomóc w rozwiązaniu tego problemu.

Najlepszym z nich jest stosowanie głośnika niskotonowego w obudowie z labiryntem w systemie wielodrożnego zespołu głośnikowego, w którym głośnik średniotonowy, a w zasadzie nisko-średniotonowy (szczególnie w układach czterodrożnych) przejmuje przetwarzanie od częstotliwości, przy której głośnik niskotonowy pracowałby w antyrezonansie labiryntu. Niska częstotliwość podziału między głośnikiem niskotonowym, a nisko-średniotonowym wymaga zastosowania dużego - najpewniej 16 cm głośnika nisko-średniotonowego, o niskiej częstotliwości rezonansowej i innych parametrach umożliwiających zastosowanie go w takiej roli. Oczywiście, pracuje on w odseparowanej, zamkniętej komorze obudowy tak, że na jego działanie w żaden sposób nie wpływa konstrukcja labiryntu. Pomysł taki jest dość kosztowny - niemożliwy do wykorzystania w układach dwudrożnych, wymagający bardzo dobrego głośnika nisko-średniotonowego w układach trój- i czterodrożnych, co z kolei ma sens przy zastosowaniu dużego głośnika niskotonowego. Jednak rozwiązuje problem w zarodku – eliminuje z zakresu pracy głośnika niskotonowego wszystkie potencjalne antyrezonanse; nawet wytłumienie nie jest już tutaj

czynnikiem decydującym i można zastosować tylko niewielką jego ilość. Na rys. 37 przedstawiono pięciopiętrowy zespół głośnikowy T+A TMR 230, w którym dwa 30-centymetrowe głośniki niskotonowe (pracujące w labiryncie) pokrywają zakres do częstotliwości ok. 150 Hz, powyżej której działa już 20 cm głośnik nisko-średniotonowy (w komorze zamkniętej, u szczytu obudowy).



Rys. 37. Pięciodrożny układ T+A TMR 230 zawiera dwa głośniki niskotonowe w linii transmisyjnej i głośnik nisko-średniotonowy w komorze zamkniętej

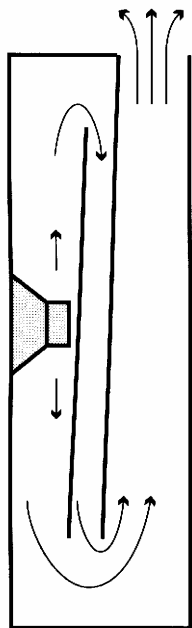


Rys. 38. a) konstrukcja typowa; b) wyprofilowane przegrody różnicujące drogę, jaką przebywa fala od tylnej strony membrany do wylotu linii transmisyjnej

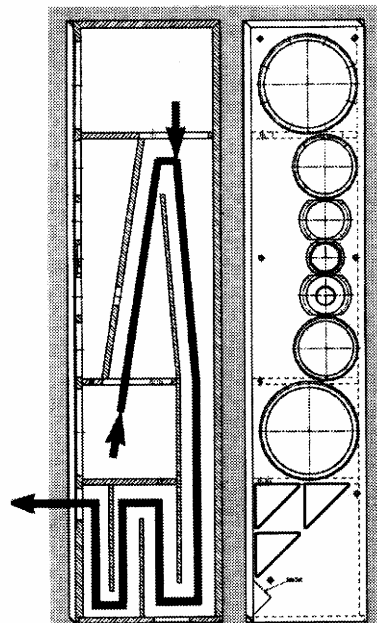
Dla systemów dwudrożnych i trójdrożnych z małym głośnikiem średniotonowym, wyznaczającym wysoką częstotliwość podziału, istnieją inne możliwości. Labirynt może być tak

„przebiegle” skonstruowany, że antyrezonanse będą co najmniej znacznie słabiej zaznaczone. Jednym z zabiegów (stosowany m.in. przez firmę ECOUTON) jest odpowiednie wyprofilowanie przegrody formującej labirynt (rys. 38).

Większa część ciśnienia akustycznego, wytworzonego przez tylną stronę membrany przechodzi najdłuższą drogą od głośnika do wylotu, tam gdzie powierzchnia wycięcia w przegrodzie jest największa. Część energii przepuszczona jest krótszą drogą, zwężającą się szczeliną. Ta część fal, przechodząca krótszą drogą, znajduje się w wylocie tunelu, w fazie przesuniętej względem fali biegnącej najdłuższą drogą. Gdy występuje antyrezonans dla najdłuższej, podstawowej drogi labiryntu, fala promieniowana drogą krótszą korzystnie uzupełni pracę układu, „wypełniając” zapadłość na charakterystyce częstotliwościowej. W miarę skracania drogi, coraz mniejsza część energii jest nią przepuszczana, dzięki płynnemu zmniejszaniu się przekroju.



Rys. 39. Fala promieniowana przez tylną stronę głośnika kierowana jest do wylotu dwoma drogami różnej długości



Rys. 40. Dwa głośniki niskotonowe T+A T230 umieszczone zostały w różnych odległościach od wylotu linii transmisyjnej

Podobnym rozwiązaniem, nie wymagającym profilowania przegrody, jest wyprowadzenie ciśnienia od tylnej strony membrany dwoma różnej długości drogami, które na pewnym odcinku mogą być już wspólne, prowadząc do wspólnego wylotu (rys. 39, również rys. 37).

Odpowiednio obliczona różnica dróg może zapewnić, że antyrezonanse dla obydwu odległości od głośnika do wylotu nie będą na siebie zachodzić w szerokim zakresie, do kilkuset Hz, gdzie skutecznie działać będzie już wytłumienie. Przy jednej drodze dwukrotnie dłuższej od drugiej, można nawet wypełnić pierwszy antyrezonans dłuższej drogi (np. 2,9 m – układa się cała długość fali 120 Hz – antyrezonans) – rezonansem krótszej drogi (1,45 m – gdzie układa się połowa fali 120 Hz – rezonans). Jednak wówczas przy drugim antyrezonansie dłuższej drogi (2,9 m – układają się dwie długości fali 240 Hz – antyrezonans) wystąpi równocześnie pierwszy antyrezonans krótszej drogi (1,45 m – układa się jedna długość fali 240 Hz – antyrezonans). Jeśli w tym zakresie częstotliwości pracować będzie już głośnik średniotonowy lub skuteczne będzie działanie wytłumienia, to nie ma problemu. W każdym razie tracimy część sprawności przetwarzania najniższych częstotliwości, odpowiednio do części energii przechodzącej krótszą drogą, dla której wyższa jest dolna częstotliwość graniczna wzmacniającego działania labiryntu.

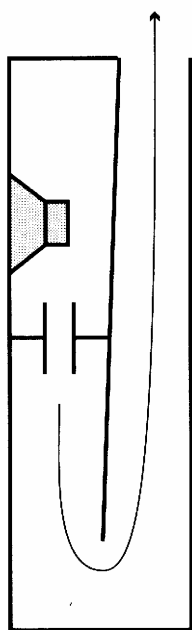
W praktyce należy tak uformować labirynt, aby większa część energii przybywała dłuższą drogą, a więc była kierowana drogą o większym przekroju (podobnie jak przy profilowanej przegrodzie). Ponadto, dla zadowalającego wyrównania charakterystyki częstotliwościowej i dla

zapewnienia jak najlepszego przetwarzania najniższych częstotliwości, dodatkowa, krótsza droga powinna wynosić ok. $\frac{3}{4}$ podstawowej długości labiryntu.

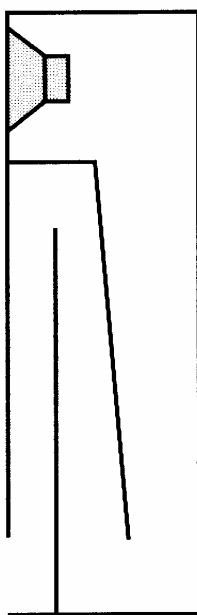
Podobny efekt, jak przy prowadzeniu dwóch różnej długości dróg od tylnej strony membrany jednego głośnika, daje zastosowanie w jednym labiryncie dwóch głośników niskotonowych, umieszczonych w różnych odległościach od wylotu. Dobrym przykładem znowu służy konstrukcja firmy T+A (rys. 40)

Opis zjawiska jest taki sam jak w przypadku poprzednim, antyrezonanse każdego z głośników są przesunięte na skali częstotliwości, dzięki czemu wypadkowa charakterystyka częstotliwościowa jest bardziej wyrównana. Zastosowanie dwóch głośników niskotonowych podnosi, *rzecz jasna*, koszty, ale jeśli z innych założeń konstrukcyjnych wynika taka konieczność, to należy wykorzystać to jako okazję dla przeprowadzenia wspomnianego zabiegu zróżnicowania ich położenia względem wylotu tunelu. Dwa głośniki nisko-tonowe wymagają oczywiście zwiększenia przekroju tunelu odpowiednio do sumy powierzchni membran.

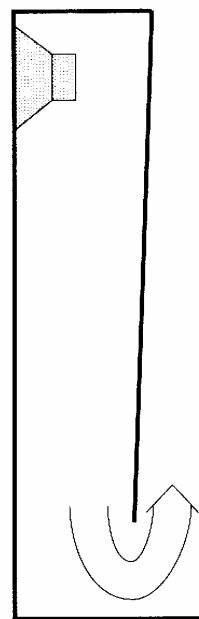
Zupełnie inną metodą jest powiązanie działania linii transmisyjnej z dolnoprzepustowymi właściwościami obudowy, z otworem (bass-reflex). Jeśli za głośnikiem niskotonowym znajdować się będzie komora z otworem, to przez otwór do labiryntu promieniowane będą częstotliwości tylko zakresu ograniczonego częstotliwością rezonansową układu bass-reflex (podatność powietrza w komorze - masa powietrza w otworze). Dopiero tak przefiltrowana energia tylnej strony membrany, w zakresie częstotliwości poniżej pierwszego antyrezonansu labiryntu, przedostaje się do tunelu i zostaje wypromieniowana przez wylot. Wyższe częstotliwości, które byłyby promieniowane przez wylot w fazie przeciwnej do fazy promieniowania przedniej strony membrany, zostają „zatrzymane” w komorze. Przednia strona membrany może pracować w szerokim zakresie częstotliwości, nie niepokojona przez antyrezonanse labiryntu, wzmocniona w swoim działaniu przez pierwszy, pożyteczny rezonans ćwierćfalowy i półfalowy (rys. 41).



Rys. 41. Tunel linii transmisyjnej znajduje się za komorą bass-reflex



Rys. 42. Linia transmisyjna w konstrukcjach firmy TDL



Rys. 43. Linia transmisyjna wg projektów firmy ISOPHDN – wyraźne zwężenie tunelu w połowie długości

Wiele rozwiązań jest czymś pośrednim między przedstawioną powyżej koncepcją, klasyczną linią transmisyjną i klasyczną obudową z otworem. Za głośnikiem niskotonowym znajduje się duża komora, z której bezpośrednio wyprowadzony jest długi tunel (rys. 42).

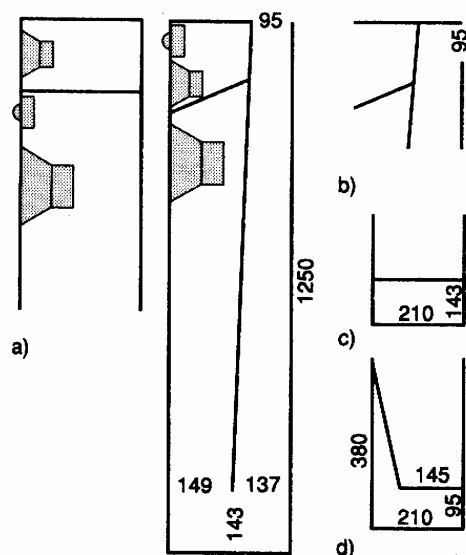
Można taką konstrukcję konsekwentnie rozpatrywać, jako obudowę z linią transmisyjną, biorąc pod uwagę przekrój tunelu i odległość od tylnej strony membrany do wylotu tunelu, i obliczać wynikające stąd rezonanse i antyrezonanse labiryntu. Można też całość rozważać jako bass-reflex, uwzględniając pojemność komory za głośnikiem i średnicę wraz z długością tunelu, i obliczać częstotliwość rezonansową tak opisanego układu bass-reflex. Dzięki dużej powierzchni wylotu (w przybliżeniu równej powierzchni membrany) działanie układu rezonansowego bass-reflex jest bardzo efektywne (powierzchnia typowego otworu równa się najczęściej tylko 10 – 20% powierzchni membrany, co wynika m.in. z ograniczonej długości tunelu). Dzięki długiemu tunelowi przekrój może być tak duży, a także nie występuje gwałtowny spadek sprawności przetwarzania poniżej częstotliwości rezonansowej układu bass-reflex, typowy dla klasycznych obudów tego typu z krótkim tunelem.

Poniżej częstotliwości rezonansowej bass-reflex tylna strona membrany przepompowuje powietrze przez tunel, a przy bardzo krótkiej drodze od tylnej strony membrany do wylotu, przednia strona i wylot tunelu pracują wówczas w przeciwfazie. Przy bardzo długim tunelu faza zostanie korzystnie przesunięta, zgodnie z podstawową zasadą działania obudowy labiryntowej.

Obudowa tego typu jest od wielu lat stosowana przez firmę TDL. Reklamuje ona swoje konstrukcje jako obudowy z linią transmisyjną, chociaż przypominają one swoim działaniem obudowy bass-reflex, w co najmniej równym stopniu.

Możliwych jest wiele wariantów pośrednich, bliższych obudowie bass-reflex lub klasycznej linii transmisyjnej, w zależności od tego, czy wejście do tunelu jest mniej lub bardziej zaznaczone w stosunku do komory znajdującej się za głośnikiem. W projektach obudów firmy ISOPHON (przeznaczonych do samodzielnego wykonania), zwężenie się przekroju do wielkości powierzchni membrany następuje dopiero w połowie długości tunelu i chociaż nie jest tak gwałtowne jak w obudowach TDL, to jednak pierwszą część labiryntu można uznać za komorę o określonej objętości i podatności, a drugą część za tunel o określonej masie powietrza (rys. 39). W kolejnej części przedstawimy dwa projekty linii transmisyjnych oparte na głośnikach różnej wielkości [8].

Projekt obudowy labiryntowej



Rys. 44. „Linia transmisyjna” dla głośnika GDN 20/60/3 w układzie trójdrożnym

- a) „zamiana miejscami” głośników średnio- i wysokotonowego
- b) wylot labiryntu z tyłu obudowy
- c) typowy profil przegrody
- d) profil różnicujący długość labiryntu

Spośród głośników produkowanych przez Tonsil do zastosowania w linii transmisyjnej można wybrać 20-centymetrowy GDN 20/60/3. Ma on dość niską częstotliwość rezonansową (jak

na swoją wielkość i porównywalne głośniki Tonsilu) i „wygodną” dla linii transmisyjnej wartość dobroci całkowitej (ważnym atutem tego głośnika pozostaje również niska cena).

GDN 20/60/3 może być polecany przede wszystkim jako głośnik niskotonowy w układach trójdrożnych - celulozowa, niewytlumiona membrana kiepsko tłumi wewnętrzne drgania i ma słabe charakterystyki w zakresie częstotliwości średnich. Zakładając użycie głośnika średniotonowego, przy projektowaniu obudowy należy pamiętać o specjalnej dla niego komorze. 20 centymetrowy głośnik niskotonowy harmonijnie uzupełni 12...13 centymetrowy głośnik średniotonowy, dla którego wystarczy komora o objętości 5 dm³.

Podstawowe parametry GDN 20/60/3 są następujące:

- częstotliwość rezonansowa głośnika swobodnie zawieszonego $F_s = 36$ Hz
- całkowita dobroć głośnika swobodnie zawieszonego $Q_{TS} = 0,45$
- objętość ekwiwalentna $V_{AS} = 70$ dm³
- efektywność (1W/1m) $S_{PL} = 87$ dB
- moc znamionowa $P = 60$ W
- impedancja znamionowa $Z_{VC} = 4$ Ω
- rezystancja cewki głośnika $R_C = 3,5$ Ω
- powierzchnia czynna membrany $S_D = 200$ cm²

Ponieważ zakładamy wykorzystanie głośnika jako niskotonowego w zakresie pracy ograniczonym do kilkuset Hz, musimy uwzględnić użycie dużej cewki indukcyjnej o określonej wartości rezystancji (R_s), która włączona szeregowo z rezystancją cewki głośnika doprowadzi do wzrostu wartości dobroci elektrycznej, a przez to wzrostu wartości dobroci całkowitej. Nie dysponując wartościami dobroci elektrycznej i mechanicznej, które składają się na dobroć całkowitą, skorygowaną wartość dobroci całkowitej można z dobrym przybliżeniem wyznaczyć tylko z pomocą wartości wyjściowej dobroci całkowitej.

$$Q'_{TS} \approx Q_{TS} \cdot \frac{R_E + R_s}{R_E}$$

Cewka filtru „obcinającego” pracę głośnika już przy kilkuset Hz może mieć rezystancję ok. 0,5 Ω:

$$Q'_{TS} \approx 0,45 \cdot \frac{3,5 + 0,5}{3,5} \approx 0,51$$

Skorygowana wartość dobroci całkowitej jest bliska optymalnej dla przenoszenia impulsów (0,5). Dokładna znajomość wartości Q_{TS} nie jest potrzebna do dalszych obliczeń, które w przypadku klasycznej linii transmisyjnej nie uwzględniają wartości Q_{TS} . Powyższe działania miały na celu sprawdzenie, czy określony głośnik nadaje się do zastosowania w tego typu obudowie – dopuszczalny zakres dobroci całkowitej rozciąga się od 0,4 do 0,7 (ewentualnie do wartości 1), jednak przy znacznym już pogorszeniu właściwości impulsowych.

W dalszych obliczeniach nie będzie występował także kolejny ważny parametr przy projektowaniu innych obudów – parametr Thiele’a-Small’a V_{AS} . Istotne będą tylko częstotliwość rezonansowa i powierzchnia membrany.

Przyjmujemy, że rezonans ćwierćfalowy linii transmisyjnej (labiryntu) będzie odpowiadać częstotliwości rezonansowej f_s – stworzy to najlepsze warunki pracy dla głośnika i maksymalnie spożytkuje jego możliwości. Oznacza to, że długość labiryntu powinna być równa ćwierci fali o częstotliwości 36 Hz. Długość labiryntu zostaje następnie skorygowana współczynnikiem 0,9, gdyż w wytłumionym labiryncie spadnie prędkość dźwięku, co oznacza skrócenie fali określonej częstotliwości nawet o kilkanaście procent:

$$L_{TL} = \frac{C}{F_s \cdot 4}; \quad L'_{TL} = 0,9 \cdot \frac{C}{F_s \cdot 4}$$

gdzie L_{TL} – teoretyczna długość labiryntu nie wytłumionego, L'_{TL} – skorygowana, rzeczywista długość labiryntu wytłumionego, C – prędkość dźwięku w powietrzu (344 m/s)

$$L'_{TL} = 0,9 \cdot \frac{344}{36 \cdot 4} = 2,15 \text{ m}$$

Dla uzyskania wysokiej sprawności przetwarzania najniższych częstotliwości zakładamy, że powierzchnia wylotu tunelu równa będzie powierzchni membrany (200 cm^2). Ponieważ przekrój kanału powinien się zmniejszyć w kierunku wylotu, przekrój na wysokości głośnika odpowiadać będzie wartości ok. 400 cm^2 .

Łatwe uformowanie obliczonego kanału w funkcjonalnym kształcie wąskiej, wysokiej obudowy wolnostojącej jest pokazane na **rysunku 44**. Możliwe są tutaj dwie konfiguracje głośników średniotonowego i wysokotonowego (rys. 44a). Jeżeli usytuowanie głośnika wysokotonowego na samym szczycie przedniej ścianki jest niekorzystne – zbyt wysokie w stosunku do wysokości, na jakiej znajduje się słuchacz – dopuszczalna jest zamiana „kolejności” z głośnikiem niskotonowym, o ile częstotliwość podziału między głośnikiem niskotonowym a średniotonowym leży dość nisko (kilkaset Hz). Przy wyższej częstotliwości podziału i zastosowaniu filtrów niskiego rzędu rozsuniecie tych dwóch głośników groziłoby niekorzystnymi relacjami fazowymi między nimi.

Głośnik wysokotonowy powinien bezwzględnie znajdować się bezpośrednio przy głośniku średniotonowym. Wylot tunelu można wyprowadzić na tylnej ścianie (rys. 44b), co z pewnych względów może być praktyczniejsze i bardziej estetyczne, ale będzie wymagało odsunięcia zespołu głośnikowego od znajdującej się za nim ściany. Typowy profil przegrody pokazano na rys. 44c. Można również inaczej uformować przegrodę labiryntu, zmieniając kształt przekroju w miejscu jego załamania. Przegroda skośna (rys. 44d), różnicując drogę od tylnej strony membrany do wylotu tunelu, osłabia efekt rezonansów i antyrezonansów w wyższym zakresie częstotliwości.

Dokładne określenie wymiarów zewnętrznych zależy od grubości ścianek. „Linia transmisyjna” nie jest pod tym względem specjalnie wymagająca – w tym przypadku wystarczy materiał o grubości 18...22 mm (płyta wiórowa, MDF), można także pogrubić przednią ściankę do 30 mm, zaś wewnętrzne przegrody wykonać z materiału o grubości tylko ok. 15 mm.

Wytlumienie należy dobrać eksperymentalnie, zwracając uwagę na większą ilość materiału tłumiącego bezpośrednio za głośnikami i w załamaniu labiryntu.

Gęsty materiał, taki jak np. pianka poliuretanowa, powinien pokrywać kilkucentymetrową warstwę tylko ścianki, nie zamykając światła labiryntu. Pozostała objętość może być wypełniona materiałem lżejszym – np. watą.

Całkowita wewnętrzna objętość labiryntu wynosi ok. $64,5 \text{ dm}^3$. Chcąc głośnik GDN 20/60/3 użyć w obudowie zamkniętej, przy dobroci całkowitej układu $Q_{TC} = 0,7$ (maksymalnie płaska charakterystyka częstotliwościowa), wymagana objętość obudowy (wytlumionej) wynosi w przybliżeniu właśnie 64 dm^3 .

$$Q_{TC} = Q'_{TC} \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}}$$

V_C – objętość obudowy zamkniętej, przy całkowitym wytlumieniu, $V_C = 1,25 V'_C$, gdzie V'_C – rzeczywista objętość obudowy.

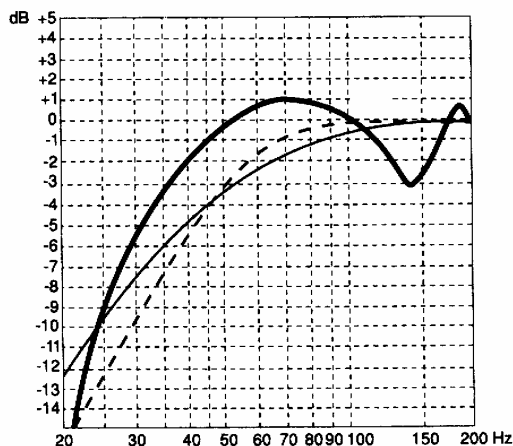
$$0,7 = 0,5 \sqrt{1 + \frac{70}{1,25 \cdot 64}}$$

Według podobnego wzoru możemy obliczyć częstotliwość rezonansową F_C głośnika w obudowie zamkniętej:

$$F_C = F_S \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}}$$

$$F_C = 36 \sqrt{1 + \frac{70}{1,25 \cdot 64}} \approx 49 \text{ Hz}$$

Porównanie teoretycznych charakterystyk głośnika w nieskończenie wielkiej odgradzie ($F_S=36\text{Hz}/Q'_{TS}=0,51$), obudowie zamkniętej 64 dm^3 ($F_C=49\text{Hz}/Q_{TC}=0,7$) i linii transmisyjnej $2,15\text{m}$ (64 dm^3) pokazano na **rysunku 45**.



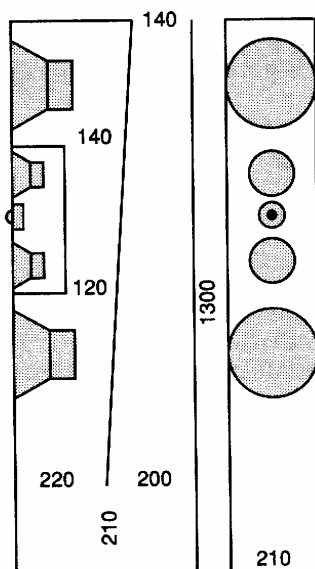
Rys. 45. Teoretyczne charakterystyki głośnika GDN 20/60/3 w nieskończenie wielkiej odgradzie (linia cienka), obudowie zamkniętej o objętości 64 dm^3 (linia przerywana) i obudowie „linia transmisyjna z rys. 44 (linia gruba)

Jak widać, linia transmisyjna jest szczególnie godnym polecenia sposobem wykorzystania głośnika GDN 20/60/3, gdyż nie wymuszając objętości obudowy większej niż w przypadku obudowy zamkniętej, zapewnia znacznie lepsze przetwarzanie najniższych częstotliwości.

Przy głośnikach o wyższej wartości Q_{TS} zysk ten jest jeszcze większy i polega w dużej mierze na uniknięciu stosowania bardzo dużych obudów, koniecznych dla utrzymania jak najniższej wartości Q_{TC} (możliwie zbliżonej do 0,7). Gdybyśmy dysponowali głośnikami o wszystkich parametrach identycznych jak dla GDN 20/60/3, a tylko o wyższej dobroci $Q'_{TS}=0,6$, wówczas wymagana dla $Q_{TC} = 0,7$ objętość obudowy zamkniętej wynosiłaby aż 160 dm^3 , podczas gdy wymagania co do długości i całkowitej objętości labiryntu pozostają niezmiennie.

Stosując dwa głośniki niskotonowe należy teoretycznie dwukrotnie zwiększyć objętość obudowy (tak jak dla obudowy zamkniętej lub bass-reflex) -w tym przypadku ze względu na dwa razy większy przekrój labiryntu (dwa razy większa powierzchnia drgająca dwóch membran). Przy określonej minimalnej szerokości obudowy, korzystnej dla propagacji częstotliwości średnich i wysokich, i przy określonej wysokości oraz sposobie uformowania labiryntu, głębokość obudowy ulegnie ok. dwukrotnemu zwiększeniu. Przy zachowaniu powyższych warunków wyniesie ona ponad 60 cm, co nie jest zbyt wygodne. Można więc nieznacznie zwiększyć szerokość lub zgodzić się na inny kompromis - zmniejszyć powierzchnię wylotu do wartości ok. 0,75 sumy powierzchni membran (300 cm^2) przy powierzchni wlotu odpowiadającej ok. 1,5 sumy powierzchni membran (600 cm^2).

W takiej konstrukcji jeden głośnik może zostać umieszczony maksymalnie wysoko na przedniej ścianie, jak najdalej od wylotu labiryntu, drugi zaś kilkadziesiąt centymetrów niżej. Średnia odległość do wylotu odpowiada obliczonej długości labiryntu. Przestrzeń między głośnikami niskotonowymi (gdzie dysponujemy „zapasem” objętości) i miejsce na przedniej ścianie można łatwo wykorzystać przez zainstalowanie głośnika średniotonowego ze swoją komorą. Polecane jest użycie nawet dwóch głośników średniotonowych, co stworzy w pełni symetryczny układ trójdrowny (głośnik wysokotonowy między średnio-tonowymi). Znaczne rozsuniecie głośników niskotonowych pomaga w kontrolowaniu rezonansów i antyrezonansów (różne odległości do wylotu labiryntu), a więc nie są już potrzebne zabiegi w rodzaju specjalnego kształtowania przegrody. Szkic przykładowej konstrukcji pokazano na rysunku 46.



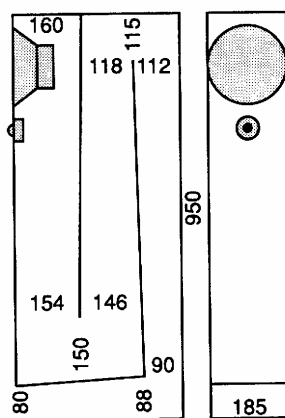
Rys. 46. Linia transmisyjna z dwoma głośnikami GDN 20/60/3 i symetryczną konfiguracją trójdrożną

Doskonałym, ale niestety bardzo drogim, jest głośnik duńskiej firmy Scan-Speak typu 18W 85 35. Ten niewielki głośnik o średnicy całkowitej tylko 177 mm ma częstotliwość rezonansową $F_S=27$ Hz (!), właściwą głośnikom niskotonowym o średnicy 30 cm. Pozostałe parametry: $Q_{TS}=0,45$, $V_{AS}=55$ dm³, $SPL = 86$ dB, $P = 100$ W, $S_D=150$ cm². Głośnik zachowuje liniowość pracy przy amplitudzie ± 5 mm, wytrzymując mechanicznie amplitudę ± 10 mm (!). Membrana jest wykonana według najnowszej technologii z celulozy wypełnionej włóknem węglowym, silnie nasyconej różnymi impregnatami; zachowując pożądaną sztywność w zakresie najniższych częstotliwości doskonale tłumi rezonanse wewnętrzne przy częstotliwościach średnich. Idealny głośnik zarówno do linii transmisyjnej, jak i do układu dwudrożnego.

Posługując się tym samym wzorem, co w przykładzie pierwszym, określamy długość labiryntu:

$$L_{TL} \approx 2,85 \text{ m}$$

Ze względu na niższą częstotliwość rezonansową odpowiednio dostrojony labirynt musi być dłuższy, co zapewni przetwarzanie najniższych częstotliwości pasma akustycznego. Dzięki mniejszej powierzchni membrany przekrój labiryntu będzie jednak mniejszy i całkowita objętość obudowy nie będzie większa niż w przypadku poprzedniego głośnika.



Rys. 47. linia transmisyjna dla głośnika SCAN-SPEAK 18W8535

Labirynt o długości 2,85 m można uformować w tak prosty sposób jak poprzednio, umieszczając głośnik wysoko-tonowy pod głośnikiem nisko-średniotonowym. Chcąc zmniejszyć

wysokość konstrukcji należy labirynt załamać dwukrotnie. Wylot znajdzie się wówczas na dole tylnej ścianki, co może powodować problemy z ustawieniem zespołów głośnikowych. Wyprowadzając wylot labiryntu do przodu, należy jeszcze bardziej skomplikować konstrukcję. Obydwie wersje przedstawiono na rysunku 47.

W każdym miejscu załamania labiryntu korzystnie jest umieścić elementy ustawione pod kątem 45° , które zachowywać będą żądany przekrój tunelu, a także przeciwdziałać powstawaniu fal stojących (służy temu także zwężenie labiryntu). Pracochłonność ich wykonania skłania często do rezygnacji z użycia przynajmniej części z nich.

W oparciu o głośniki o niskiej wartości Q_{TS} ($<0,4$) można konstruować obudowy będące połączeniem systemu bass-reflex i linii transmisyjnej. Projektując taką obudowę należy równocześnie spełnić warunki dla obydwu systemów. Nie zawsze jest to możliwe, ale szczególny związek parametrów głośnika może czasami pozwalać na stworzenie tak ciekawej konstrukcji.

Dysponujemy głośnikiem GDN 30/80 o następujących parametrach: $F_S=25\text{Hz}$, $Q_{TS}=0,24$, $V_{AS}=270\text{ dm}^3$, $R_E=7\ \Omega$, $S_D=450\text{ cm}^2$.

Po uwzględnieniu rezystancji cewki filtru: $R_S=1$, $Q'_{TS}=0,27$

W pierwszym etapie, na podstawie pierwszych trzech parametrów, obliczamy podstawowe parametry obudowy bass-reflex: objętość V_B i częstotliwość rezonansową F_B . Ze wzorów i nomogramów (zamieszczonych w [2], [3], [4]) wynikają następujące wartości: $V_B=75\text{dm}^3$, $F_B=35\text{Hz}$ (przykład z [4]).

W drugim etapie obliczamy podstawowy parametr obudowy labiryntowej – jej długość. Ponieważ obudowa będzie działać wykorzystując równocześnie zjawiska rezonansowe obudowy bass-reflex, więc nie zostanie wytłumiona tak, jak typowa linia transmisyjna:

$$L'_{TL} = L_{TL} = \frac{C}{F_S \cdot 4} = \frac{344}{25 \cdot 4} \approx 344\text{ cm}$$

Odległość od tylnej strony membrany do wylotu labiryntu powinna wynosić 3,4 m. Część tej drogi fala przebędzie w komorze o objętości 75 dm^3 , znajdującej się bezpośrednio za głośnikiem, większą część we właściwym labiryncie - kanale bass-reflex, wyprowadzonym z tej komory.

Ponieważ mamy do czynienia z dużym głośnikiem wymagającym dużej komory i długiego labiryntu, więc dla chociaż częściowej redukcji objętości całkowitej określamy powierzchnię wylotu labiryntu jako:

$$S_{WYL} = 0,75 \cdot S_D = 338\text{ cm}^2$$

zaś powierzchnię „wlotu” – początku kanału jako:

$$S_{WL} = 1 \cdot S_D = 450\text{ cm}^2.$$

Podstawowy wzór na długość kanału bass-reflex (L_V) przy określonych innych parametrach obudowy nie uwzględnia zjawiska zwężania się kanału.

Na skutek zwężania się kanału ku wylotowi (lub inaczej – rozszerzania się ku wylotowi), w tunelu drga masa powietrza, którą można obliczyć jako iloczyn średniego przekroju i długości tunelu. W podstawowym wzorze na długość tunelu nie można jednak zastąpić S_V średnią powierzchnią tunelu, gdyż S_V jest w tym wzorze związane zarówno z masą powietrza w tunelu, jak i z podatnością komory na działającą na jej objętość powierzchnię drgającą, którą w tym przypadku jest powierzchnia „wlotu” tunelu.

Ze względu na mniejszą masę powietrza w tunelu, niż wynikałoby to z dużej powierzchni wlotu, należy tunel wydłużyć proporcjonalnie do stosunku powierzchni wlotu do średniej powierzchni tunelu. Ostatecznie wzór:

$$L_V = \frac{3 \cdot 10^4 \cdot S_V}{V_B \cdot F_B^2} - 0,9 \cdot \sqrt{S_V}$$

przybiera postać:

$$L_V = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot S_{WL}^2}{(S_{WL} + S_{WYL}) \cdot V_B \cdot F_B^2} - 0,9 \cdot \sqrt{\frac{S_{WL} + S_{WYL}}{2}}$$

Długość labiryntu powinna wówczas wynosić:

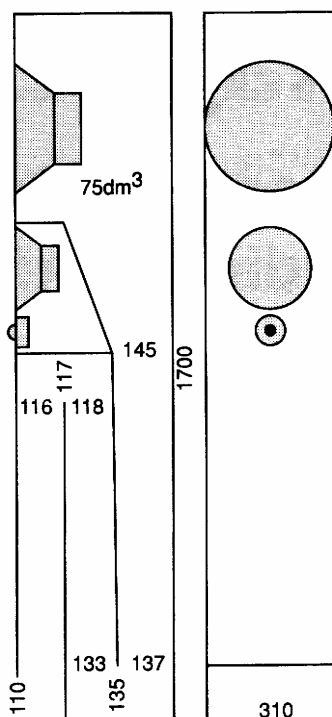
$$L_V = \frac{6 \cdot 10^4 \cdot 450^2}{(338 + 450) \cdot 75 \cdot 25^2} - 0,9 \cdot \sqrt{\frac{338 + 450}{2}} \approx 310 \text{ cm}$$

Ponieważ odległość od głośnika do wylotu labiryntu powinna wynosić 344 cm, więc odległość głośnika od wlotu labiryntu powinna wynosić ok. 34 cm. Gdyby przyjęty został większy przekrój labiryntu, np:

$$S_{WL} = 1,5 \cdot S_D, S_{WYL} = 1 \cdot S_D$$

wówczas musiałby on być proporcjonalnie dłuższy, przekraczając 344 cm

Żądane warunki – objętość komory $V_B = 75 \text{ dm}^3$, długości kanału bass reflex $L_V = 296 \text{ cm}$, powierzchni wlotu $S_{WL} = 450 \text{ cm}^2$, powierzchni wylotu $S_{WYL} = 375 \text{ cm}^2$, całkowitej długości labiryntu (od głośnika do wylotu) $L_{TL} = 344 \text{ cm}$ spełnia obudowa pokazana na rysunku 48. Uwzględniono również ok. 10-litrową komorę dla głośnika średniotonowego o średnicy 16...18 cm (odpowiedniego dla tak dużego głośnika niskotonowego).



Rys. 48. Labirynt – bass-reflex dla głośnika GDN 30/80

Przewaga powyższego projektu nad typowym bass-reflexem polega na tym, że poniżej częstotliwości rezonansowej bass-reflexu (35 Hz) nie następuje gwałtowny spadek charakterystyki częstotliwościowej. W typowej obudowie z otworem występuje w tym zakresie przeciwfaza promieniowania otworu i przedniej strony membrany – dzięki długiemu labiryntowi, w tym przypadku ponad 3-metrowemu, głośnik i otwór promieniają w przybliżeniu w zgodnych fazach aż do ok. 20 Hz. Całkowita objętość netto (suma objętości komory głośnika niskotonowego i tunelu) wynosi ok. 200 dm^3 i jest prawie trzykrotnie większa niż objętość typowej obudowy bass-reflex (765 dm^3). Ponad 120 dm^3 zajmuje labirynt – kanał bass-reflex.

Konstrukcja ta nie należy więc do „oszczędnych” i może być polecana do bardzo dużych pomieszczeń, gdzie wytwarzany przez nią monumentalny bas będzie mógł się w pełni rozwinąć. Warto natomiast próbować stosować podobny system dla głośników mniejszych, gdzie wzrost objętości z np. 30 dm^3 (bass-reflex) do 80 dm^3 (bass-reflex/labirynt) jest również proporcjonalnie duży, ale nie wyklucza możliwości praktycznej realizacji [9].

Literatura:

1. Elektronika Praktyczna nr 8/94
2. Elektronika Praktyczna nr 9/94
3. Elektronika Praktyczna nr 10/94
4. Elektronika Praktyczna nr 11/94
5. Elektronika Praktyczna nr 12/94
6. Elektronika Praktyczna nr 1/95
7. Elektronika Praktyczna nr 2/95
8. Elektronika Praktyczna nr 3/95
9. Elektronika Praktyczna nr 4/95