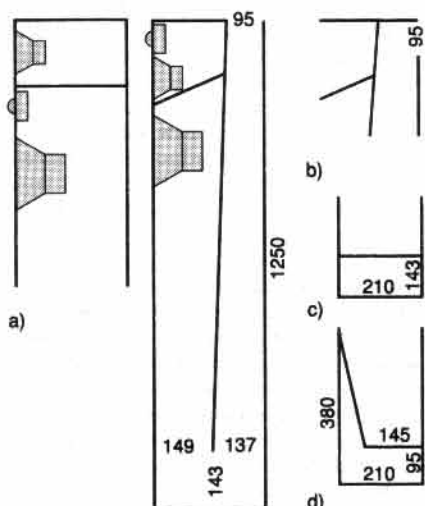


# Obudowy głośnikowe, część 9

## Obudowa labiryntowa

Po przedstawieniu w dwóch poprzednich odcinkach kursu teoretycznych podstaw projektowania obudów z "linią transmisyjną", przedstawiamy teraz konkretny projekt przypominając podstawowe wzory i kolejność obliczeń.



Rys. 1. "Linia transmisyjna" dla głośnika GDN 20/60/3 w układzie trójdrożnym

- zamiana miejscami głośników średnio- i wysokotonowego
- wylot labiryntu z tyłu obudowy
- typowy profil przegrody
- profil różnicujący długość labiryntu

Spśród 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, niewytłumiona 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 śred-

niotonowy, dla którego wystarczy komora o objętości 5dm<sup>3</sup>.

Podstawowe parametry GDN 20/60/2 są następujące:  
 częstotliwość rezonansowa głośnika swobodnie zawieszzonego  $F_s=36\text{Hz}$   
 całkowita dobroć głośnika swobodnie zawieszzonego  $Q_{TS}=0,45$   
 objętość ekwiwalentna  $V_{AS}=70\text{dm}^3$   
 efektywność (1W/1m)  $S_{PL}=87\text{dB}$   
 moc znamionowa  $P=60\text{W}$   
 impedancja znamionowa  $Z_{VC}=4\Omega$   
 rezystancja cewki głośnika  $R_C=3,5\Omega$   
 powierzchnia czynna membrany  $S_D=200\text{cm}^2$

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.

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

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

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

Skorygowana wartość dobroci całkowitej jest bliska optymalnej dla przeniesienia 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-Smalla  $V_{AS}$ . 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

spóżytkuje jego możliwości. Oznacza to, że długość labiryntu powinna być równa ćwierci fali o częstotliwości 36Hz. 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 niewytłumionego,  $L'_{TL}$  - skorygowana, rzeczywista długość labiryntu wytłumionego,  $C$  - prędkość dźwięku w powietrzu (344 m/s)

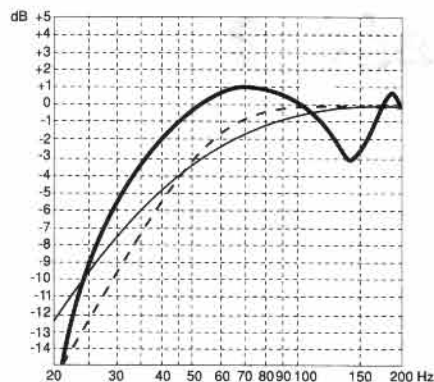
$$L'_{TL} = 0,9 \cdot \frac{344}{36 \cdot 4} = 2,15\text{m}$$

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

Łatwe uformowanie obliczonego kanału w funkcjonalnym kształcie wąskiej, wysokiej obudowy wolnostojącej jest pokazane na rysunku 1. Możliwe są tutaj dwie konfiguracje głośników średniotonowego i wysokotonowego (rys. 1a). 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 głośnikami 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. 1b), 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. 1c. Można również inaczej uformować przegrodę labiryntu, zmieniając kształt przekroju w miejscu jego załamania. Przegroda skośna (rys. 1d), różnicując drogę od tylnej strony membrany do wylotu tunelu, osłabia efekt rezonansów i antyrezonansów w wyższym zakresie częstotliwości.

Dokładne określenie wymiarów ze-



Rys. 2. Teoretyczne charakterystyki głośnika GDN 20/60/3 w nieskończenie wielkiej odgradzie (linia cienka), obudowie zamkniętej o objętości 64dm<sup>3</sup> (linia przerywana) i obudowie "linia transmisyjna" z rys. 1 (linia gruba)

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

Wytlumienie należy dobrać eksperymentalnie, zwracając uwagę na większą ilość materiału tłumiącego bezpośrednio za głośnikiem 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. wata.

Całkowita wewnętrzna objętość labiryntu wynosi ok. 64,5dm<sup>3</sup>. 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 64dm<sup>3</sup>.

$$Q_{TC} = Q_{TS} \sqrt{1 + \frac{V_{AS}}{V_C}}$$

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

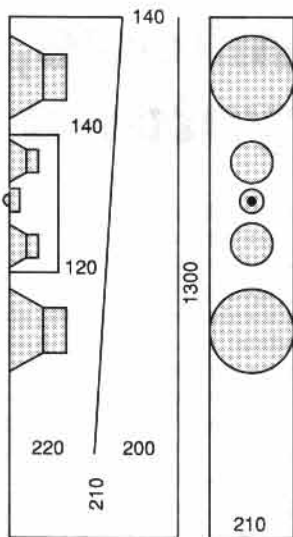
$$0,7 = 0,51 \sqrt{1 + \frac{70}{125 \cdot 64}}$$

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

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

$$F_C = 36 \sqrt{1 + \frac{70}{125 \cdot 64}} \approx 49\text{Hz}$$

Porównanie teoretycznych charakterystyk głośnika w nieskończenie wiel-



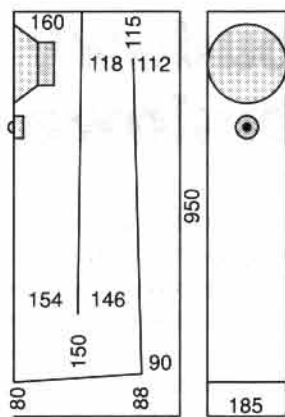
Rys. 3. Linia transmisyjna z dwoma głośnikami GDN 20/60/3 i symetryczną konfiguracją trójdrożną

kiej odgradzie ( $F_S = 36\text{Hz}/Q'_{TS} = 0,51$ ), obudowie zamkniętej 64dm<sup>3</sup> ( $F_C = 49\text{Hz}/Q_{TC} = 0,7$ ) i linii transmisyjnej 2,15m (64dm<sup>3</sup>) pokazano na **rysunku 2**.

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 160dm<sup>3</sup>, podczas gdy wymagania co do długości i całkowitej objętości labiryntu pozostają niezmiennione.

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 60cm, 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 (300cm<sup>2</sup>) przy powierzchni wlotu odpowiadającej ok. 1,5



Rys. 4. Linia transmisyjna dla głośnika SCAN-SPEAK 18W8535

sumy powierzchni membran (600cm<sup>2</sup>).

W takiej konstrukcji jeden głośnik może zostać umieszczony maksymalnie wysoko na przedniej ściance, 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 ściance można łatwo wykorzystać przez zainstalowanie głośnika średnionowego ze swoją komorą. Polecane jest użycie nawet dwóch głośników średnionowych, co stworzy w pełni symetryczny układ trójdrożny (głośnik wysokotonowy między średnionowymi). 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 3**.

Doskonałym, ale niestety bardzo drogim (ok. 600 zł/szt), jest głośnik duńskiej firmy Scan-Speak typu 18W 85 35. Ten niewielki głośnik o średnicy całkowitej tylko 177mm ma częstotliwość rezonansową  $F_S = 27\text{Hz}$  (!), właściwą głośnikom niskotonowym o średnicy 30cm. Pozostałe parametry:  $Q_{TS} = 0,45$ ,  $V_{AS} = 55\text{dm}^3$ ,  $\text{SPL} = 86\text{dB}$ ,  $P = 100\text{W}$ ,  $S_D = 150\text{cm}^2$ . Głośnik zachowuje liniowość pracy przy amplitudzie  $\pm 5\text{mm}$ , wytrzymując mechanicznie amplitudę  $\pm 10\text{mm}$  (!). 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:

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

Ze względu na niższą częstotliwość rezonansową odpowiednio dostrojony la-

biorynt 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.

Labirynt o długości 2,85m można uformować w tak prosty sposób jak poprzednio, umieszczając głośnik wysokotonowy 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 4.

W każdym miejscu załamania labiryntu korzystnie jest umieścić elementy ustawione pod kątem 45°, które zachowują będą żądany przekrój tunelu, a także przeciwdziałają 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 szczególnie związek parametrów głośnika może czasami pozwalać na stworzenie tak ciekawej konstrukcji.

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

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 rezonansowa  $F_B$ . Ze wzorów i nomogramów (EP 9, 10, 11/94) wynikają następujące wartości:  $V_B=75\text{dm}^3$ ,  $F_B=35\text{Hz}$  (przykład z EP 11/94).

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:

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

Odległość od tylnej strony membrany do wylotu labiryntu powinna wynosić 3,4m. Część tej drogi fala przebędzie w komorze o objętości  $75\text{dm}^3$ , znajdującej się bezpośrednio za głośnikiem, większą część we właściwym labiryntie - kanale bass-reflex, wprowadzonym 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 drgająca, 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:

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

przybiera postać:

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

Długość labiryntu powinna wówczas wynosić:

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

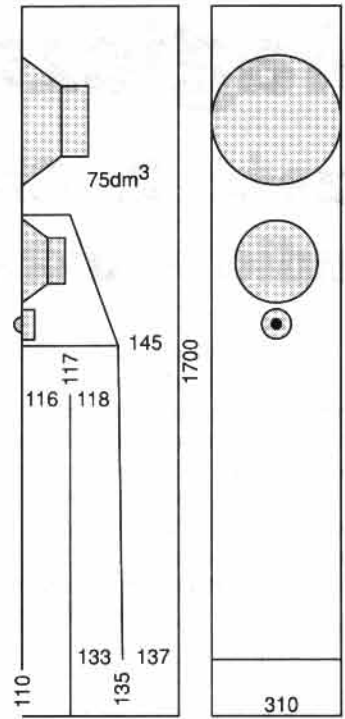
$$L_V \approx 310\text{cm}$$

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

$S_{WL}=1,5S_D$ ,  $S_{WYL}=1S_D$  wówczas musiałby on być proporcjonalnie dłuższy, przekraczając 344cm.

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 5. Uwzględniono również ok. 10-litrową komorę dla głośnika średniotonowego o średnicy 16...18cm (odpowiedniego dla tak dużego głośnika niskotonowego).

Przewaga powyższego projektu nad typowym bass-reflexem polega na tym, że poniżej częstotliwości rezonansowej bass-reflexu (35Hz) nie następuje gwałtowny spadek charakterystyki częstotliwościowej. W typowej obudowie z ot-



Rys. 5. Labirynt-bass-reflex dla głośnika GDN 30/80

worem występuje w tym zakresie przeciwfaza promieniowania otworu i przedniej strony membrany - dzięki długiemu labiryntowi, w tym przypadku ponad 3-metrowemu, głośnik i otwór promieniują w przybliżeniu w zgodnych fazach aż do ok. 20Hz. Całkowita objętość netto (suma objętości komory głośnika niskotonowego i tunelu) wynosi ok.  $200\text{dm}^3$  i jest prawie trzykrotnie większa niż objętość typowej obudowy bass-reflex ( $765\text{dm}^3$ ). Ponad  $120\text{dm}^3$  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.  $30\text{dm}^3$  (bass-reflex) do  $80\text{dm}^3$  (bass-reflex/labirynt) jest również proporcjonalnie duży, ale nie wyklucza możliwości praktycznej realizacji.

**Andrzej Kisiel**