

Kończymy cykl artykułów o projektowaniu obudów bass-reflex, rozpoczęty w EP 9/94. Do tego tematu wrócimy jeszcze publikacją projektu konkretnej obudowy.

# Obudowy głośnikowe część 4 Obudowa bass-reflex, dokończenie

## 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.

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

**GDN 30/80:**  
 $f_s = 25\text{Hz}$   
 $Q_{TS} = 0,24$   
 $V_{AS} = 270\text{dm}^3$

**GDN 30/100:**  
 $f_s = 25\text{Hz}$   
 $Q_{TS} = 0,37$   
 $V_{AS} = 270\text{dm}^3$

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...10mH, może mieć znaczącą wartość rezystancji 1Ω.

Przy rezystancji cewki głośnika  $R_C = 7\Omega$ , skorygowana wartość  $Q_{TS}$  według wzoru [12] wynosi

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

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. 4 (według Smalla):

$$\alpha = 3,6$$

$$h = 1,4$$

$$f_3/f_s = 1,8$$

$$V_B = V_{AS}/\alpha = 270/3,6 = 75\text{dm}^3$$

$$f_B = h \cdot f_s = 1,4 \cdot 25 = 35\text{Hz}$$

$$f_3 = 1,8 \cdot 25 = 45\text{Hz}$$

Dla powierzchni membrany  $S_D = 440\text{ cm}^2$  i maksymalnego zakładanego wychylenia  $X_{max} = 5\text{mm}$  wychylenie objętościowe (wg wzoru [6])

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

Zakładając, że otwór będzie okrągły, wzór [7] po przekształceniu określa minimalną średnicę otworu dla uniknięcia generacji szumów:

$$d_v > \sqrt{f_B \cdot V_D} = \sqrt{35 \cdot 200} = 88\text{ mm} \quad [14]$$

Przy średnicy  $d_v = 10\text{cm}$  wymagana długość tunelu może być wyliczona po przekształceniu wzoru [3] i [4]

$$L_v = \frac{23400 \cdot d_v^2}{f_B^2 \cdot V_B} - 0,73 \cdot d_v = \frac{23400 \cdot 10^2}{35^2 \cdot 75} - 0,73 \cdot 10 = 16\text{ cm} \quad [15]$$

### GDN 30/100

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

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

Zakładając  $Q_B = 7$ , parametry obudowy są następujące (rys. 4):

$$\alpha = 0,9$$

$$h = 0,95$$

$$f_3/f_s = 0,9$$

$$V_B = 300\text{dm}^3$$

$$f_B = 23,7\text{Hz}$$

$$f_3 = 22,5\text{Hz}$$

Dla średnicy otworu  $d_v = 10\text{cm}$  długość tunelu  $L_v$  (wzór [15]) wynosi 13,2cm.

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 50-100Hz oraz pogorsze-

nia 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  $f_C = f_3 = 41\text{Hz}$  musi mieć znaczną objętość 120...150dm<sup>3</sup> (w zależności od ilości materiału wyluminiącego).

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:

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

$$Q_{TS} = 0,27$$

$$V_{AS} = 40\text{dm}^3$$

### W 170NP:

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

$$Q_{TS} = 0,37$$

$$V_{AS} = 40\text{dm}^3$$

Ze względu na to, że stosowana w filtrze dolnoprzepustowym układu dwudrożnego (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. 4 wartości współczynników  $\alpha$ ,  $h$  i stosunku  $f_3/f_s$  obliczone zostały wartości:

$$V_B = 11\text{dm}^3$$

$$f_B = 56\text{Hz}$$

$$f_3 = 72\text{Hz}$$

### W 170NP

$$V_B = 27\text{dm}^3$$

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

$$f_3 = 48\text{Hz}$$

Głośnik WP 171, wymagając objętości tylko 11dm<sup>3</sup>, pozwala zaprojektować bardzo mały zespół głośnikowy, (tzw. „regalowy“), 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 zbrocze, dobrze poddające się takiej akustycznej korekcji. Przetwarzanie niskich częstotliwości może być wtedy zupełnie zadowalające.

Głośnik W170NP musi być zastosowany w większej obudowie, ale objętość 27dm<sup>3</sup> 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 [8], tab. 1). Zastosowano ją dla głośnika WP 171 i uzyskano następujące rezultaty:

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

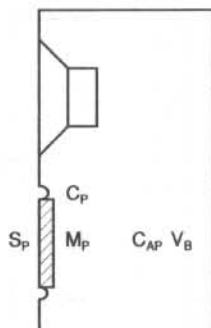
$$f_B = 0,42 \cdot f_S \cdot Q_{TS}^{-0,9} = 54,5 \text{ Hz}$$

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

Częstotliwość  $f_3$  obniżyła się o ok. 10%, co wymagało zastosowania obudowy większej o 3dm<sup>3</sup>.

### 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 [3] i [15]). 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 żądaną wartość częstotliwości rezonansowej należy jeszcze bardziej zwiększyć masę powietrza poprzez wydłużenie tunelu.



Rys. 10. Układ rezonansowy obudowy z membraną bierną:

$C_{AP}$  - podatność powietrza w obudowie,  $C_p$  - podatność zawieszki membrany biernej,  $V_B$  - objętość obudowy,  $S_p$  - powierzchnia membrany biernej,  $M_p$  - masa membrany biernej.

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 [7] i [14].

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 zawieszki, 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.

Podczas gdy masa powietrza w otworze zawieszona jest tylko na podatności powietrza w obudowie (rys. 1), masa membrany biernej zawieszona jest dodatkowo, jak membrana głośnika, na podatności własnych resorów. Ten dodatkowy element układu (podatność zawieszki 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 zawieszki membrany biernej są takie same jak stosowanego głośnika niskotonowe-

go. 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.

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 trzydecybelowego 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 żądaną częstotliwość rezonansową  $f_B$ , membrana bierna swobodnie zawieszona (bez podatności powietrza w obudowie) powinna mieć częstotliwość rezonansową  $f_p$ , którą można wyliczyć ze wzoru:

$$f_p = y \cdot f_S \quad [16]$$

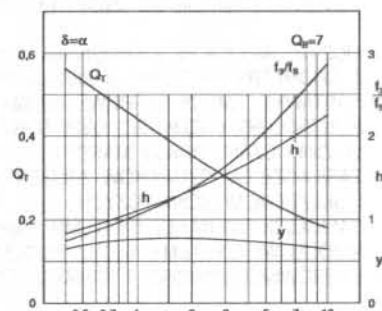
gdzie

$$y = \frac{h}{\sqrt{\alpha + 1}} \quad [17]$$

(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 zawieszki głośnika takiego typu jak zastosowany głośnik niskotonowy. Przy realizacjach amatorskich jako membraną bierną można stosować kompletny głośnik (wraz z układem magnetycznym). Wymaga to odpowiedniego dociążenia membrany w celu obniżenia częstotliwości rezo-



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.

nansowej ( $f_p < f_s$ ).

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

$$M_p = M_{MS} \cdot \left(\frac{f_s}{f_p}\right)^2 \quad [18]$$

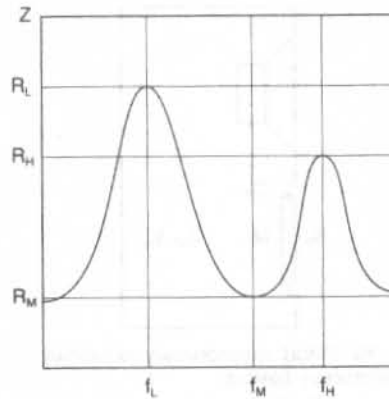
Masa membrany głośnika GDN 30/80 wynosi ok. 50g.

$$M_p = 50 \cdot (25/18,6)^2 = 90g$$

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



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

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  $f_M = f_B$ . Jest to podstawowa informacja dla konstruktora zespołu głośnikowego, umożliwiającą zweryfikowanie dostrojenia otworu.

Podczas gdy

$$h = f_M/f_s,$$

współczynnik  $\alpha$  można obliczyć znając

także częstotliwości  $f_L$  i  $f_H$ .

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

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

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  $Q_B \geq 7$  mamy  $R_M = R_C$ .

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 Boltzmanna: "Nie ma rzeczy bardziej praktycznej niż dobra teoria". Przydatność przedstawionej teorii przetestujemy niebawem w publikacji poświęconej zaprojektowaniu konkretnej obudowy bass-reflex.

**Andrzej Kisiel**