

# Niezbędnik dla amatorów i profesjonalistów

## W głośnikowym żywiolu, część 12

### Obudowy bas-refleks, część 4

*Poprzedni odcinek cyklu, poświęcony konstruowaniu obudów bas-refleks, zakończyliśmy następującymi wnioskami: nie dysponując programami komputerowymi ustalającymi dla dowolnego strojenia charakterystyki impulsowe i obciążenia amplitudowego, musimy zdać się na przedstawione miesiąc temu tabele i ogólne wskazówki. Stosowanie się do nich pozwoli zrealizować strojenie poprawne, chociaż niekoniecznie najlepsze z możliwych. Strojenie niekonwencjonalne, ale oparte na śledzeniu wszystkich charakterystyk, może okazać się jeszcze lepsze. Takimi eksperymentami zajmiemy się jednak za dwa miesiące, a w ciągu dwóch najbliższych odcinków przedstawimy sposoby obliczenia parametrów samego tunelu, dla danej częstotliwości rezonansowej i objętości obudowy.*

#### W tunelu i w obudowie

Przypomnijmy w skrócie procedurę – dysponując głośnikiem o danej wartości  $Q_{ts}$  (skorygowanej ze względu na rezystancje szeregowy), wybieramy jeden z dostępnych dla tej dobroci modeli strojenia. Współczynnik alfa pozwala obliczyć objętość obudowy (musimy w tym celu znać  $V_{AS}$ ), a współczynnik H częstotliwość rezonansową systemu bas-refleks. Częstotliwość rezonansowa obudowy, jak już wiemy, zależy od podatności (powietrza w obudowie) i masy (powietrza w otworze). Przypomnijmy też, jeszcze z zajęć poświęconych obudowie zamkniętej, że podatność powietrza w obudowie zależy nie tylko od jego objętości, ale i od powierzchni, jaka na nią działa – im jest ona większa, tym podatność jest mniejsza. Dlatego, im większa powierzchnia otworu, tym mniejsza podatność powietrza w obudowie o danej objętości, a w ślad za tym wyższa częstotliwość rezonansowa. Z drugiej jednak strony, im większa powierzchnia otworu przy tunelu o danej długości, a większa masa drgająca powietrza, a więc... niższa częstotliwość rezonansowa. Ostatecznie jednak wzrost powierzchni otworu powoduje wzrost częstotliwości rezonansowej, ponieważ na zmniejszenie

podatności wpływa on w drugiej potęgzie, a na zwiększenie masy liniowo.

Mając określoną objętość obudowy, możemy regulować częstotliwość rezonansową obudowy zmianami powierzchni otworu i zainstalowanego w nim tunelu. Z tego wynika, że  $x$ -razy większa powierzchnia otworu będzie wymuszała około  $x$ -razy większą długość tunelu (rys. 44). Układ bas-refleks może funkcjonować i bez tunelu, i czasami konstrukcje takie można spotkać. Chociaż i sama grubość ścianek obudowy tworzy tunel, to nawet przy nieskończeniu cienkich ściankach (czyli przy nieskończeniu krótkim tunelu), pojawi się masa drgająca w otworze – będzie ona miała kształt „soczewki”. Wybrzuszenie powietrza drgającego po obydwu stronach otworu pozostaje i przy założonym tunelu i powoduje wprowadzenie we wzorach odpowiedniej poprawki, zwanej poprawką wlotu i wylotu.

Wzór określający z dobrym przybliżeniem częstotliwość rezonansową obudowy bas-refleks, w zależności od jej objętości, powierzchni otworu i długości tunelu, jest następujący:

$$f_b = 7500 \cdot \sqrt{\frac{S_v}{V_b \cdot (2 \cdot L_v + 0,5 \cdot \sqrt{\pi \cdot S_v})}}$$

gdzie:

$V_b$  – objętość obudowy [ $\text{cm}^3$ ]

$L_v$  – długość tunelu [cm]

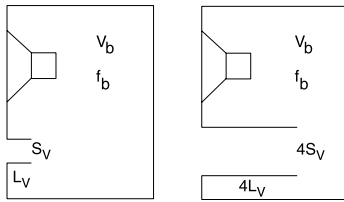
$S_v$  – powierzchnia tunelu [ $\text{cm}^2$ ]

Przy określonej objętości obudowy, zadaną częstotliwość rezonansową możemy więc osiągnąć różnymi kombinacjami powierzchni otworu i długości jego tunelu. Co jest lepsze – mały otwór z krótkim tunelem czy duży otwór z długim tunelem? Najlepszy byłby duży otwór z krótkim tunelem... otwierają się kolejne zagadnienia.

#### Otwór duży czy mały?

Niegdyś dość rozpowszechnione było mniemanie, że duże otwory, spotykane np. w konstrukcjach estradowych, pracują efektywniej, ale bardziej zaznaczają zjawisko rezonansu bas-refleks i w ślad za tym są narażone na gorsze charakterystyki impulsowe, a małe otwory są rozwiązaniem „delikatniejszym”, lepiej dostosowanym do wysokiej klasy urządzeń hi-fi. Powody stosowania mniejszych otworów w domowych zespołach głośnikowych są jednak zupełnie inne.

Duża powierzchnia tunelu jest jednoznacznie korzystna ze względu na liniowość pracy układu rezonansowego. Tym razem nie chodzi o liniowość częstotliwościowej charakterystyki przetwarzania, ale o liniowość w funkcji mocy. Otwór powinien przenosić zawartą w nim masę powietrza bez zahamowań, a te powstają, jeżeli wymuszamy zbyt duże prędkości przepływu. Otwór większy pod tym względem zawsze będzie lepszy, zwłaszcza jeżeli bierzemy pod uwagę wykorzystywanie głośnika w pełnym zakresie dopuszczalnych dla niego wychyleń. Dopiero bardzo duże otwory, o powierzchni  $1/4$  powierzchni głośnika i większe, pozwalają uznać problem nieliniowości za rozwiązany. Ale poziom zniekształceń generowanych przez nieliniowość działania układu rezonansowego zależy od tego, w jakim podzakresie



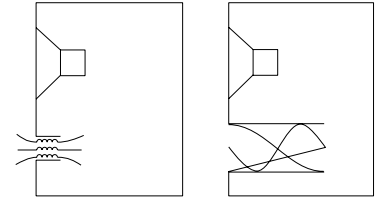
Rys. 44. Taką samą częstotliwość rezonansową obudowy o określonej objętości możemy uzyskać za pomocą otworów i tuneli o różnych wymiarach. Dla utrzymania określonej częstotliwości rezonansowej, wraz ze zwiększaniem powierzchni otworu, należy proporcjonalnie zwiększać długość tunelu

wychyleń membrany się znajdujemy; jeżeli więc mając duży głośnik o dużej amplitudzie liniowej, najczęściej używamy go do słuchania przy umiarkowanych poziomach występowania, to możemy stosować mały otwór, bo problemy „przesterowania” układu rezonansowego nie będą się często ujawniały. W opozycji do tej sytuacji są właśnie instalacje nagłośnieniowe, które bezwzględnie wymagają dużych otworów, gdyż często pracują na „pełnych obrotach”. Dlaczego jednak, na wszelki wypadek, nie stosuje się dużych otworów również w konstrukcjach do użytku domowego? Już się domyślamy, dlaczego: nie z powodu ich nadmiernej „rezonansowości”, bo takie zjawisko nie istnieje (o ile ustalona jest prawidłowa częstotliwość rezonansowa w obudowie o prawidłowej objętości), ale z konieczności – bezkompromisowo duży otwór bardzo często wymuszałby zastosowanie bardzo długiego tunelu (dla ustalenia określonej częstotliwości rezonansowej w obudowie o określonej objętości), trudnego do zrealizowania w praktyce. Oczywiście, jeżeli powiększymy otwór, nie wydłużając tunelu, to przesuniemy w górę częstotliwość rezonansową, i jeżeli wcześniej była ona prawidłowa, to teraz będzie za wysoka, a za wysoka częstotliwość rezonansowa pogarsza zarówno charakterystykę przetwarzania, wywołując na niej podbicie, jak i charakterystykę impulsową. Zamieszczony niegdyś w książce A. Witorta „Głośniki i zespoły głośnikowe” (WKiŁ 1976) rysunek zatytułowany „charakterystyki przenoszenia w zależności od wymiarów otworu”, pokazujący zwiększające się podbicie na charakterystyce wraz ze zwiększaniem powierzchni otworu, poważnie wpro-

wadzał w błąd – bezpośrednim powodem tego podbicia było przestranianie obudowy w stronę wyższych częstotliwości rezonansowych, a nie zwiększanie powierzchni otworu. Na marginesie można jeszcze dodać, że małe otwory, właśnie na skutek swojej „niewydolności”, są pomocne w ograniczeniu wychyleń membrany przy najniższych częstotliwościach obudowy. Niezdolne do przeniesienia dużej masy powietrza, hamują jego ruch w całym układzie, i poprzez to hamują ruch samej membrany. Oczywiście właśnie to jest równocześnie powodem powstawania zniekształceń.

### Rezonanse pasożytnicze

Na otwory o umiarkowanej powierzchni nie należy się jednak obrażać. Niezależnie od kłopotów z zainstalowaniem długich tuneli, tunele takie wprowadzają swoje własne problemy – pasożytnicze rezonanse „piszczalkowe”. Jeżeli tunel jest dłuższy od swojej średnicy, zaczyna być narażony na powstawanie w nim fal stojących między wlotem i wylotem – właśnie rezonansów „piszczalkowych” (rys. 45). Przypomnijmy, że dla utrzymania określonej częstotliwości rezonansowej, wraz z powiększeniem powierzchni otworu, musimy proporcjonalnie wydłużyć tunel. Ale dwukrotne zwiększenie powierzchni otworu oznacza zwiększenie jego średnicy tylko o pierwiastek z dwóch i jeżeli równocześnie wydłużamy dwukrotnie tunel, to stosunek średnicy i długości tunelu ulega zmniejszeniu, czyli pogorszeniu ze względu na podatność na fale stojące. Istotny jest nie tylko stosunek średnicy otworu do długości tunelu, określający narażenie takiego ustroju akustycznego na powstawanie w nim fal stojących, ale i sama długość tunelu, określająca, w jakim zakresie częstotliwości zjawiska rezonansowe mogą zaistnieć. Należy to skonfrontować z zakresem częstotliwości, w jakim pracuje głośnik. Jeżeli projektujemy obudowę dla subwoofera, który będzie pracował najwyżej do 150 Hz, to potencjalne rezonanse leżące powyżej nie muszą nas interesować – nie będą powstawać, bowiem nie będą pojawiały się sygnały, które mogłyby je pobudzać. W takiej sytuacji tunel może mieć długość nawet metra, bowiem półfalowy rezonans przypada

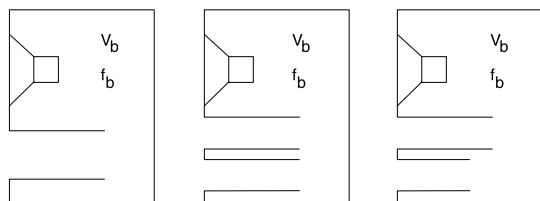


Rys. 45. W otworach o bardzo małej powierzchni (w stosunku do powierzchni membrany głośnika), na skutek wymuszania dużych prędkości przepływu powietrza, pojawia się zjawisko kompresji i nieliniowość działania układu rezonansowego, ale w tunelach znacznie dłuższych niż średnica otworu powstają rezonanse pasożytnicze

w nim na ok. 170 Hz. Jeżeli jednak chcielibyśmy uniknąć rezonansów piszczałkowych w obudowach głośników nisko-średniotonowych, wówczas zakładając, że zakres ich pracy sięga do ok. 3 kHz, tunel nie powinien mieć więcej niż 6 cm – warunek bardzo kłopotliwy, bowiem zwykle z obliczeń, wraz z „przyzwolitą” powierzchnią otworu, wynikają jednak większe długości. Starajmy się wtedy uniknąć następnego rezonansu, pojawiającego się wraz z ułożeniem się w tunelu całej fali, która dla 3 kHz ma długość ok. 12 cm. Często i to jest trudne do spełnienia. Ostatecznie jednak rezonanse pasożytnicze w tunelach są uznawane za mniej szkodliwe niż silna kompresja powodowana przez zdecydowanie zbyt małe otwory. Należy więc szukać kompromisu. Czasami będzie się on wiązał z lekkim przestrojeniem obudowy w kierunku częstotliwości wyższych, co ułatwia założenie większego otworu przy krótszym tunelu, ale bez kontroli charakterystyk za pomocą symulacji komputerowych nie należy tym sposobem wykraczać dalej niż o 15% wobec wartości wynikających z obliczeń. Trudności w realizacji otworu i tunelu mogą też być powodem dokonania wyboru określonego modelu strojenia, który okaże się pod tym względem najmniej wymagający.

### Liczba otworów

Jedną z płonnych nadziei rozwiązania tych problemów jest koncepcja stosowania większej liczby mniejszych otworów, które jakoby pozwolą „oszukać” obudowę – gdyby liczyć dostrojenie każdego otworu z tunelem oddzielnie, a potem dowolnie zwiększać ich liczbę dla



Rys. 46. Zamiast jednego otworu, można zastosować kilka mniejszych, i ewentualnie różnicować długość ich tuneli, co pomoże rozproszyć częstotliwości rezonansów pasywnych, ale nie pozwoli uzyskać z jednej obudowy różnych częstotliwości rezonansowych bas-refleks

zwiększenia całkowitej powierzchni... Oczywiście obudowa oszukać się nie da, „widzi” ona od razu całkowitą powierzchnię otworów i do niej „dostosowuje” swoją podatność. Tak samo nie można bez konsekwencji zainstalować kilku głośników w obudowie, której objętość została policzona dla jednego. Inny nieskuteczny pomysł polega na zastosowaniu kilku różnych częstotliwości rezonansowych z jednej obudowy – otwory mają więc różną średnicę, albo choćby różnej długości tunele, co miałyby każdy z nich dostrajać do innej częstotliwości rezonansowej, a korzyść z tego płynąca miałaby polegać na osiągnięciu równomiernej charakterystyki przetwarzania (tak jakby z dobrze dostrojonego pojedynczego bas-refleksu nie można było tego uzyskać). Tutaj błąd w rozumowaniu jest podobny – powstaje bowiem jeden układ rezonansowy, o podatności określonej przez objętość obudowy i sumę powierzchni otworów, i masę drgającej będącej sumą mas powietrza we wszystkich otworach (rys. 46).

Zastosowanie kilku mniejszych otworów zamiast jednego dużego nie jest jednak błędem i w niektórych sytuacjach może przynieść pewne korzyści. Zanegowaliśmy możliwość uzyskania tą drogą różnych częstotliwości rezonansowych systemu bas-refleks, ale przy różnej długości tunelach jak najbardziej możliwe jest przecież uzyskanie różnych

częstotliwości rezonansów piszczalkowych, czyli ostatecznie ich rozproszenie, co jest korzystne. Obliczenie systemu zawierającego kilka otworów o takiej samej powierzchni, ale z tunelami o różnej długości, jest bardzo łatwe – w obliczeniach uwzględniamy całkowitą powierzchnię otworów i średnią arytmetyczną długości tuneli.

Stosowanie kilku mniejszych otworów może być też czasem dyktowane miejscem, jakie mamy do dyspozycji, zwłaszcza w przypadku małych konstrukcji podstawkowych, gdy otwór (otwory) chcemy wyprowadzić na przedniej ścianie.

Rzeczywistym i radykalnym rozwiązaniem omawianego wcześniej problemu kłopotliwie długiego tunelu, lub niekorzystnie małego otworu dla uzyskania określonej częstotliwości rezonansowej, jest zastosowanie membrany biernej, którą zajmiemy się później.

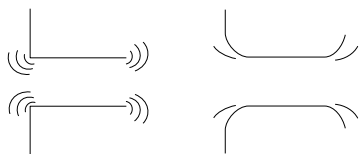
### Kształt otworu

Najczęściej spotykane są otwory okrągłe. Ich podstawową zaletą akustyczną jest najlepszy stosunek powierzchni do obwodu, co oznacza, że możliwie najmniejsza część przepływającego powietrza znajduje się w pobliżu ścianek otworu, gdzie powstają szумы i turbulencje. Dopuszczalne są jednak i inne kształty otworów, chociaż w przypadku otworów o kształcie szczelin, ze względu na trudną do obliczenia masę powietrza „przyklejającego” się do ścia-

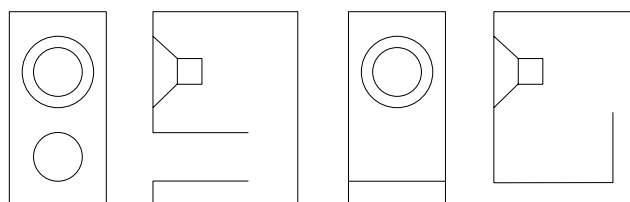
nek tunelu, częstotliwość rezonansową tak konstruowanego bas-refleksu trudno jest obliczyć i bezwzględnie należy przeprowadzić pomiary. Jednocześnie korygowanie długości tunelu zbudowanego w takiej postaci jest trudniejsze niż w przypadku tuneli okrągłych, gdzie otwory kupione jako gotowe elementy możemy z łatwością wymować i wymieniać (ewentualnie nasadzać na nie przedłużenia). Zalety otworów okrągłych spowodowały właśnie, że obecnie dostępny jest bardzo duży ich asortyment, o różnych średnicach, długościach, sposobach mocowania i wyprofilowaniach. Wyprofilowanie wylotu w postaci zaokrąglenia krawędzi stało się modne ok. dziesięciu lat temu, a obecnie jest w zasadzie obowiązkowe. Istotnie, wyprofilowanie takie jest korzystne nie tylko estetycznie i teoretycznie – znacznie zmniejsza turbulencje, jakie powstają na krawędziach, ale warto zwrócić uwagę na to, aby zostało wykonane na obydwu końcach tunelu (rys. 47). Wykonanie ładnego wyprofilowania własnym sumptem przy otworze innym niż okrągły w warunkach amatorskich nie będzie łatwe. Natomiast spotykane czasami lekko stożkowe przekroje tuneli („wylot” ma powierzchnię o kilkadziesiąt procent większą niż „wlot”), mające zapobiegać powstawaniu wcześniej omawianych rezonansów piszczalkowych, nie są skuteczne, chociaż żadnej szkody nie przynoszą.

Ostatecznie stosowanie otworów innych niż okrągłe powinno być konkretnie umotywowane; w standardowym przypadku otwory okrągłe będą najlepsze i najwygodniejsze. Otwory prostokątne, z tunelami ukształtowanymi jak krótkie labirynty (biegnące wzdłuż dolnej ścianki, a z tyłu zaginające się do góry wzdłuż tylnej) ułatwiają uzyskanie długich tuneli, ale jak wspomniano, są trudne do obliczenia (rys. 48).

**Andrzej Kisiel**



Rys. 47. Na ostrych krawędziach otworu powstają szумы turbulencyjne, wyprofilowania na obydwu końcach tunelu pozwalają znacząco zredukować to zjawisko



Rys. 48. Najbardziej rozpowszechniony jest otwór okrągły, łatwy do obliczenia i ułatwiający eksperymenty z dostrojeniem poprzez wymianę tuneli. Otwór prostokątny, wykonany jako szczelina bezpośrednio przy dolnej ścianie obudowy, ułatwia ukształtowanie długiego tunelu – labiryntu