

# Obudowy głośnikowe, część 7

## "Linia transmisyjna"

*"Linia transmisyjna" uznawana jest przez wielu za obudowę stwarzającą najlepsze warunki pracy dla głośnika niskotonowego, a przez to zapewniającą bardzo dobre przetwarzanie niskich częstotliwości, choć tak jak w przypadku każdego innego rodzaju obudowy, możliwości i skuteczność jej działania zależą od właściwości stosowanego głośnika niskotonowego i umiejętności konstruktora.*

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 kilkilitrowych, 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 przezwyciężenia, 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.

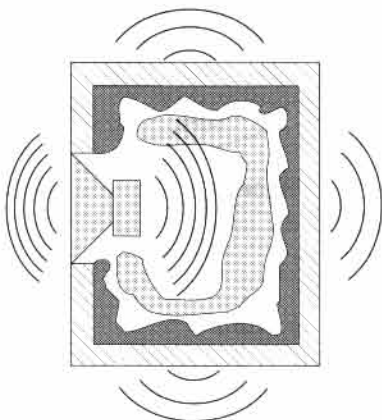
### Zasada działania

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.

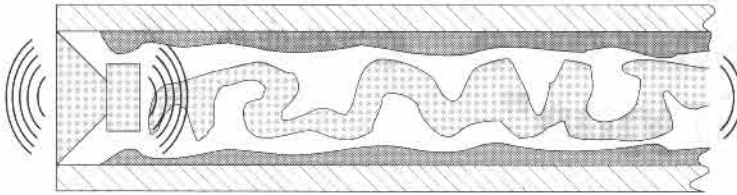
Obudowa typu bass-reflex, wykorzystując pewne zjawiska rezonansowe, potrafi wypromieniować energię tylnej strony membrany w fazie zgodnej z promieniowaniem strony przedniej, w pewnym zakresie częstotliwości niskich. Obarczona jest wadami (słabiej lub mocniej zaznaczonymi) pogorszenia właściwości impulsowych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

Obudowa zamknięta w prosty sposób tłumi energię promieniowaną przez tylną stronę membrany (rys. 1). 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 zawieszonych 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.

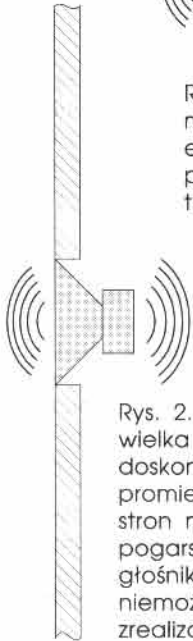
Problem tylnej strony membrany znajduje doskonałe rozwiązanie, ale niestety tylko w teorii. Nieskończenie wielka odgroda, która separuje energię przedniej i tylnej strony membrany, nie zmieniając parametrów głośnika, pozostaje poza możliwością



Rys. 1. Obudowa zamknięta, mimo obecności materiałów wyciszających i grubych ścianek, nie do końca absorbuje energię promieniowaną przez tylną stronę membrany, co powoduje drgania ścianek i zniekształcenia w przetwarzaniu samego głośnika.



Rys. 3. 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”.

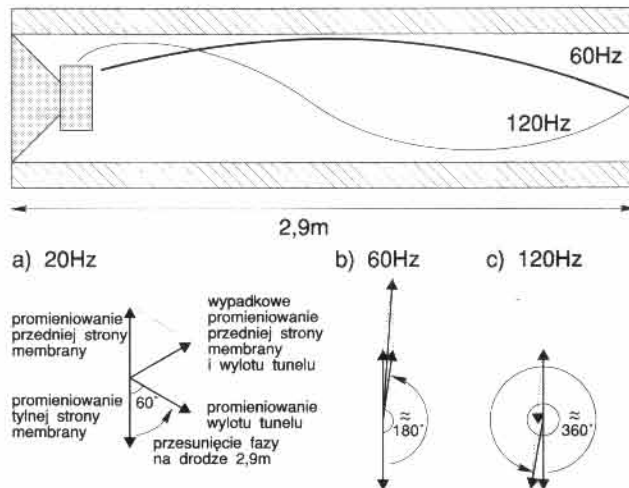


Rys. 2. Nieskończenie wielka odgroda doskonale separuje promieniowanie obydwu stron membrany nie pogarszając parametrów głośnika, ale jest niemożliwa do zrealizowania w praktyce.

praktycznej realizacji (rys. 2). Linia transmisyjna ma swoim działaniem przypominać funkcjonowanie nieskończenie wielkiej odgrody. Uformowany za głośnikiem długi tunel, wypełniony materiałem tłumiącym, ma za zadanie zaabsorbować całość energii promieniowanej przez tylną stronę membrany (rys. 3). Takie są założenia idealnej linii transmisyjnej, które do końca nie są spełnione w praktyce. Tunel nie jest nieskończenie długi i nie jest zdolny wytlumić 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.

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 20Hz, tunel musiałby mieć długość połowy długości fali tej częstotliwości, a więc ok. 8,6m (przyjmując prędkość dźwięku w powietrzu 344m/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. 4). Dla 20Hz odpowiednia temu warunkowi długość tunelu wynosi już tylko ok. 2,9m. Oczywiście, maksymalne wypadkowe promieniowanie wystąpi przy przesunięciu bliskim 180° (rys. 4), czyli przy częstotliwości trzy razy wyższej - ok. 60Hz i spowoduje uwypuklenie tego zakresu częstotliwości na charakterystyce częstotliwościowej (rys. 5). Przesuwając się wyżej na skali częstotliwości doświadczamy poważnych problemów związanych z funkcjonowaniem tunelu. Przy częstotliwości dwa razy wyższej od 60Hz (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 60Hz) i antyrezonanse (przeciwnie fazy, parzyste wielokrotności 60Hz) zakłócają liniowość charakterystyki w całym paśmie przetwarzanym przez głośnik.

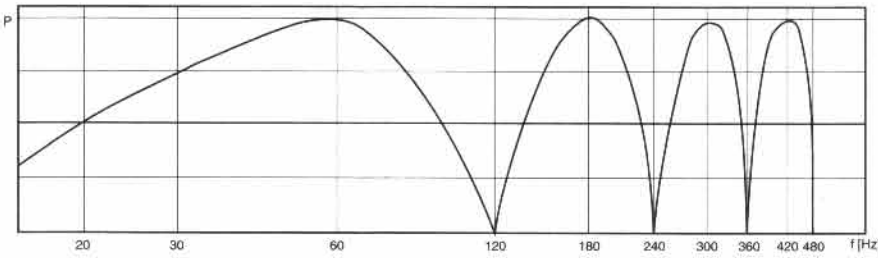


Rys. 4. W tunelu o długości 2,9 m nastąpi przesunięcie fazy fali promieniowanej przez tylną stronę membrany o 60° dla częstotliwości 20Hz (a), 180° dla 60Hz (b), 360° dla 120Hz (c).

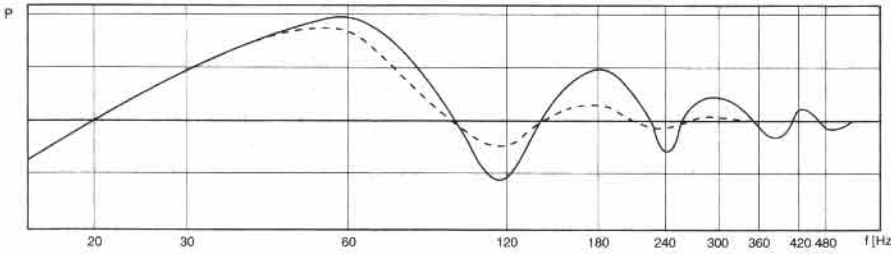
Wytlumienie tunelu, będące integralną częścią linii transmisyjnej, jest mało skuteczne dla zaabsorbowania fal najniższych częstotliwości. Spełnia ono znacznie lepiej swoją rolę przy częstotliwościach nieco wyższych, już od kilkuset Hz.

Praktyczną linię transmisyjną można więc uznać za niedoskonałą realizację idealnej linii transmisyjnej (nieskończenie wielkiej odgrody), w której wytłumienie 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. 6). Rzeczywiste działanie dobrze zaprojektowanej i wykonanej linii transmisyjnej może być więc lepsze od „idealnej” linii transmisyjnej, gdyż pojawia się również zys 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 wytłumienie pierwszego antyrezonansu, leżącego w zakresie stukilkudziesięciu Hz (w naszym przykładzie 120Hz). Jego obecność najczęściej zaznacza się na charakterystykach częstotliwościowych, podczas gdy zjawis-



Rys. 5 Wyпадkowa charakterystyka częstotliwościowa układu przednia strona membrany - wylot tunelu, odniesiona do charakterystyki samego głośnika, przy tunelu nie wytłumionym o długości 2,9m.



Rys. 6 Charakterystyka częstotliwościowa przy tunelu wytłumionym (stabo - linia ciągła, mocniej - linia przerywana), odniesiona do charakterystyki samego głośnika.

UWAGA: Rzeczywista charakterystyka głośnika nie jest płaska, lecz ma kształt zgodny (teoretycznie) z krzywymi przedstawianymi na rys. 7. Stąd też i rzeczywiste charakterystyki układu związane są z tymi krzywymi.

ka rezonansowe 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  $f_s = 30\text{Hz}$  odpowiednia długość tunelu wynosi 2,9m (długość fali 30Hz - 11,5m)

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 zawie-

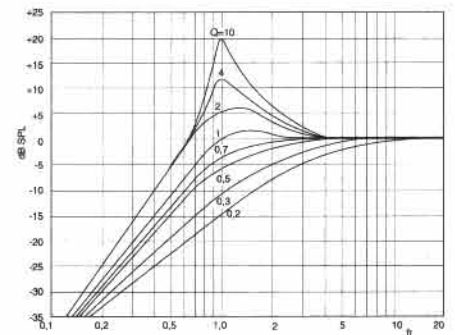
szony na poduszce powietrznej np. obudowy zamkniętej. W linii transmisyjnej głośnik jest zawieszony swobodnie i zjawisko wzrostu częstotliwości rezonansowej i dobroci nie występuje.

Jeden z najważniejszych parametrów głośnika, którego wartość wyznacza możliwość zastosowania i parametry obudowy zamkniętej, a zwłaszcza *ca* 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 odgródka nie zmienia parametrów głośnika swobodnie zawieszonogo, 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. 7). Tak więc dobroć  $Q_{TS}$  głośnika niskotonowego swobodnie zawieszonogo powinna zawierać się w tych granicach (dla obudowy zamkniętej  $Q_{TS}$  musi być niższa, gdyż ulegnie zwiększeniu na skutek działania poduszki powietrznej).

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.

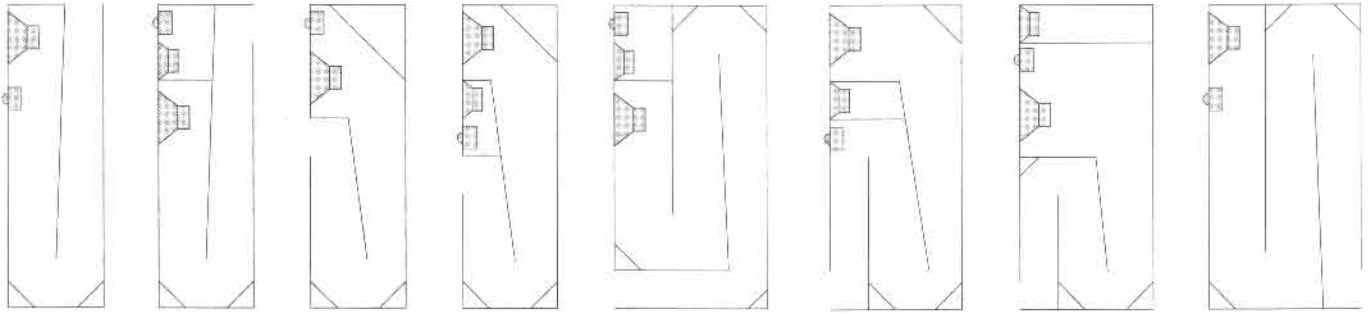
Wysoka wartość dobroci jest często związana z małym układem magnetycznym - są to głośniki zwykle tańsze od wyposażonych w silne magnesy głośników przeznaczonych do obudów typu bass-reflex. Jednak te ostatnie, o niskiej wartości dobroci również znajdują zastosowanie w liniach transmisyjnych. Im niższa 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. 6), 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. 6 do charakterystyk z rys. 7, 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



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa głośnika dla różnych wartości dobroci





Rys. 8 Przykładowe, schematyczne konstrukcje linii transmisyjnych dla układów dwudrożnych i trójdrożnych.

całej obudowy nie stanowiłoby problemem. 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 radsze), wymaga dla osiągnięcia przyzwoitego poziomu efektywności również zastosowania dużych układów magnetycznych, tak jak w przypadku głośników o niskiej doborci 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 zwać 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 ze-

spółów blisko ścian. Zlokalizowany na dole obudowy, zwłaszcza z tyłu, może wymagać odsunięcia od ścian, gdyż w przeciwnym wypadku, na skutek zwiększonej reakcji 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. 8. 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.

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 przesunął się wraz z powstającym w tunelu ciśnieniem akustycznym.

Za najlepszy materiał do tego celu uznaje się długowłosa 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

obudów 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 - pokazujemy oryginalne i nietypowe rozwiązania, które wykraczają poza ramy powyższych podstawowych założeń, a ponadto przedstawimy własny projekt linii transmisyjnej.

**Andrzej Kisiel**