

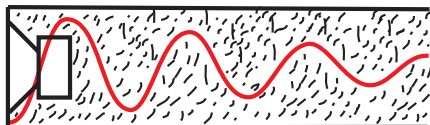
Niezbędnik dla amatorów i profesjonalistów

W głośnikowym żywiole, część 21

Linia transmisyjna, część 1. Obudowa na dobre zakończenie

Na koniec cyklu poświęconego obudowom głośnikowym przedstawimy „linię transmisyjną” – typ obudowy spotykany dzisiaj w praktyce bardzo rzadko, ale nadal pamiętany i rozważany przez hobbistów pragnących zaprojektować ambitną, „audiofilską” konstrukcję.

Linia transmisyjna nigdy nie była dominującym typem obudowy, a dzisiaj należy do egzotyki, lecz mimo to zachowała w świadomości konstruktorów wysoki status. W stosunku do liczby wyprodukowanych obudów tego typu, ukazało się na jej temat dość dużo opracowań, które jednak nie wyjaśniają do końca nawet najważniejszych problemów związanych z jej projektowaniem. Pojawiało się wiele „cudownych” rozwiązań, ale próby powtórzenia sukcesów opisywanych przez niektórych autorów i przeniesienia ich na grunt symulacji komputerowych nie dały zadowalających wyników. Stąd też linia transmisyjna pozostaje obszarem, na którym w wielkiej mierze obowiązuje metoda prób i błędów, a nie kilka wzorów i tabel. Ostateczny rezultat jest niepewny, zależy od intuicji, szczęścia, a także wytrwałości konstruktora w poszukiwaniu najlepszego dostrojenia. Dlatego w linii transmisyjnej było i jest tak wiele „audiofilskiej magii”, która wymyka się usystematyzowanej i ścisłej wiedzy technicznej. Ale właśnie to, co kusi amatorów i poszukiwaczy głośnikowych przygód, zniechęca zawodowców i firmy głośnikowe – które dobre i przewidywalne charakterystyki mogą dzisiaj bezpiecznie i szybko osiągać za



Rys. 104. Idealna linia transmisyjna – całkowicie wytłumia promieniowanie od tylnej strony membrany, nie zmieniając wyjściowych parametrów układu rezonansowego głośnika

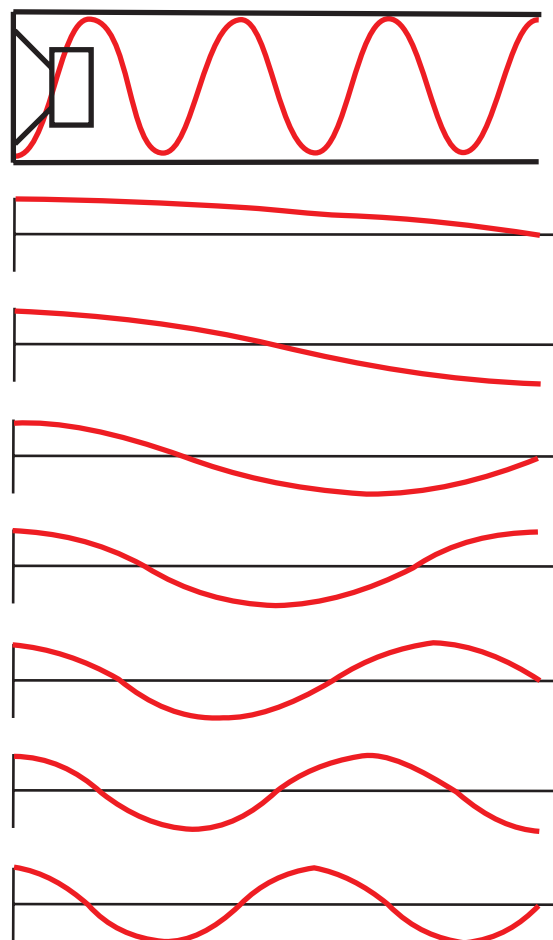
pomocą prostszych zarówno pod względem obliczeniowym, jak i konstrukcyjnym, obudów z otworem (bas – refleks). Linia transmisyjna pozostała *idee – fix* dla idealistów nie przeliczających na pieniądze swojego czasu i wysiłku. Chodzi jednak przecież przede wszystkim o to, czy ten czas i wysiłek zaowocuje lepszym brzmieniem niż ze „zwykłej” obudowy (zamkniętej lub z otworem). Najostrożniej można powiedzieć, że pewne fakty wskazują na to, że warto spróbować...

Nowa nadzieja

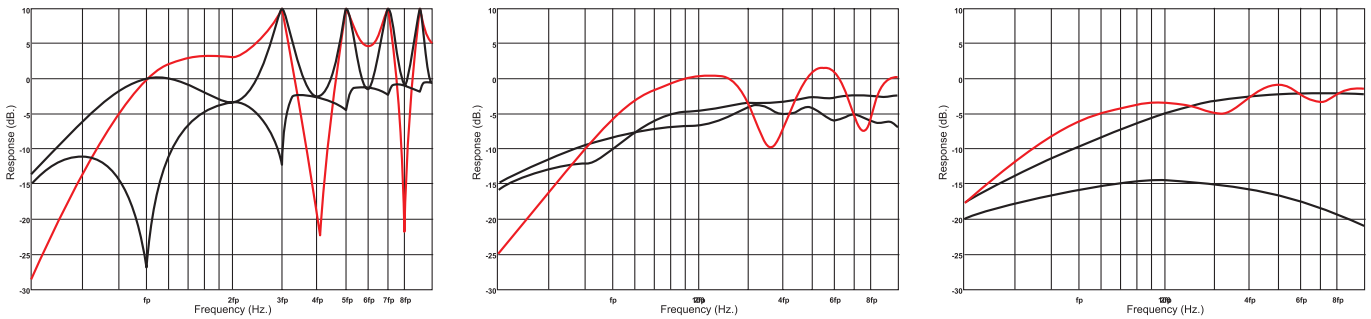
Teoria dotycząca linii transmisyjnej, jeżeli za taką można w ogóle uważać szereg rozproszonych artykułów na ten temat, jest niespójna i nieprecyzyjna. Po kilku próbach z tego typu obudową sam zrezygnowałem z kolejnych eksperymentów, idąc na łatwiznę w projektowaniu bas-refleksów, a inwencję twórczą rezerwując dla jeszcze bardziej niezwykłych obudów z otwartą odgradą (dipoli), których chyba nie odważę się w EP opisywać. Ale o linii transmisyjnej przypominał mi cykl artykułów zamieszczonych kilka lat temu w amerykańskim miesięczniku „Speaker Builder” (nr 2, 3 i 4/2000), autorstwa G.L. Augspurpera.

Jak się okazało, jego celem nie było odkrycie Ameryki i nowego patentu na najlepszą linię transmisyjną, ale zweryfikowanie dotychczasowych recept na podstawie metodycznych badań i eksperymentów, aby wreszcie dojść do wniosków i podjąć próbę opracowania procedury pozwalającej na wyliczenie charakterystyk różnego typu linii transmisyjnych z głośnikami o różnych parametrach, czyli stworzyć podobne narzędzie dla konstruktorów, jakim dysponujemy dla obliczania obudów zamkniętych i z otworem od czasu pojawienia się parametrów Thiele – Smalla.

Parametry te bowiem, tak jak i ich „wynalazcy”, nie pomagały do tej pory obliczać wymiarów linii



Rys. 105. Tunel niewytłumiony i przegląd układających się w nim rezonansów



Rys. 106. Wpływ wytlumienia na charakterystyki (głośnika, wylotu tunelu, charakterystykę wypadkową) : a) bez wytlumienia, b) lekkie wytlumienie, c) optymalne wytlumienie, d) zbyt silne wytlumienie

transmisyjnej, ani jej charakterystyk. Praca Augspurgera nie prowadzi do uzyskania tak jednoznacznych wzorów, z jakich korzystamy przy projektowaniu bas – refleksu, ale o kolejny krok przybliża nas do wyjaśnienia sytuacji, podważa kilka rozpowszechnionych opinii, podkreśla znacznie cech obudowy dotychczas traktowanych marginalnie, w sumie ułatwia projektowanie i rozpoznanie, jakich efektów możemy się spodziewać. Jednak na tym etapie, na jakim została zaprezentowana pięć lat temu, efekty te dotyczyły wyłącznie charakterystyk przetwarzania. Nie było mowy o dokładnym obliczeniu charakterystyk impulsowych czy charakterystyk wytrzymałości, z którymi mieliśmy do czynienia przy symulowaniu działania obudów zamkniętych i z otworem. Przyznaję że nie wiem, czy od tego czasu pojawiło się rozwinięcie prac Augspurgera... wiem tylko, że niestety niedługo potem miesięcznik SpeakerBuilder przestał się ukazywać, został wchłonięty przez AudioXpress, w którym artykuły na temat głośników ukazywały się już rzadziej. Ale na początku roku 2002 Joe D'Appolito opublikował także projekt zespołu głośnikowego z linią transmisyjną, powodując się przy jego konstruowaniu na wspomniane prace Augspurgera.

Podstawy ideowe

Zanim dojdziemy do szczegółowych wniosków, przedstawmy krótko historię i „filozofię” linii transmisyjnej. Od początku jej natura jest nieco schizofreniczna. Z jednej strony teoretycznie idealną linią transmisyjną jest taka, która całkowicie wytłumia promieniowanie tylnej strony membrany, ale w odróżnieniu od obudowy zamkniętej, w sposób nie oddziałujący na parametry głośnika (poprzez określoną

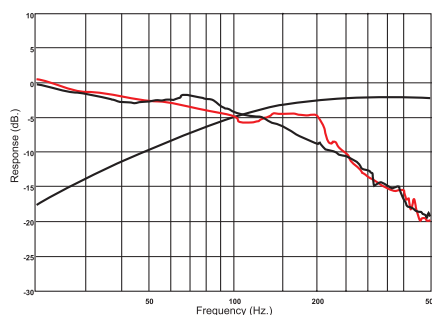
podatność powietrza w obudowie zamkniętej). Membrana ma poruszać się tak, jakby głośnik był swobodnie zawieszony (bez obudowy), a energia od tylnej strony membrany ma zostać zaabsorbowana przez długi i wypełniony materiałem tłumiącym tunel, tak że u jego wylotu nie pojawia się już żadne promieniowanie (rys. 104). Zaletą takiego rozwiązania ma być uzyskanie „czystego” promieniowania przedniej strony membrany, nieobciążonego działaniem żadnego układu rezonansowego (bas – refleks), nieskażonego rezonansami pasożytniczymi (fale stojące, rezonanse tunelowe), jak również utrzymanie częstotliwości rezonansowej głośnika na najniższym poziomie – czyli na poziomie częstotliwości f_s (głośnika swobodnie zawieszzonego) – przez co osiągnięta ma być najniższa możliwa częstotliwość graniczna charakterystyki przetwarzania. Wiąże się to również z utrzymaniem dobroci układu rezonansowego na „wyjściowym” poziomie Q_{ts} , czyli najniższym, co kojarzy się z najlepszymi charakterystykami impulsowymi. Tyle dla zachęty. A teraz problemy.

Nawet zakładając, że jest możliwe stworzenie linii transmisyjnej spełniające powyższe cele, trzeba wziąć pod uwagę, jak głośnik „wytrzyma” amplitudowo pracę w takich warunkach – warunkach analogicznych do nieskończonej wielkiej odgrody. Najprawdopodobniej oznaczać to będzie znaczne ograniczenie mocy, jaką można dostarczyć w zakresie najniższych częstotliwości. Większość głośników nie jest projektowana do pracy w takich warunkach, ale do obudów, które odciążą układ drgający – albo w zakresie najniższych częstotliwości, poprzez podniesienie częstotliwości rezonansowej f_s do f_c , na skutek pojawienia się dodatkowej podatności (obudowa

zamknięta), albo poprzez odciążenie w wybranym zakresie częstotliwości rezonansowej obudowy f_b (obudowa z otworem). W idealnej linii transmisyjnej unikniemy tych zjawisk, ze wszystkimi ich, dobrymi i złymi konsekwencjami. Ale stety czy niestety, zbudowanie idealnej linii transmisyjnej, spełniającej te założenia, jest w praktyce niemożliwe. Linia taka, dla idealnej pracy w całym zakresie akustycznym (od 20 Hz), musiałaby mieć długość może 100 metrów, może więcej... Niemalże od początku zgodzono się więc nazywać linią transmisyjną obudowę, która będzie znacznie krótsza i wprowadzi do gry zupełnie nowe elementy – rezonanse powstające w tunelach (organach, piszczałkach) o określonej długości. Ponieważ jednak tunele te w konstrukcjach głośnikowych najczęściej są pozaginane (aby zmieścić je w typowym kształcie obudowy zespołu głośnikowego), stąd też znana jest jeszcze jedna nazwa tego typu systemu – obudowa labiryntowa. Rozważmy więc sytuację od drugiej strony – jak zadziała głośnik i obudowa mająca formę niewytłumionej, otwartej na końcu rury?

W tunelach powstają rezonanse (rys. 105). Ich wpływ na charakterystykę ciśnienia u wylotu tunelu, z głośnika (od przedniej strony membrany), i wreszcie na charakterystykę wypadkową (ale ustaloną przy założeniu, że odległość od miejsca pomiarowego/odsłuchowego do głośnika i wylotu tunelu jest jednakowa), pokazuje rys. 106a. Idąc od strony częstotliwości niskich do wyższych, pierwszy rezonans pojawia się dla częstotliwości f_p , przy której ćwiartka fali będzie miała długość tunelu – tzw. rezonans ćwiartkowy. Powoduje on silne promieniowanie otworu tunelu, ale równocześnie odciążenie układu

drgającego głośnika od dużych amplitud (podobnie jak w przypadku częstotliwości rezonansowej układu rezonansowego obudowy z otworem). Efekt taki pojawia się też przy wszystkich częstotliwościach, dla których nieparzysta wielokrotność ćwiartki fali wypełni długość tunelu (a więc dla częstotliwości $3f_p$, $5f_p$, itd.). Ze względu na zjawisko odciażenia układu drgającego głośnika, klasyczne recepty na obudowę wykorzystującą ten efekt postulują, aby częstotliwość f_p była równa częstotliwości f_s – czyli częstotliwości rezonansowej głośnika swobodnie zawieszzonego (co również przypomina dawne zalecenia dotyczące strojenia bas – refleksu, które jednak wcale nie optymalizowały ani charakterystyki przetwarzania, ani impulsowej, bo abstrahowały od parametrów T-S). Taką sytuację uwzględniono na rys. 105a, stąd też poniżej częstotliwości $f_p = f_s$ następuje spadek zarówno charakterystyki ciśnienia z tunelu, jak i z otworu (zaraz po wyjściu jego charakterystyki z „dołka”). Jednak charakterystyka wypadkowa opada jeszcze bardziej stromo – 24 dB/okt. – ponieważ przesunięcie fazowe między promieniowaniem przedniej strony głośnika i tunelu zbliża się do 180° (poniżej częstotliwości f_0 w tunelu układu się mniej niż ćwiartka fali). Relacje fazowe mają wpływ na charakterystykę wypadkową również przy wyższych częstotliwościach. Dla częstotliwości dwa razy wyższej od f_p , w tunelu ułoży się połówka fali. W ten sposób przesunięcie fazowe wprowadzane przez tunel wyniesie dokładnie 180° , doda się ono do 180° przesunięcia między obydwoma stronami membrany, dając w sumie 360° , czyli 0° – wylot tunelu będzie promieniował w fazie zgodnej z przednią stroną membrany głośnika, dzięki czemu wypadkowe ciśnienie przy tej częstotliwości leży 6 dB powyżej poziomu charakterystyk głośnika i otworu tunelu. Takie zjawisko powtórzy się przy częstotliwościach, dla których tunel będzie wypełniony nieparzystą wielokrotnością połówki fali (najbliższa – $6f_p$). Wreszcie przy częstotliwości, przy której w tunelu ułoży się cała fala, tunel przesunie ją w fazie o 360° , a więc doprowadzi do fazy „wyjściowej”, z jaką pracuje tylna strona membra-



Rys. 107. Charakterystyki tłumienia – Acousta Stuf (12g/dm^3) i wełna mineralna (6g/dm^3) w linii 2-metrowej

ny, czyli przesuniętej o 180° względem fazy przedniej strony membrany. Tunel i głośnik (przednia strona membrany) promieniują wtedy w dokładnie przeciwnych fazach, na wypadkowej charakterystyce pojawia się głęboka zapadłość, i powtarza się ona przy każdej (tym razem i parzystej, i nieparzystej) wielokrotności częstotliwości $4f_p$.

Taki rozkład rezonansów jest „uniwersalny”, niezależnie od długości tunelu i parametrów głośnika. Projektując każdą linię transmisyjną, warto narysować charakterystykę z rys. 106a, z naniesieniem konkretnych częstotliwości rezonansowych, wynikających tylko z długości tunelu.

W sytuacji idealnej – ale nierealnej – bylibyśmy w stanie zaabsorbować całą energię promieniowaną przez tylną stronę membrany, likwidując w ten sposób nie tylko charakterystykę ciśnienia z tunelu, ale również wyglądając charakterystykę promieniowania z samego głośnika – całkowite wytłumienie tunelu oznacza bowiem zlikwidowanie wszelkich powstających w nim zjawisk rezonansowych.

W rzeczywistości obudowy labiryntowe – linie transmisyjne – zachowują się w sposób pośredni między omówionymi dwoma skrajnościami – obudową idealnie wytłumioną, która jest niemożliwa do zrealizowania, a obudową zupełnie niewytłumioną, która oczywiście jest w zasięgu możliwości, ale wprowadzane przez nią nierównomierności charakterystyki wypadkowej nie mogą zostać zaakceptowane.

W tym miejscu zaczyna się cała zabawa z wytłumianiem, którego znaczenie w przypadku linii transmisyjnej jest dla ostatecznych rezultatów znacznie większe, niż w przypadku innego typu obudów. Właśnie badanie różnego rodzaju

materiałów tłumiących, sposobu ich umieszczenia, było podstawowym zajęciem chyba wszystkich autorów opracowań na temat linii transmisyjnej. Za pomocą odpowiednio dobranego wytłumienia próbowali oni działać selektywnie, tłumiąc przede wszystkim zjawiska niekorzystnie wpływające na charakterystykę wypadkową. Prześledźmy omówione już rezonanse ponownie. Rezonans ćwiórcfalowy przy f_p , dzięki któremu układ drgający głośnika zostaje odciażony od dużych amplitud, można uznać za zjawisko korzystne – do układu można dostarczyć dużą moc, a efektywność jego pracy jest bardzo wysoka. Silne promieniowanie tunelu przy częstotliwości $2f_p$ również jest korzystne, bowiem promieniowanie to pozostaje w fazie zgodnej z pracą przedniej strony membrany, i poziom na charakterystyce wypadkowej jest wysoki. Ale następne rezonanse sprawiają już problemy, przy $3f_p$ (rezonans $\frac{3}{4}$ fali) na charakterystyce pojawi się podbicie, a przy $4f_p$, na skutek przeciwnych faz promieniowania z tunelu i głośnika, mamy dziurę. Te efekty należałoby już wytłumić. Nadzieja na pozytywne rozwiązanie tych problemów pojawia się wraz ze stwierdzeniem faktu, że skuteczność tłumienia wnoszonego przez ustroje o określonej gęstości i strukturze wiąże ich grubość z długością fali – jak można nawet intuicyjnie oczekiwać, im dłuższą falę (czyli niższą częstotliwość) zamierzamy w określonym stopniu tłumić, tym więcej materiału tłumiącego potrzebujemy. Ale ilość materiału tłumiącego w obudowie – tunelu będzie przecieć niezmienna. W jakimkolwiek stopniu wypełnimy linię transmisyjną materiałem tłumiącym, zawsze tłumienie będzie większe dla fal krótszych, które sprawiają nam większy kłopot, niż dłuższych. Jednak nie miejmy złudzeń, że uda się utrzymać w pełnej krasie pierwsze, korzystne zjawiska rezonansowe, a równocześnie skutecznie wytłumić kolejne, niepożądane. Po pierwsze, funkcja przyrostu tłumienia jakiegokolwiek sprawdzonego materiału nie jest na tyle stroma, aby można było zadziałać tak selektywnie. Między bardzo niskimi 30 Hz, a 200 Hz, dla różnych materiałów, tłumienie zwiększa się o ok. 10 dB, a więc tylko ok. 4 dB/okt,

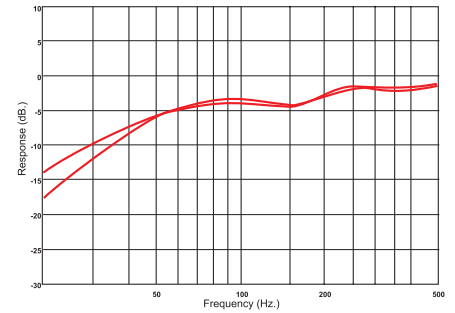
powyżej nieco szybciej, do 6 dB/okt (rys. 107). Po drugie, nawet niewielka ilość materiału tłumiącego gasi zjawisko rezonansów ćwierćfalowych i wraz z tym efekt odciążenia głośnika (przy niewielkim wytłumieniu sama fala od tylnej strony membrany jest transmitowana do wylotu dość swobodnie, ale bez wzbudzenia właściwego rezonansowi). A jak wykazał szereg eksperymentów, niewielka ilość materiału tłumiącego okaże się niewystarczająca dla zadowalającego wytłumienia fali przy częstotliwości $4f_p$, czyli dla uniknięcia wygaszania się fal o przeciwnych fazach od przedniej strony membrany i z tunelu (rys. 106b). Walka z tym zjawiskiem jest w zasadzie priorytetowa dla uzyskania „w miarę” gładkiego przebiegu charakterystyki wypadkowej, dlatego wytłumienia musi być więcej, i ze zjawiskiem rezonansu ćwierćfalowego musimy się ostatecznie pożegnać (rys. 106c).

W zamian otrzymujemy jednak inne korzystne zjawisko. Jak widać na rys. 106b, a tym bardziej 106c, charakterystyka wypadkowa nie przecina już charakterystyki samego głośnika przy częstotliwości f_p , lecz biegnie powyżej również dla niższych częstotliwości – oznacza to, że w zakresie tym promieniowanie z głośnika i z tunelu nie kłóci się w fazie, jak przy tunelu niewytłumionym. Dlaczego? Materiał tłumiący zmienił – zmniejszył prędkość dźwięku w tunelu (uwaga – nie dla wszystkich częstotliwości w jednakowym stopniu; dla najniższych najbardziej). Dla ustalonej częstotliwości, mniejsza prędkość dźwięku oznacza krótszą falę, więc w tunelu o określonej długości ułoży się większa część fali, korzystnie przesuwając w fazie promieniowanie od tylnej strony membrany. Ponadto, w tej sytuacji nie musimy się już przejmować jakimkolwiek związkiem między częstotliwością f_p (która jako częstotliwość rezonansowa przestała funkcjonować) a częstotliwością rezonansową głośnika f_s . Możliwe, a nawet wskazane jest zastosowanie głośnika o częstotliwości f_s niższej od częstotliwości f_p (obliczonej dla tunelu przed wytłumieniem), co pozwoli uzyskać szersze pasmo przenoszenia.

Augspurger ostrzega jednak, aby nie przeceniać korzyści, jakie przynosi niższa prędkość dźwięku w zakresie najniższych częstotliwości,

i nie zaleca, wbrew temu co sugerowało kilku znanych autorów, zmniejszania długości tunelu. Pokazuje, jak mniejsza prędkość dźwięku wpływa na kształt charakterystyki, komentując, że zmiany są niewielkie, i zachodzą dopiero poniżej częstotliwości f_p (rys. 108). Jednak właśnie różnica „tylko” ok. 3 dB przy najniższych częstotliwościach odpowiada nawet dwukrotnemu zwiększeniu objętości obudowy zamkniętej. W gruncie rzeczy fakt wpływu prędkości dźwięku w tunelu na jego konieczną fizyczną długość został potwierdzony. Dla wyższych częstotliwości „spowalniający” wpływ materiału maleje. Trzeba też pamiętać, że dla zjawiska tego znaczenie ma kierunek ułożenia włókien materiału tłumiącego, nad czym nie zawsze jesteśmy w stanie zapanować.

Sam rodzaj materiału tłumiącego był przedmiotem wieloletnich deliberacji. Największą sławę zdobyła długowłosa wełna owcza. Być może ze względu na łatwość ustalenia orientacji włókien, mających związek z prędkością dźwięku, rzeczywiście jest bardzo odpowiednia do linii transmisyjnych, jednak Augspurger kwestionuje jej nadzwyczajne właściwości, chociaż przyznaje, że eksperymentował z wełną w formie „puszystej”. Generalnie Augspurger wyciąga wniosek, że rodzaj materiału tłumiącego nie jest tak krytyczny, jak sądzono wcześniej. Z podobnym efektem można użyć wełny mineralnej, włókniny poliestrowej, włókna nylonowo – poliamidowego („Acousta – Stuf”). Ogólna reguła jest taka, że tunele dłuższe wypełniamy lżej, a krótsze mocniej – np. linię o długości 2 m poliestrem o gęstości ok. 10...15 g/dm³, a linię 1 m poliestrem o gęstości w zakresie 20...25 g/dm³. Stosując włókno nylonowo–poliamidowe, gęstość może być mniejsza o 10...20%, ale wraz z wełną szklaną, już dwa razy mniejsza. W liniach dłuższych od półtora metra wygodniej jest więc stosować włókninę poliestrową lub poliamidową. W ten sposób uzyskamy rezultaty pokazane na rys. 106c. Z mniejszą ilością wytłumienia pojawia się charakterystyki z rys. 106b, natomiast zwiększenie tłumienia doprowadzi do charakterystyk z rys. 106d, gdzie wpływ promieniowania z tunelu jest już minimalny. Mimo wygaszenia wszelkich re-



Rys. 108. Charakterystyki przetwarzania dla różnych prędkości dźwięku w materiale wypełniającym tunel (przy 0,4 i 0,8 prędkości dźwięku w powietrzu)

zonansów, nie należy jednak sądzić, że w ten sposób jesteśmy bardzo blisko idealnej linii transmisyjnej, której działanie nie wpływa na parametry głośnika. Otóż częstotliwość rezonansowa f_s zostaje stłumiona, ale przesunięta w górę (stwierdzamy to na podstawie charakterystyki impedancji), co ogranicza pasmo przenoszenia. Tak silnie wytłumiona linia transmisyjna zachowuje się po części jak obudowa zamknięta, co łatwo sprawdzić naciskając palcami membranę – jest ona hamowana przez powietrze w obudowie, które nie może się swobodnie przemieszczać. Osobiście polecam ten prosty sprawdzian dla uniknięcia ewidentnego przetłumienia. Podstawowym celem wytłumienia jest osłabienie promieniowania z tunelu na tyle, aby na wypadkowej charakterystyce przetwarzania nierównomierność nie przekraczały dopuszczalnych granic, uzyskanie wyniku ± 3 dB można w tym zakresie częstotliwości, dla tego typu konstrukcji, uznać za satysfakcjonujące, a ± 2 dB za wynik bardzo dobry. Walka o dalej idącą linearyzację charakterystyki nie ma sensu, zwłaszcza wzięwszy pod uwagę niekontrolowane nierównomierności, jakie w zakresie kilkuset Hz wprowadzają odbicia w pomieszczeniu. Przetłumienie powoduje ograniczenie charakterystyki przetwarzania i osłabienie dynamiki. Na kształt charakterystyki w zakresie najniższych częstotliwości w dużym stopniu możemy wpływać w inny sposób – przekrojem i sposobem ukształtowania tunelu, miejscem za instalowania głośnika, i oczywiście jego parametrami. O tym właśnie w kolejnym odcinku.

Andrzej Kisiel