

Głośniki i obudowy

Wierne odtwarzanie dźwięku jest celem budowy toru elektroakustycznego, który zaczyna się od mikrofonu w studiu nagrań a kończy na głośnikach lub słuchawkach. Właśnie te końcowe przetworniki decydują o jakości odtwarzania i wpływają na ocenę całego toru. Na nic się zdadzą super parametry odtwarzacza i wzmacniacza jeśli później wszystko zepsują złej jakości i nieodpowiednio dobrane zespoły głośnikowe. W kolejnych numerach czasopisma przedstawimy najważniejsze zasady dotyczące zastosowań głośników i wykonywania obudów głośnikowych. Przy odrobinie zacięcia do majsterkowania można pokusić się o wykonanie pełnowartościowych zestawów głośnikowych, których cena (bez uwzględnienia własnej pracy) będzie na pewno mniejsza niż zestawów fabrycznych.

■ Dźwięk i jego parametry

Zadaniem głośnika, jako przetwornika elektroakustycznego jest odtwarzanie dźwięku. Dla zrozumienia w jaki sposób następuje odtwarzanie dźwięku wskazane jest określenie samego dźwięku. Można powiedzieć, że każdy drgający obiekt znajdujący się w ośrodku fizycznym (np. powietrzu) wywołuje fale dźwiękowe. Poruszający się obiekt wprowadza w ruch najbliższe cząstki, które przekazują energię kolejnym itd. W ten sposób powstaje zaburzenie ośrodka przemieszczające się w nim i nazywane falą. Fala ta docierając do naszych uszu wywołuje wrażenie dźwięku.

Fala dźwiękowa jest więc przemieszczającym się zaburzeniem ciśnienia powietrza, jakie istnieje w otaczającej nas atmosferze. Charakteryzuje ją szybkość przemieszczania, która w powietrzu wynosi około 340 m/s. W przypadku fali okresowej np. sinusoidalnie zmiennej kolejnym parametrem jest częstotliwość. Częstotliwość określa ilość pełnych zaburzeń ciśnienia w ciągu 1 s. Mając szybkość v [m/s] i częstotliwość f [Hz] można okre-

ślić długość fali λ [m]. Długość fali jest odległością na jakiej występuje pełna zmiana zaburzenia.

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Fala sinusoidalna jest przypadkiem idealnym. Dźwięki instrumentów jak i głos wywołują zaburzenia odbiegające kształtem od sinusoidy. Jeśli są przebiegami okresowymi, można zgodnie z twierdzeniem Fouriera przedstawić je jako sumę składowych sinusoidalnych o częstotliwościach harmonicznych tzn. będących wielokrotnościami całkowitymi częstotliwości podstawowej. Inaczej, do ucha dobiega wtedy zestaw sinusoid. Częstotliwość podstawowa nazywana jest często wysokością dźwięku natomiast ilość i proporcje harmonicznych decydują o barwie dźwięku.

Różnica między ciśnieniem istniejącym w środowisku a wywołanym przez zaburzenie dźwiękowe nazywana jest ciśnieniem akustycznym. Ciśnienie atmosferyczne stanowi składową stałą ciśnienia, natomiast ciśnienie akustyczne jest amplitudą składowej zmiennej. Jednostką

ciśnienia akustycznego jest paskal [Pa]. Wartość ciśnienia akustycznego zmniejsza się w miarę oddalania się od źródła dźwięku. Ograniczona czułość ucha pozwala na słyszenie dźwięków o minimalnym ciśnieniu akustycznym wynoszącym $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Powyżej ciśnienia akustycznego rzędu 10^2 Pa następuje wrażenie bólu.

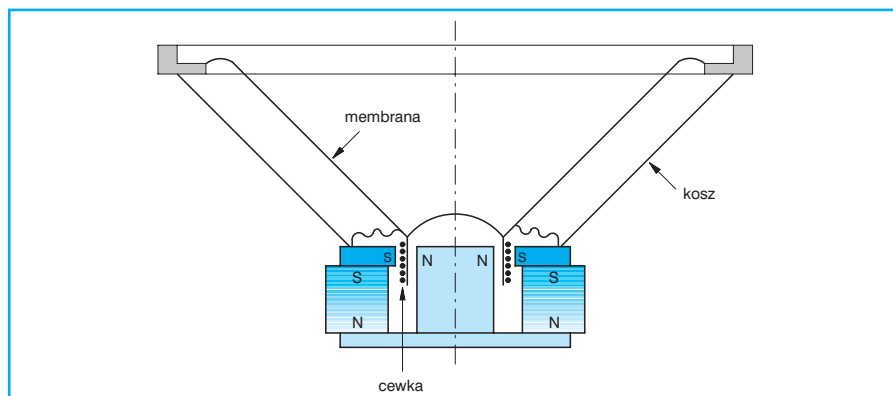
Kolejnym parametrem jest natężenie dźwięku, charakteryzujące energię zaburzenia ciśnienia. Jest ono określane jako moc akustyczna przepływająca przez 1 m^2 powierzchni prostopadłej do kierunku rozchodzenia się fali. Jednostką natężenia jest $[\text{W/m}^2]$. Natężenie dźwięku maleje z kwadratem odległości od punktowego źródła dźwięku. Progowi słyszalności odpowiada natężenie dźwięku wynoszące 10^{-12} W/m^2 . Natomiast słyszenie bolesne następuje przy natężeniu dźwięku rzędu 1 W/m^2 . Moce akustyczne występujące przy mowie wynoszą od $0,01 \mu\text{W}$ do 2 mW , przy muzyce dochodzą do 25 W . Zakresy ciśnień akustycznych i natężeń dźwięku są więc bardzo duże i dlatego często korzysta się tu z miary logarytmicznej czyli decybeli [dB]. Progowi słyszenia odpowiada 0 dB, natomiast poziomowi słyszenia bolesnego 120 dB.

■ Głośnik dynamiczny jego właściwości

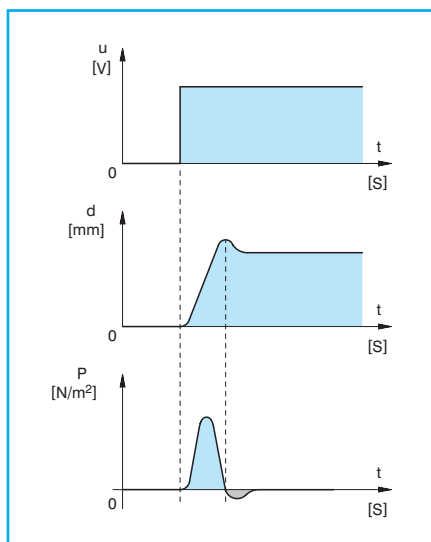
Już wiemy, że głośnik będzie urządzeniem technicznym do wytwarzania zaburzeń ciśnienia. W głośniku dynamicznym do tego celu służy membrana poruszana uzwojeniem znajdującym się w polu magnetycznym. Uproszczony przekrój głośnika pokazuje rysunek 1.

Konstrukcję mechaniczną głośnika stanowi tzw. kosz. Wewnątrz niego znajduje się membrana zamocowana za pomocą dwóch tzw. resorów (górnego i dolnego). Do dolnej części membrany przymocowana jest cewka, która znajduje się w polu magnetycznym wytworzonym przez układ magnetyczny głośnika. Zasadniczą częścią układu magnetycznego jest magnes pierścieniowy (najczęściej ferrytowy). Z magnesem stykają się nabiegunki wykonane z miękkiego materiału magnetycznego. Właśnie w ich szczelinie jest umieszczona cewka głośnika. Przepływający przez cewkę prąd powoduje powstanie siły zgodnie ze znanym wzorem:

$$F = B \cdot I \cdot l$$



Rys. 1 Głośnik dynamiczny



Rys. 2 Odpowiedź impulsowa głośnika

gdzie:

B – indukcja magnetyczna w szczelinie,

I – wartość prądu,

l – długość przewodnika.

Doprowadzenie do cewki zmiennego prądu powoduje zmiany wielkości i kierunku siły działającej na cewkę i membranę, wprawiając ją w drgania. Poruszane przez membranę powietrze tworzy falę akustyczną.

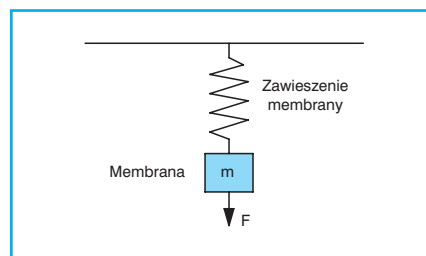
Ideałem byłaby neutralność głośnika tzn. odtwarzanie wszystkich dźwięków zgodnie z ich oryginalnym brzmieniem. Przyjrzyjmy się zachowaniu głośnika przy podaniu na jego zaciski szybko narastającego napięcia co odpowiadać może zmianie ciśnienia z jednego poziomu na inny (u źródła sygnału). Odpowiednie przebiegi prezentuje rysunek 2.

Górny wykres przedstawia przebieg napięcia doprowadzonego do zacisków głośnika w funkcji czasu. Środkowy przebieg odpowiada wychyleniu membrany, a dolny to wytworzone przez membranę ciśnienie akustyczne. Wskutek konieczności pokonania oporów zawieszenia głośnika,

oporu powietrza i określonej masy membrany zmiana jej położenia następuje z opóźnieniem. Następnie widać przekroczenie położenia ustalonego, to właśnie bezwładność membrany. Wytworzone ciśnienie akustyczne zupełnie nie odpowiada przebiegowi doprowadzonego napięcia. Jest ono impulsem szpilkowym. Przesunięta membrana nie wytwarza ciśnienia akustycznego. Można wręcz zauważyć, że powstanie ciśnienia akustycznego wymaga ruchu membrany. Wartość ciśnienia jest proporcjonalna do przyspieszenia ruchu membrany. Matematycznie jest proporcjonalna do pochodnej wychylenia.

Właściwość ta nie jest na szczęście dyskwalifikującą działanie głośnika. Ucho ludzkie także reaguje jedynie na zmiany ciśnienia. Dodatkowo przy odtwarzaniu przebiegów sinusoidalnie zmiennych ich przebieg zostaje odwzorowany ponieważ pochodna sinusa to cosinus – jedynie występuje przesunięcie fazy o 90°. Jednak opóźnienia wystąpią i tutaj zmniejszając szybkość narastania natężenia dźwięku. Można sporządzić schemat mechaniczny wykorzystywany do opisu działania głośnika pokazany na rysunku 3.

Zawieszenie membrany to sprężyna, na której zamocowana jest masa membrany poruszana siłą F. Masa membrany i sprężyste zawieszenie są przyczyną bezwładności. Układ ten charakteryzuje się także rezonansem, odpowiadającym zwiększeniu amplitudy drgań przy pewnej częstotliwości zwanej rezonansową. Używanie jednakowych poziomów ciśnienia akustycznego przy niskich i wysokich częstotliwościach wymaga innych głośników. Do odtwarzania niskich częstotliwości niezbędna jest duża membrana i duże odkształcenie zawieszenia (duży skok membrany). Do odtwarzania wysokich częstotliwości niezbędna jest lekka i delikatnie zamocowana membrana ponieważ zmia-



Rys. 3 Schemat mechaniczny głośnika

ny jej położenia muszą zachodzić dużo szybciej. Prowadzi to do realizacji zespołów głośnikowych zawierających dwa lub więcej głośników przewidzianych do odtwarzania różnych częstotliwości. Sygnały do tych głośników są doprowadzane za pośrednictwem odpowiednich filtrów.

Ruch membrany głośnika podlega także tłumieniu. Tłumienie mechaniczne wprowadza zawieszenie głośnika. Tłumienie elektryczne wywołane jest przez hamujące działanie cewki głośnika poruszającej się w polu magnetycznym przy zamkniętych jej zaciskach (np. rezystancją wyjściową wzmacniacza).

Istotnym parametrem głośnika jest efektywność E określana jako stosunek ciśnienia akustycznego p wytworzonego przez głośnik zasilany mocą 1 W o częstotliwości 1 kHz, mierzonego na osi głośnika w odległości 1 m, do ciśnienia p₀ odpowiadającego progowi słyszalności. Wyrażana jest w decybelach.

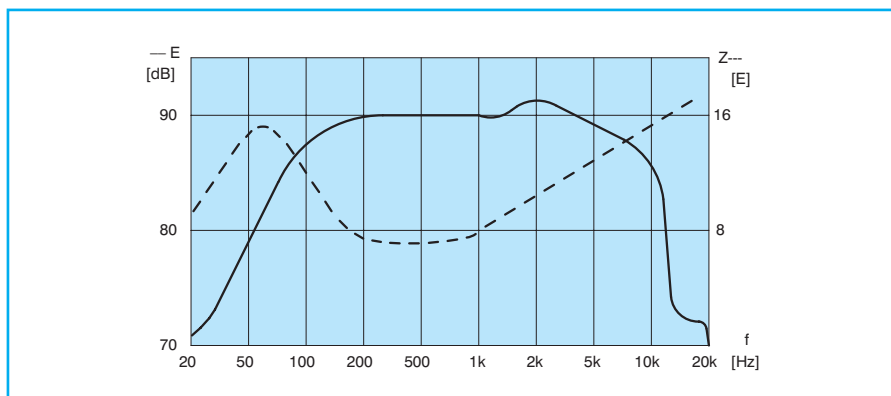
$$E = 20 \log \frac{p}{p_0} [dB]$$

Efektywność głośnika jest zależna od częstotliwości, co uwidacznia rysunku 4.

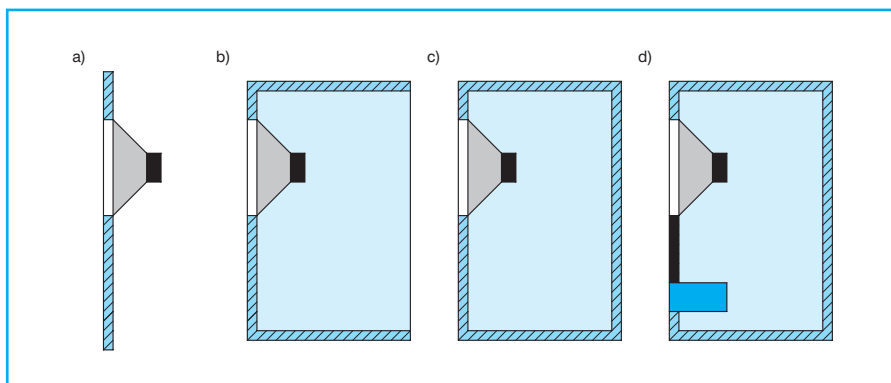
Na charakterystyce tej przedstawiono także przebieg impedancji głośnika z (dokładnie modułu impedancji), określonej jako stosunek wartości skutecznych napięcia do prądu płynącego przez cewkę głośnika. Za impedancję znamionową uważa się najniższą jej wartość w paśmie odtwarzanych częstotliwości (powyżej częstotliwości rezonansowej). Czasem jako impedancję znamionową traktuje się impedancję głośnika przy częstotliwości 1 kHz.

Przy niskich częstotliwościach następuje wzrost impedancji wywołany rezonansem głośnika. Maksimum impedancji przy niskich częstotliwościach określa dokładnie częstotliwość rezonansową głośnika. Poniżej tej częstotliwości efektywność silnie spada. Praktycznie widać ruchy membrany ale nic nie słysząc.

Tylko niewielki procent mocy doprowadzanej do głośnika jest zamieniany na



Rys. 4 Charakterystyka częstotliwościowa głośnika



Rys. 5 Rodzaje obudów głośnikowych

moc akustyczną. Określa to sprawność głośnika η wyrażana w [%]. Jest ona stosunkiem mocy akustycznej do mocy elektrycznej. Sprawność głośnika zależy od częstotliwości a jej przebieg ma kształt zbliżony do przebiegu impedancji. Z tą różnicą, że przebieg sprawności opada ze wzrostem częstotliwości. Wyraźny wzrost sprawności następuje przy częstotliwości rezonansowej. Sprawność głośników wynosi od 0,1 do 2% w środkowej części użytecznego pasma częstotliwości. Przy rezonansie wzrasta do 10%.

Moc znamionowa głośnika jest to największa wartość mocy pozornej ($U \times I$), która może być doprowadzona do głośnika w sposób ciągły, nie doprowadzając do jego uszkodzenia i nie powodując przekroczenia dopuszczalnych zniekształceń nieliniowych.

Inną właściwością głośnika jest kierunkowość promieniowania. Określa się ją przez pomiar efektywności pod różnymi kierunkami do osi głównego kierunku promieniowania. Ze wzrostem częstotliwości charakterystyka promieniowania

głośnika ulega zawężeniu. W celu poprawienia tej właściwości stosuje się różne środki zaradcze, łącznie z tzw. membranami kopułkowymi.

Sam głośnik bez obudowy promieniowałby słabo lub wcale by nie promieniował tonów niskich. Dzieje się to wskutek wyrównywania się ciśnień akustycznych wytworzonych z przedniej i tylnej strony membrany. Zadaniem obudowy jest zwiększenie drogi fal dźwiękowych między przodem i tyłem membrany. Odtwarzanie niższych częstotliwości wymaga obudowy o większych rozmiarach.

Odgroda płaska (rys. 5a) jest sztywną płytą o wymiarach zależnych od najniższej częstotliwości odtwarzanej. Aktualnie jest praktycznie stosowana jedynie do pomiarów głośników.

Bardzo podobna do niej jest obudowa otwarta (rys. 5b). Poprawę jej właściwości uzyskuje się przez wyłożenie wewnętrznych części ścianek materiałem tłumiącym (pianka, wata itp.).

Obudowa zamknięta (rys. 5c), nazywana obudową kompakt ma już zupełnie

inne właściwości. Nawet przy najniższych częstotliwościach nie występuje wyrównywanie się ciśnień akustycznych z obu stron membrany. Negatywną jej stroną jest podnoszenie częstotliwości rezonansowej głośnika (zamknięte w obudowie powietrze zwiększa siłę sprężystości zawieszenia). Wymaga to stosowania specjalnych głośników o niskiej częstotliwości rezonansowej (gumowe resory górne). Wnętrze obudowy zamkniętej wypełnia się całkowicie materiałem tłumiącym.

Obudowa rezonansowa – basreflex (rys. 5d) jest odmianą obudowy zamkniętej wyposażonej w otwór i ewentualnie kanał. Pozwala na dodatkowe wykorzystanie mocy tonów niskich promieniowanych przez tylną stronę membrany. Uzyskuje się to przez odwrócenie o 180° fali wytworzonej przez tył membrany i wypromieniowanie jej przez otwór w obudowie jako fali w fazie zgodnej z promieniowaną przez przód membrany. Przez odpowiednie dobranie pojemności obudowy i ewentualnie długości kanału można znacznie poprawić odtwarzanie niskich częstotliwości. Ścianki takiej obudowy powinny być wyłożone materiałem tłumiącym. Otwór lub wlot kanału nie powinny być zasłonięte. Nie odgrywa przy tym większej roli, czy otwór znajduje się w przedniej czy tylnej ścianie obudowy.

Zaprezentowane rodzaje obudów nie wyczerpują pełnej ich gamy. Aktualnie najczęściej stosowanymi obudowami są: obudowa zamknięta i obudowa rezonansowa. Ich właściwościami zajmiemy się dokładniej w kolejnym artykule z tego cyklu.

♦ R.K.

poltronic
PODZESPOŁY ELEKTRONICZNE

ul. Św. Wincentego 9
50-252 Wrocław
e-mail: biuro@poltronic.com.pl
tel. (071) 329 84 40 (6 linii)
(071) 328 82 59 fax
(071) 328 89 12 dział sprzedaży hurtowej / pow 500 zł/

Sklepik internetowy

www.poltronic.com.pl

- kompleksowe zaopatrzenie serwisów RTV
- szeroki asortyment części do sprzętu audio-video
 - mechanika
 - lasery CD
 - silniki video
 - procesory
 - układy scalone
 - tranzystory
 - trafopowielacze WN

sprzedaż wysyłkowa

czas oczekiwania max
2 dni od daty zamówienia

otrzymujesz paczkę
bezpośrednio pod wskazany adres

zapraszamy do naszych przedstawicieli handlowych
na giełdach elektronicznych:
Sobota: Łódź, Warszawa, Kraków, Katowice
Niedziela: Wrocław, Warszawa

Głośniki i obudowy – obudowa zamknięta

■ Parametry Thiele-Small'a

Jak już zauważyliśmy w pierwszej części cyklu, z mechanicznego punktu widzenia głośnik dynamiczny stanowi system składający się z masy (membrany) zawieszona sprężysto i poruszana siłą. Krótka działająca siła spowoduje poruszenie membrany. Zanim nastąpi powrót membrany do położenia spoczynkowego wykona ona drgania gasnące o częstotliwości zależnej od masy membrany i sprężystości zawieszenia. Jest to tzw. częstotliwość własna drgań, nazywana inaczej częstotliwością rezonansową.

Mechaniczny układ drgający można zastąpić analogicznym układem elektrycznym. Masa układu mechanicznego odpowiada indukcyjności a sprężystość pojemności. Wygasanie drgań świadczy o występowaniu strat. W układzie elektrycznym sumaryczne straty reprezentuje rezystancja. Współczynnikiem zależnym od strat jest dobroć. Można stwierdzić że jest ona odwrotnie proporcjonalna do wielkości strat.

W głośniku dynamicznym straty energii określane są jako tzw. tłumienie. Występują dwa zasadnicze typy tłumienia: mechaniczne i elektryczne. Tłumienie mechaniczne zależy od strat energii w rezonansach górnym i dolnym głośnika. Minimalne tłumienie wywołuje zamiana energii mechanicznej na akustyczną jaka dokonuje się w głośniku. Tłumienie elektryczne wywołane jest hamującym działaniem przepływu prądu w cewce głośnika, który powstaje wskutek indukowania się SEM w poruszającej się cewce. Praktycznie częściej niż tłumieniem operuje się jego odwrotnością czyli dobrocią. Głośnik o większej dobroci charakteryzuje się mniejszym tłumieniem a więc większą bezwładnością membrany i dłuższym czasem wygaszania jej drgań swobodnych. Często nazywamy to miękkim zawieszeniem membrany.

Podane skrótowo właściwości są podstawą zestawu parametrów używanych przy projektowaniu zastosowań głośników a zwłaszcza obudów. Parametry te od nazwisk ich twórców nazywane są parametrami Thiele-Small. Niżej podamy zestawienie tych parametrów:

- f_s – częst. rezonansowa głośnika [Hz],
 - V_{as} – objętość zastępcza zależna od sprężystości zawieszenia i powierzchni membrany [l] (inaczej jest to pojemność obudowy zamkniętej zwiększającej częstotliwość rezonansową głośnika 1,42 razy),
 - Q_{ms} – dobroć mechaniczna (odwrotność tłumienia mechanicznego),
 - Q_{es} – dobroć elektryczna (odwrotność tłumienia elektrycznego, przy założeniu rezystancji wyjściowej wzmacniacza równej 0 Ω),
 - Q_{ts} – dobroć wypadkowa w otwartym powietrzu (odwrotność sumarycznego tłumienia mechanicznego i elektrycznego głośnika bez obudowy).
- Mając dobroć mechaniczną i elektryczną, dobroć wypadkową można obliczyć korzystając z następującego wzoru:

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Dobroć wypadkowa głośników niskotonowych powinna zawierać się w przedziale od 0,25 do 0,7.

Podstawą w muzyce i odtwarzaniu dźwięku jest tzw. fundament basowy. Odtwarzanie soczystych niskich tonów przy dobrych właściwościach impulsowych jest cechą prawidłowo zaprojektowanej kolumny głośnikowej. Wymaga to dopasowania właściwości głośnika niskotonowego i obudowy.

■ Obudowa zamknięta

Konieczność stosowania obudowy głośnika wynika z potrzeby oddzielenia tylnej strony membrany od przedniej. Zwłaszcza przy niskich częstotliwościach następuje zwarcie fal akustycznych promieniowanych przez obie strony membrany i zdecydowane zmniejszenie ciśnienia akustycznego.

Obudowa zamknięta wydaje się radykalnym środkiem na odizolowanie obu stron membrany. Fala akustyczna promieniowana jest przez przednią część membrany. Energia promieniowana przez tylną stronę

jest absorbowana we wnętrzu obudowy. Szczelne zamknięcie tylnej strony głośnika powoduje sprężanie powietrza w obudowie podczas ruchu membrany do wnętrza i rozprężanie podczas ruchu na zewnątrz. W obudowie powstaje poduszka powietrzna działająca na głośnik jak dodatkowa sprężyna. Układ mechaniczny obudowy zamkniętej pokazuje rysunek 1.

Często nawet mówi się o zawieszeniu powietrznym głośnika w obudowie zamkniętej. Dotyczy to zwłaszcza głośników o miękkim zawieszeniu. Zmiana sprężystości zawieszenia głośnika (w odniesieniu do otwartej przestrzeni) spowoduje zmianę częstotliwości rezonansowej a konkretnie jej podwyższenie zgodnie z podanym niżej wzorem.

$$f_c = f_s \cdot \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_b}}$$

gdzie:

V_b – pojemność obudowy [l],

f_c – częstotliwość rezonansowa głośnika w obudowie zamkniętej,

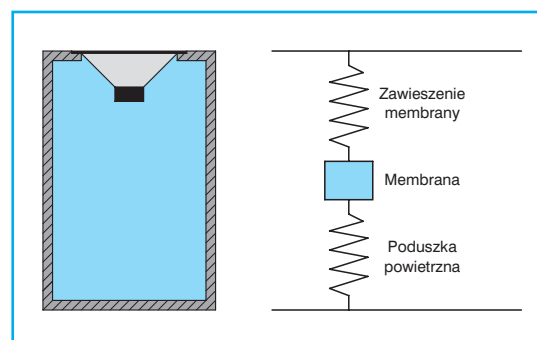
Właśnie ten wzór pokazuje, że częstotliwość rezonansowa wzrośnie 1,42 razy kiedy $V_{as} = V_b$. Tak więc zmieniając objętość obudowy w odniesieniu do objętości zastępczej można zmieniać właściwości głośnika w obudowie. W ten sam sposób zmienia się dobroć wypadkowa głośnika po zamontowaniu w obudowie zamkniętej.

$$Q_{tc} = Q_{ts} \cdot \sqrt{1 + \frac{V_{as}}{V_b}}$$

gdzie:

Q_{tc} – wypadkowa dobroć głośnika w obudowie zamkniętej.

Zmieniając dobroć wypadkową głośnika w obudowie zamkniętej przez dobór objętości wewnętrznej obudowy zmieniać można charakterystykę częstotliwościową głośnika w obudowie w pobliżu częstotliwości rezonansowej. Poniżej częstotliwości rezonansowej głośnika następuje radykalny spadek ciśnienia akustycznego z na-



Rys. 1 Mechanika obudowy zamkniętej

chyleniem 12 dB/okt. Przykładowe przebiegi względnej charakterystyki częstotliwości głośnika w obudowie zamkniętej przy różnych wartościach dobroci wypadkowej przedstawia rysunku 2.

Najkorzystniejszy przebieg odpowiada dobroci wypadkowej wynoszącej 0,7. Przy dobroci równej 1 następuje podbicie niskich częstotliwości przy jednoczesnym zwiększeniu częstotliwości rezonansowej, co powoduje wcześniejsze opadanie charakterystyki od strony niskich częstotliwości niż przy dobroci wynoszącej 0,7. Przy dobroci wynoszącej 0,5 następuje spadek ciśnienia akustycznego już przy stosunkowo wysokich częstotliwościach. Efektem jest wyraźne sfłumienie niskich częstotliwości, pomimo niżej leżącej częstotliwości rezonansowej.

Aby uzyskać wymaganą wielkość dobroci wypadkowej, głośniki przewidziane do stosowania w obudowie zamkniętej powinny mieć dobroć wypadkową w swobodnej przestrzeni Q_{ts} zawierającą się w zakresie od $0,33 \div 0,7$. Będą to więc głośniki o tzw. miękkim zawieszeniu. Charakterystyczne dla nich są gumowe resory górne i duże wychylenia membrany przy niekoniecznie dużych średnicach.

Rozwiązanie to pozwala na uzyskanie dobrych wyników przy małych wymiarach obudowy i głośnika. Dlatego często używano w odniesieniu do obudowy zamkniętej terminu compact. Dobra charakterystyka częstotliwościowa zostaje jednak okupiona zmniejszoną efektywnością. Dla uzyskania wystarczającego natężenia dźwięku niezbędne okazuje się zwiększenie mocy wyjściowej wzmacniacza.

■ Projektowanie obudowy zamkniętej

Pominę kwestię doboru mocy wzmacniacza i zestawu ze względu na wymagane natężenie dźwięku. W zastosowaniach domowych ilość „hałasu” ro-

bionego przez głośniki nie jest najważniejsza. Najczęściej będziemy projektować zestaw głośnikowy do posiadanego już wzmacniacza czy amplitunera. Moc znamionowa głośnika powinna być co najmniej równa mocy znamionowej wzmacniacza. Korzystniejszą będzie sytuacja, kiedy moc znamionowa głośnika będzie większa od mocy znamionowej wzmacniacza. Przy wyborze głośnika należy skorzystać z katalogu producenta lub poradzić się sprzedawcy w najbliższym sklepie ze sprzętem elektroakustycznym (można poprosić o dane techniczne głośnika). Na naszym rynku funkcjonują od niedawna firmy wysyłkowe sprzedające głośniki produkcji krajowej jak i renomowanych firm zagranicznych.

Zależnie od upodobań basowych należy dobrać teraz głośnik o odpowiedniej częstotliwości rezonansowej. Bardziej soczysty i niski bas wymaga głośnika o jak najniższej częstotliwości rezonansowej. Wiąże się to z wielkością membrany i w konsekwencji z wielkością obudowy. Przy okazji zwrócić uwagę na pozostałe parametry a zwłaszcza dobroć Q_{ts} , która powinna zawierać się w przedziale od 0,33 do 0,7.

Do zaprojektowania obudowy niezbędna jest znajomość następujących parametrów głośnika: f_s , V_{as} i Q_{ts} . Samo projektowanie w zasadzie polega na określeniu objętości obudowy V_b przy jakiej uzyska się zakładaną dobroć wypadkową głośnika w obudowie Q_{tc} . Najkorzystniejszą wartością dobroci wydaje się 0,7. Poszukiwaną objętość obliczymy z następującego wzoru:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\frac{Q_{tc}^2}{Q_{ts}^2} - 1}$$

Widać z tego wzoru, że objętość wewnętrzna obudowy będzie bezpośrednio zależała od parametru głośnika V_{as} . Przy dobroci głośnika zbliżonej do 0,7 nie-

zbędne jest zastosowanie dobroci wypadkowej większej od 0,7 dla uzyskania rozsądnych wymiarów obudowy. Praktycznie wartość dobroci wypadkowej Q_{tc} powinna zawierać się w przedziale od 0,6 do 1,0. Mniejsze wartości zdecydowanie pogarszają odtwarzanie niskich tonów. Wartości większe od 1 powodują wzrost ciśnienia akustycznego dla częstotliwości zbliżonych do rezonansowej i pogorszenie właściwości impulsowych.

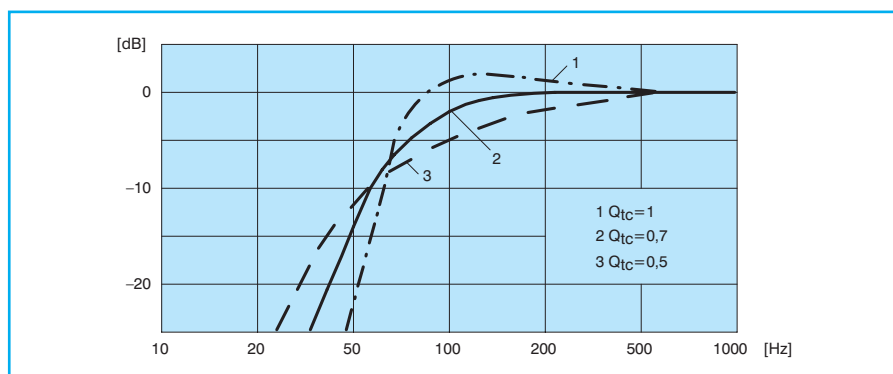
Przewidywane wytłumienie akustyczne wnętrza obudowy materiałem tłumiącym (wata, pianka itp.) prowadzi do efektywnego zwiększenia objętości obudowy i dlatego obliczona wartość powinna zostać pomnożona przez współczynnik 0,9. Na podstawie objętości możemy już obliczyć wewnętrzne wymiary obudowy (zależnie od kształtu – najłatwiej dla obudowy prostopadłościowej). Sądzę, że z tym zadaniem każdy poradzi sobie samodzielnie.

Mając objętość obudowy możemy pokusić się o obliczenie częstotliwości rezonansowej głośnika w obudowie. Jest to o tyle interesujące, że praktycznie poniżej tej częstotliwości szybko zanika ciśnienie akustyczne promieniowane przez głośnik w obudowie. Odpowiedni wzór był podany wcześniej.

Do wykonania obudowy najlepiej nadaje się płyta MDF o grubości ścianek 19 mm. W ostateczności małe obudowy o mocach do 50 W można wykonać z cieńszej płyty np. 12 mm. Po dokładnej obróbce krawędzi ścianek sklejenie nie powinno stanowić problemu. Proponuję zastosowanie powszechnie dostępnego kleju Wikol. Spoiny można dodatkowo uszczelnić elastyczną masą silikonową.

Wnętrze obudowy powinno być wypełnione materiałem tłumiącym. Dla zdobycia takiego materiału proponuję wycieczkę po ścinki do tapicera lub sklepu z dodatkami krawieckimi.

Uszczelnienia wymaga krawędź styku kosza głośnika z obudową i gniazdo połączeniowe. Można tu zastosować cienką piankę poliuretanową lub masę silikonową. Przy podłączaniu głośnika do gniazda należy zwrócić uwagę na fazę głośnika i odpowiednio połączyć. Fazowanie głośnika można dokonać lub sprawdzić korzystając z baterijki. Podłączenie dodatniego bieguna baterijki do „+” głośnika powinno spowodować przemieszczenie membrany do przodu.



Rys. 2 Wpływ dobroci wypadkowej na charakterystykę częstotliwościową

Głośniki i obudowy – obudowa z otworem

Popularnie nazywana także obudową rezonansową lub „basreflex”. Poprawia odtwarzanie niskich tonów nieco tracąc na dynamice. Opis przedstawia zasadę funkcjonowania, wzory obliczeniowe wraz z przykładem oraz możliwości dostrojenia.

Mechanika i fizyka obudowy rezonansowej

Ujemną cechą obudowy zamkniętej jest niewykorzystywanie energii promieniowanej przez tylną stronę membrany. Odizolowuje się obie strony membrany aby uzyskać lepsze odtwarzanie niskich częstotliwości. Okazuje się, że częściowe otwarcie obudowy pozwala na wykorzystanie tej energii, dodatkowo wprowadzając efekt rezonansowy wnętrza obudowy. Niespodziewanie daje to dalszą poprawę odtwarzania niskich częstotliwości.

Obudowa zostaje wyposażona w jeden lub dwa otwory o przekroju kołowym lub prostokątnym. Otwory te najczęściej są wydłużane w formie tunelu (rury). Istotna jest długość tunelu ponieważ wraz z przekrojem określa objętość a tym samym masę powietrza biorącą udział w wytwarzaniu fali akustycznej przez otwór. Właściwości rezonansowe takiej obudowy są znane z fizyki jako tzw. rezonator Helmholtza.

Tylna strona membrany zostaje sprzężona za pośrednictwem poduszki powietrza wewnątrz obudowy z masą powietrza znajdującą się w tunelu. Drgający układ głośnika zostaje połączony z drgają-

cym systemem obudowy (rezonatorem). Ilustruje to rysunek 1.

Siła F wynikająca z mocy dostarczonej do głośnika ze wzmacniacza pobudza układ do drgań. Układ ten zachowuje się w różny sposób wraz ze zmianą częstotliwości odtwarzanego sygnału. Rozpatrzmy trzy skrajne przypadki:

1. Przy wysokich częstotliwościach ruch membrany jest minimalny i poduszka powietrzna nie pobudza do ruchu masy powietrza w tunelu. Układ zachowuje się wtedy jak obudowa zamknięta. Obie strony membrany są od siebie odizolowane.
2. Przy zmniejszaniu częstotliwości następuje pobudzenie masy powietrza w tunelu do drgań. Przy pewnej częstotliwości następuje znaczny wzrost przemieszczania się masy powietrza w tunelu w odniesieniu do ruchów membrany. Co jest najistotniejsze to kierunek przemieszczania się masy powietrza w tunelu i membrany jest taki sam. Wychyleniu membrany na zewnątrz obudowy odpowiada przemieszczenie masy powietrza także na zewnątrz. To jest właśnie efekt rezonansowy objawiający się „wzmocnieniem” odtwarzanego sygnału (niskich częstotliwości) przy stosunkowo małych wychyleniach membrany. Częstotliwość ta nazywana jest rezonansową i oznaczana jest jako f_0 .
3. Dalsze zmniejszanie częstotliwości powoduje, że membrana i masa powietrza zaczynają się przemieszczać w kierunkach przeciwnych. Membrana na zewnątrz a powietrze w tunelu do we-

wnątrz obudowy. Powoduje to znoszenie się ciśnień akustycznych wytwarzanych przez membranę i otwór oraz strome opadanie charakterystyki częstotliwościowej.

Jak już zauważyliśmy przy zmianach częstotliwości odtwarzanego sygnału zmienia się faza fali promieniowanej przez otwór. W przypadku rezonansu jej kierunek jest zgodny z falą promieniowaną przez przednią część membrany i następuje sumowanie obu energii. Można uzyskać wzrost promieniowanej energii nawet do 6 dB ($2\times$) w odniesieniu do obudowy zamkniętej. Pozwala to na rozszerzenie zakresu odtwarzania niskich częstotliwości i wyeliminowanie dość przykrego podnoszenia częstotliwości rezonansowej głośnika w obudowie zamkniętej. Porównanie charakterystyk częstotliwościowych tego samego głośnika w obudowach zamkniętej i rezonansowej umożliwia rysunek 2.

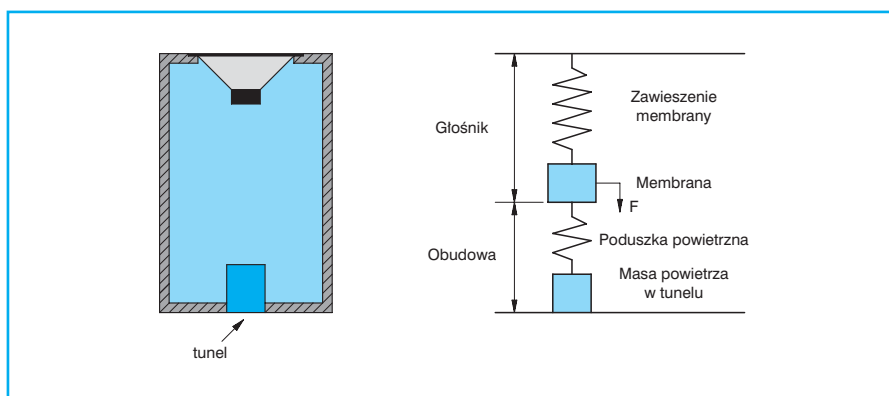
Obliczanie obudowy rezonansowej

Także i teraz przydadzą się poznane już wcześniej parametry głośników opracowane przez australijskich fizyków Thiele i Small'a. Na podstawie znajomości parametrów głośnika określimy wymiary obudowy i tunelu. Konkretnie obliczymy:

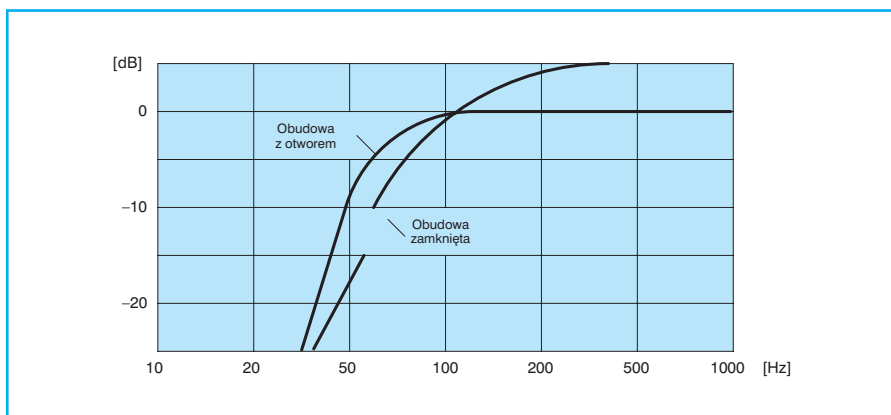
- objętość obudowy V_b [l],
- przekrój tunelu S_v [cm²].

Tabela 1 – Obudowa mała (<40 l), $Q_1=5$

Q_{ts}	a	b	h
0,25	5,16	2,02	1,53
0,26	4,23	1,84	1,47
0,27	3,85	1,76	1,42
0,28	3,50	1,68	1,37
0,29	3,18	1,61	1,33
0,30	2,90	1,54	1,29
0,31	2,65	1,47	1,25
0,32	2,42	1,41	1,21
0,33	2,16	1,35	1,18
0,34	2,01	1,29	1,15
0,35	1,83	1,24	1,12
0,36	1,67	1,19	1,09
0,37	1,52	1,13	1,07
0,38	1,38	1,08	1,04
0,39	1,26	1,04	1,02
0,40	1,14	0,99	1,00
0,41	1,03	0,95	0,97
0,42	0,94	0,91	0,95
0,43	0,86	0,87	0,93
0,44	0,78	0,84	0,91



Rys. 1 Mechanika obudowy z otworem



Rys. 2 Charakterystyki częstotliwościowe obudowy zamkniętej i rezonansowej

- długość tunelu L_v [cm],
 - częstotliwość graniczną f_b [Hz].
- Niezbędna do tego celu jest znajomość następujących parametrów głośnika:
- częstotliwość rezonansowa f_s [Hz],
 - dobroć wypadkowa Q_{ts} ,
 - objętość zastępcza V_{as} [l].

Głośnik przeznaczony do zastosowania w obudowie rezonansowej powinien mieć dobroć wypadkową mieszczącą się w granicach od 0,25 do 0,44. Pomocniczym parametrem przy określaniu współczynników wymaganych do obliczeń jest współczynnik strat obudowy Q_l . Wartość tego współczynnika przyjmuje się w zależności od przewidywanej objętości obudowy. Dla małych obudów o objętości mniejszej od 40 l współczynnik ten powinien wynosić 5. Dla obudów średnich

Tabela 2 – Obudowa średnia (40 ÷ 100 l), $Q_l = 7$

Q_{ts}	a	b	h
0,25	4,58	1,97	1,56
0,26	4,15	1,88	1,51
0,27	3,77	1,79	1,45
0,28	3,43	1,72	1,40
0,29	3,12	1,64	1,36
0,30	2,85	1,57	1,31
0,31	2,59	1,51	1,27
0,32	2,37	1,44	1,24
0,33	2,16	1,38	1,20
0,34	1,97	1,33	1,17
0,35	1,80	1,27	1,14
0,36	1,64	1,22	1,11
0,37	1,49	1,17	1,09
0,38	1,36	1,12	1,06
0,39	1,23	1,07	1,03
0,40	1,11	1,02	1,01
0,41	1,01	0,98	0,99
0,42	0,91	0,94	0,97
0,43	0,83	0,90	0,94
0,44	0,75	0,87	0,92

(40 ÷ 100 l) współczynnik wynosi 7. Dla obudów dużych o objętości większej od 100 l przyjmuje się wartość 10.

Mając współczynnik strat obudowy i dobroć wypadkową głośnika można korzystając z podanych niżej tabel określić współczynniki a, b, h niezbędne do dalszych obliczeń.

Wstępnie wielkość obudowy można oszacować na podstawie objętości zastępczej głośnika V_{as} . Do obliczenia objętości obudowy, należy na podstawie znajomości dobroci wypadkowej głośnika Q_{ts} , znaleźć współczynnik a z odpowiedniej tabeli. Dobroć wypadkową głośnika określa wiersz w tabeli, gdzie znajdziemy parametry pomocnicze a, b i h. Wymaganą objętość obudowy obliczymy z niżej podanego wzoru:

Tabela 3 – Obudowa duża (> 100 l), $Q_l = 10$

Q_{ts}	a	b	h
0,25	4,58	1,97	1,56
0,26	4,15	1,88	1,51
0,27	3,77	1,79	1,45
0,28	3,43	1,72	1,40
0,29	3,12	1,64	1,36
0,30	2,85	1,57	1,31
0,31	2,59	1,51	1,27
0,32	2,37	1,44	1,24
0,33	2,16	1,38	1,20
0,34	1,97	1,33	1,17
0,35	1,80	1,27	1,14
0,36	1,64	1,22	1,11
0,37	1,49	1,17	1,09
0,38	1,36	1,12	1,06
0,39	1,23	1,07	1,03
0,40	1,11	1,02	1,01
0,41	1,01	0,98	0,99
0,42	0,91	0,94	0,97
0,43	0,83	0,90	0,94
0,44	0,75	0,87	0,92

$$V_b = \frac{V_{as}}{a}$$

Jeśli obliczona objętość przekroczy zakładane granice trzeba zmienić tabelkę i ponownie znaleźć parametry pomocnicze a następnie obliczyć właściwą objętość obudowy.

Teraz musimy znaleźć wymiary tunelu tzn. jego przekrój i długość. Tunel jest rurą o przekroju kołowym lub prostokątnym wyprowadzoną na jednej ze ścianek obudowy. Najczęściej wykorzystuje się do wyprowadzenia tunelu ścianki przednią lub tylną.

Wewnętrzny przekrój tunelu S_v dobieramy ze względu na konieczność przeniesienia odpowiednio dużej energii promieniowanej przez tylną część membrany. Zbyt mały przekrój może stać się przyczyną niepożądanych szmerów i zakłóceń odtwarzanych dźwięków. W określeniu minimalnego przekroju tunelu pomoże Tabela 4. W tabeli tej minimalny przekrój jest uzależniony od zewnętrznego wymiaru obudowy głośnika D_g . Jednocześnie w tabeli podano średnicę tunelu o przekroju kołowym D_v .

Tabela 4 – Minimalny przekrój tunelu

D_g [mm]	S_v^{\min} [cm ²]	D_v [cm]
80	5	2,5
140	16	4,5
180	33	6,5
210	40	7,0
250	50	8,0
300	79	10,0

Należy wybrać nieco większy przekrój tunelu niż to wynika bezpośrednio z tabeli.

Do obliczenia długości tunelu służy bardzo skomplikowany wzór, wykorzystujący parametr pomocniczy h.

$$L_v = \frac{30000 \cdot S_v}{V_b \cdot (h \cdot f_s)^2} - 0,82 \cdot \sqrt{S_v}$$

S_v należy podstawić w [cm²], V_b w [l] a f_s w [Hz]. Zmieniając długość tunelu w niewielkim zakresie można dokonać tzw. strojenia obudowy tzn. modyfikować charakterystykę częstotliwościową głośnika w obudowie dla niskich częstotliwości.

Za pomocą kolejnego ale już bardzo prostego wzoru obliczymy częstotliwość graniczną f_b głośnika w obudowie z otworem. Poniżej tej częstotliwości charakterystyka częstotliwościowa szybko opada. Jej stromość jest dużo większa jak dla głośnika w obudowie zamkniętej.

$$f_b = f_s \cdot b$$

Zaletą obudowy basreflex jest dużo mniejszy wzrost częstotliwości granicznej w odniesieniu do wzrostu częstotliwości rezonansowej głośnika w obudowie zamkniętej.

■ Przykład obliczenia obudowy z otworem

Suche wzory najczęściej wywołują gęsią skórę u czytelników, dlatego po-przemy je konkretnym przykładem. Wykorzystamy parametry głośnika GDN 13/50 produkowanego przez TONSIL. Parametry te są następujące:

$$Q_{ts} = 0,32;$$

$$V_{as} = 11 \text{ l};$$

$$f_s = 51 \text{ Hz}.$$

Zakładając małą obudowę z Tabeli 1 znajdujemy parametry pomocnicze a, b, h dla dobroci wypadkowej 0,32:

$$a = 2,42;$$

$$b = 1,41;$$

$$h = 1,21$$

Obliczamy teraz objętość obudowy.

$$V_b = \frac{11}{2,42} = 8,58 \text{ l} \approx 8,6 \text{ l}$$

Przekrój tunelu określimy korzystając z Tabeli 4. Ponieważ średnica zewnętrzna głośnika jest zbliżona do 140 mm, przekrój tunelu powinien wynosić co najmniej 16 cm². Odpowiada to rurze o średnicy 4,5 ÷ 5 cm. Teraz korzystając ze „straszne-go” wzoru obliczymy długość tunelu.

$$\begin{aligned} L_v &= \frac{30000 \cdot 16}{8,6 \cdot (1,21 \cdot 51)^2} - 0,82 \cdot \sqrt{16} = \\ &= \frac{480000}{8,6 \cdot 3808} - 0,82 \cdot 4 = \frac{48000}{32750} - 3,28 = \\ &= 14,66 - 3,28 = 11,38 \approx 11,4 \text{ cm} \end{aligned}$$

Aż się spościłem a kalkulator zagrzał. Wynik na szczęście jest dość prawdopodobny. Pozostała jeszcze do obliczenia częstotliwość graniczna.

$$F_b = 51 \cdot 1,41 = 71,91 \approx 72 \text{ Hz}$$

Mam nadzieję, że gimnastyka rachunkowa nikomu nie zaszkodziła. Można zamiast żmudnych obliczeń skorzystać z odpowiedniego programu komputerowego. Po podstawieniu parametrów gło-

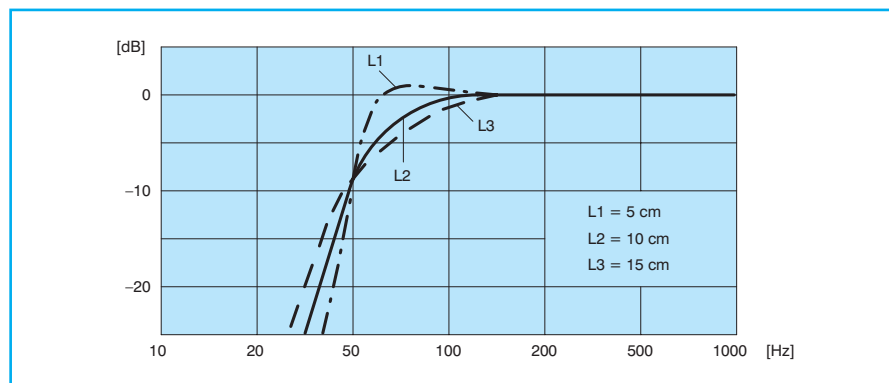
śnika uzyskuje się wyniki łącznie z charakterystyką częstotliwościową. Modyfikując parametry natychmiastowo widzi się na ekranie monitora efekty zmian. Jednak i tutaj trzeba zejść do praktyki, czyli wykonać obudowę i odsłuchowo sprawdzić poprawność dźwięku. Ewentualnie można dostrześć tunel przez zmianę jego długości.

■ Wykonanie i strojenie

Odnosnie materiałów i ogólnych zasad obowiązują te same wskazówki jak dla obudowy zamkniętej. Tunel może być wykonany jako rura z tworzywa sztucznego np. PCV. Przy próbach może być zwinięty z grubego kartonu i skleiony. Często tunel wykonuje się jako szczelinę w obudowie i przedłuża ścianką z materiału tego samego co i obudowa.

Otwór na przedniej ścianie – czy tylnej? Najpraktyczniejsze jest umieszczenie go na ścianie przedniej. Mogą wtedy być słyszane szумы przepływającego nim powietrza. Umieszczenie otworu na ścianie tylnej może być spowodowane względami estetycznymi lub brakiem miejsca na ścianie przedniej. Rozwiązanie to zmniejsza możliwość słyszenia szumów powietrza. Wymagane jest wtedy odsunięcie głośnika w obudowie od ściany znajdującej się za głośnikiem. Głośnik taki powinien być umieszczony na podstawie. Jedynie w przypadku subwoofera wskazane jest umieszczenie na podłodze.

Obudowa powinna być szczelnie sklejona, jak i uszczelnione powinny być miejsca styku z głośnikiem czy gniazdem. Przy dużych mocach głośników niskotonowych i większych wymiarach obudowy wskazane jest stosowanie wewnętrznych uźebrowań zwiększających sztywność obudowy. Przy odtwarzaniu niskich częstotliwości nie powinno się wyczuwać wibracji ścianek obudowy. Jeśli w tej samej



Rys. 3 Wpływ długości tunelu

obudowie montowane są głośniki wysokotonowe także powinny być szczelne i szczelnie zamontowane. Głośnik średnionowy powinien znajdować się w oddzielnej komorze. Obudowa powinna być wyłożona materiałem tłumiącym, a przynajmniej jej ścianki. Otwór wewnętrzny tunelu powinien być odsłonięty.

Kilkakrotnie wspominałem o strojeniu tunelu. Czas aby wyjaśnić na czym ono polega. Zmieniając w niewielkim zakresie długość tunelu można modyfikować charakterystykę częstotliwościową głośnika w obudowie. Prezentuje to rysunek 3.

Na przykładowym wykresie nominalna długość tunelu (obliczona) wynosi 10 cm. Zmniejszenie tej długości powoduje wypuklenie niskich częstotliwości i jednocześnie szybkie opadanie charakterystyki częstotliwościowej. Pogarszają się właściwości impulsowe, bas staje się rozłazły i buczący. Wydłużenie tunelu zmniejsza natężenie niskich tonów, ale poprawiają się właściwości impulsowe – dynamika basów jest lepsza. Wybór należy do konstruktora i użytkownika, a modyfikacje te pozwalają na dostosowanie właściwości głośnika w obudowie do właściwości pomieszczenia.

Przedstawione rozważania dotyczyły głośników niskotonowych i ich obudów. Wspólnie poznaliśmy warunki prawidłowego odtwarzania basów i maksymalnego wykorzystania głośnika w tym zakresie. Podobne zasady obowiązują przy odtwarzaniu średnich tonów, chociaż głośniki pracują tu zazwyczaj dużo powyżej częstotliwości rezonansowej i dobór obudowy nie jest aż tak krytyczny. Głośniki wysokotonowe zwykle już są fabrycznie montowane w szczelnej obudowie zamkniętej. Dlatego o rodzaju obudowy i jej rozmiarach decydują parametry odtwarzania niskich częstotliwości i parametry głośnika niskotonowego.

Zwrotnice i filtry głośnikowe

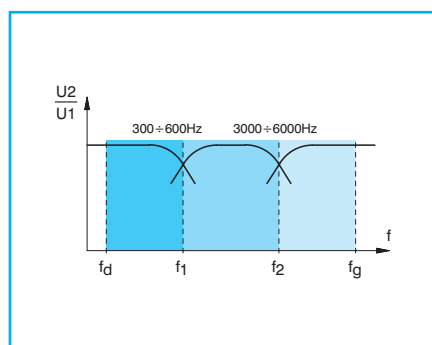
Jest to uzupełnienie do cyklu „Głośniki i obudowy”. Opisujemy rodzaje filtrów biernych wykorzystywanych do rozdzielania sygnałów akustycznych doprowadzanych do głośników. Zestawy tych filtrów tworzą tzw. zwrotnice głośnikowe i są wykorzystywane przy budowie zespołów głośnikowych.

Działanie i rodzaje filtrów głośnikowych

Jak już wcześniej wspominaliśmy, nie jest możliwe odtworzenie pełnego zakresu częstotliwości słyszalnych o odpowiednio dobrej jakości dźwięku, z jednego głośnika. Dlatego właśnie buduje się zespoły głośnikowe zawierające co najmniej dwa głośniki. Głośniki te przenoszą różne lecz uzupełniające się fragmenty pasma akustycznego, które są specjalnie dla nich wydzielane z całego widma odtwarzanych częstotliwości.

Układami umożliwiającymi wydzielenie odpowiednich pasm częstotliwości są filtry. W przypadku filtrów głośnikowych są to najczęściej filtry dolno i górno przepustowe, a sporadycznie filtry środkowo przepustowe. Filtry stosowane między wzmacniaczem mcz. a głośnikami są filtrami biernymi tzn. zbudowane są jedynie z elementów biernych (indukcyjności L , pojemności C i ewentualnie rezystancji R).

Zestaw filtrów kierujący odpowiednie pasma częstotliwości do głośników nazywany jest zwrotnicą głośnikową. W najprostszym przypadku zwrotnica składa się z dwóch filtrów – dolno i górno przepustowego. Chociaż spotyka się zestawy gdzie wykorzystuje się naturalne ograniczanie pasma odtwarzanych częstotliwości przez głośnik niskotonowy i jedynie dołączenie głośnika wysokotonowego przez kondensator spełniający rolę filtru górno przepustowego.



Rys. 1 Podział pasm zwrotnicy głośnikowej trójdrożnej

Zwrotnica zawierająca dwa filtry nazywana jest dwudrożną. Także zestaw głośnikowy korzystający z głośników niskotonowego i wysokotonowego nazywany jest dwudrożnym. Trzy filtry służą do realizacji zwrotnicy trójdrożnej i wykorzystywane są w zespole głośnikowym trójdrożnym (z trzema głośnikami). Bardzo rzadko buduje się zestawy czterodrożne. Przykładowy podział pasm częstotliwości zwrotnicy trójdrożnej prezentuje rysunek 1.

Wykres ten przedstawia zależność stosunku napięcia wyjściowego U_2 każdego filtru do napięcia wejściowego U_1 w funkcji częstotliwości. Częstotliwość f_d jest dolną częstotliwością graniczną odtwarzaną przez głośnik niskotonowy. Częstotliwość f_g jest natomiast górną częstotliwością graniczną odtwarzaną przez głośnik wysokotonowy. Częstotliwości f_1 i f_2 to tzw. częstotliwości podziału pasm. Między nimi mieści się pasmo głośnika średnionowego.

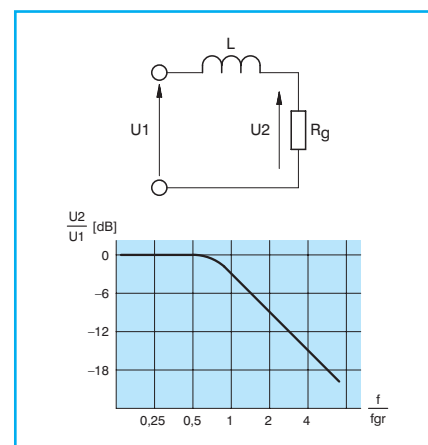
Częstotliwości podziału powinny odpowiadać spadkowi stosunku U_2/U_1 o 3 dB. Odpowiada to spadkowi mocy na głośniku do połowy. Dzięki temu przy jednoczesnym odtwarzaniu przez dwa głośniki np. średnio i wysokotonowy nie nastąpi zmiana natężenia dźwięku odtwarzanego przez zestaw (pod warunkiem jednakowej skuteczności obu głośników). Częstotliwości podziału mieszczą się zwykle w podanych zakresach. Oczywiście zakresy częstotliwości odtwarzanych przez głośniki powinny być szersze niż częstotliwości podziału. Zestaw dwudrożny nie posiada podziału na częstotliwości f_1 . Pomocne przy ustalaniu częstotliwości podziału mogą być zalecenia producentów głośników podawane wraz z parametrami.

Do budowy filtrów biernych wykorzystuje się elementy reaktancyjne (indukcyjności i pojemności), których reaktancja (odpowiednik rezystancji rezystora) zależy od częstotliwości (pomijam tu kwestie fazy prądu względem napięcia). Reaktancja indukcyjna X_L wzrasta ze wzrostem częstotliwości, a pojemnościowa X_C maleje.

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Przykład filtru dolnoprzepustowego zawierający tylko jedną indukcyjność pokazany jest na rysunku 2.



Rys. 2 Filtr dolno przepustowy

Dla uproszczenia rozważań zastępuje się głośnik rezystancją co jedynie w przybliżeniu odpowiada rzeczywistości. Faktycznie cewka głośnika oprócz rezystancji posiada jednak indukcyjność i pojemność własną. Nie będziemy jednak komplikować sobie życia i je pominiemy.

Szeregowo połączone indukcyjność L i rezystancja głośnika R_g stanowią dzielnik napięciowy. Przy niskich częstotliwościach mała reaktancja indukcyjności nie powoduje obniżenia napięcia na rezystancji. Przy częstotliwości granicznej f_{gr} reaktancja indukcyjności jest równa rezystancji i następuje spadek napięcia wyjściowego U_2 o 3 dB ($0,7 \cdot U_1$). W przypadku dzielnika rezystancyjnego byłoby to 6 dB czyli $0,5 \cdot U_1$. Współczynnik 0,7 wynika z tego, że napięcia na indukcyjności i rezystancji są przesunięte w fazie o 90° .

Dalszy wzrost częstotliwości powoduje wzrost reaktancji i dalszy spadek napięcia na rezystancji. Nachylenie spadku napięcia wynosi -6 dB/Oktawa. Oktawa oznacza podwojenie częstotliwości. Na osi poziomej wykresu podano tzw. częstotliwość znormalizowaną czyli stosunek aktualnej częstotliwości f do częstotliwości granicznej f_{gr} . Filtr o nachyleniu 6 dB/Okt. nazywany jest także filtrem pierwszego rzędu. Zakres częstotliwości o małym tłumieniu nazywany jest pasmem przepustowym (do f_{gr}). Zakres częstotliwości

w jakim wzrasta tłumienie nazywany jest pasmem zaporowym (powyżej f_{gr}).

Wartość indukcyjności można wyznaczyć z warunku równości reaktancji i rezystancji dla częstotliwości granicznej. Po przekształceniu:

$$L = \frac{159 \cdot R_g}{f_{gr}}$$

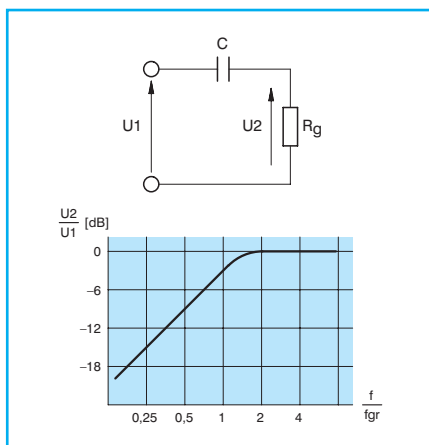
gdzie:

L – indukcyjność [mH],

R_g – rezystancja znamionowa głośnika (niskotonowego) [Ω],

f_{gr} – częstotliwość graniczna [Hz].

Wykorzystując kondensator można zbudować filtr górno przepustowy pokazany na rys. 3.



Rys. 3 Filtr górno przepustowy

Reaktancja kondensatora C maleje ze wzrostem częstotliwości i przy częstotliwości granicznej jest równa rezystancji R_g . Filtr ten tłumy sygnały o częstotliwościach mniejszych od częstotliwości granicznej f_{gr} . Nachylenie jego charakterystyki wynosi 6 dB/Okt. Pojemność kondensatora można obliczyć z podanego niżej wzoru:

$$C = \frac{159\,000}{f_{gr} \cdot R_g}$$

gdzie:

C – pojemność [μF],

R_g – rezystancja znamionowa głośnika (wysokotonowego) [Ω],

f_{gr} – częstotliwość graniczna [Hz].

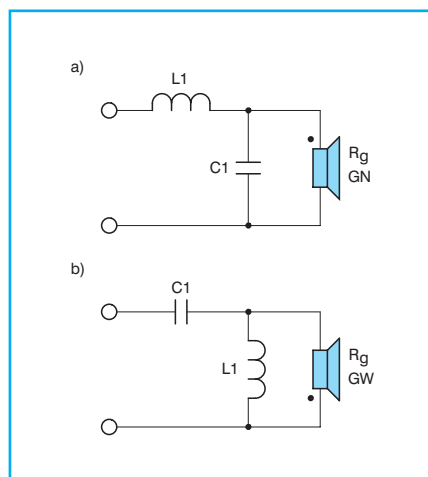
Zwrotnicę głośnikową uzyskamy przez połączenie równoległe wejść obu filtrów. Do wyjścia filtru dolno przepustowego podłączymy głośnik niskotonowy a do wyjścia filtru górno przepustowego wysokotonowy. W przypadku zwrotnicy głośnikowej należy pamiętać o zapewnieniu możliwie stałej impe-

dancji zestawu widzianej przez wzmacniacz w całym paśmie odtwarzanych częstotliwości. Zadanie to jest ułatwione po zastosowaniu głośników o takich samych rezystancjach. Dodatkowo pojemność i indukcyjność powinny być związane następującą zależnością (w nawiasach kwadratowych ujęto jednostki wielkości w kolejności ich występowania we wzorze):

$$C [\mu F] = \frac{1\,000 \cdot L [mH]}{R_g^2 [\Omega]}$$

Zaletą filtrów jednoelementowych jest prostota. Wadą natomiast szeroki obszar częstotliwości w jakim promieniują jednocześnie oba głośniki (wokół f_{gr}). Mogą wystąpić niepożądane interferencje i wzmocnienie lub osłabienie pewnych częstotliwości. Przy częstotliwości granicznej występuje przesunięcie fazy między sygnałami obu głośników wynoszące 90° . Oba głośniki powinny być podłączone w fazach zgodnych do wyjść zwrotnicy.

Zmniejszenie obszaru wzajemnego oddziaływania głośników można uzyskać przez zastosowanie filtrów o większym nachyleniu charakterystyki w obszarze tłumienia. Dodając dodatkowe elementy reaktancyjne równoległe do głośników uzyskuje się filtry o nachyleniu charakterystyki wynoszącym 12 dB/Okt. Schematy takich filtrów pokazuje rysunek 4.



Rys. 4 Filtry o nachyleniu 12 dB/Okt.

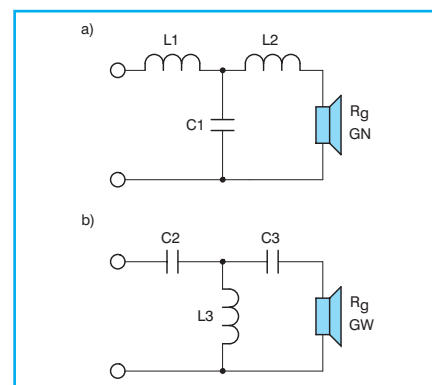
Filtr dolnoprzepustowy to oczywiście rys. 4a), a górno przepustowy – rys. 4b). Są one nazywane filtrami typu L. Zaletą ich jest utrzymywanie stałej impedancji wejściowej przy jednakowych rezystancjach głośników i wartościach L_1 i C_1 obliczonych wg niżej podanych wzorów:

$$L_1 [mH] = \frac{225 \cdot R_g [\Omega]}{f [Hz]}$$

$$C_1 [\mu F] = \frac{112\,500}{R_g [\Omega] \cdot f [Hz]}$$

Częstotliwość f jest częstotliwością podziału dla zestawu dwudrożnego zawierającą się w przedziale $3000 \div 6000$ Hz, zależnie od właściwości częstotliwościowych użytych głośników. Z uwagi na przesunięcie fazy między wyjściami filtrów o 180° , głośniki powinny być do takiej zwrotnicy podłączone w fazach przeciwnych, co na rysunku 4 zaznaczono kropkami.

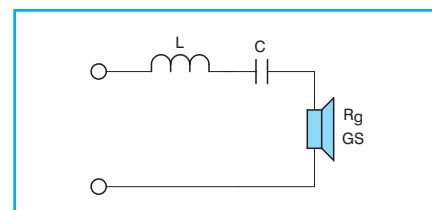
Dodanie kolejnego elementu reaktancyjnego zwiększa nachylenie charakterystyki w obszarze tłumienia do 18 dB/Okt. Otrzymane w ten sposób filtry typu T pokazuje rysunek 5. Filtr dolno przepustowy (rys. 5a) i górno przepustowy (rys. 5b).



Rys. 5 Filtry o nachyleniu 18 dB/Okt.

Tym razem już nie przytoczę wzorów. Natomiast w dalszej części podam tabelki na podstawie, których łatwo znajdziemy elementy filtrów zwrotnic dwudrożnych. Osobiście nie polecam amatorsko konstruować zestawów trójdrożnych. W przypadku zwrotnicy z filtrami T głośniki należy podłączać w jednakowych fazach.

Zwrotnicę trójdrożną można w najprostszy sposób uzyskać przez dołączenie dodatkowego głośnika wysokotonowego przez kondensator do zasadniczego głośnika wysokotonowego dołączonego przez filtr górno przepustowy. Innym roz-



Rys. 6 Filtr środkowo przepustowy

wiązaniem jest dołączenie głośnika średniotonowego przez filtr środkowo przepustowy pokazany na rysunku 6.

Filtr ten wykorzystuje rezonans szeregowy indukcyjności i pojemności. Wartości indukcyjności i pojemności obliczyć można z podanych niżej zależności.

$$L [mH] = \frac{159 \cdot R_g [\Omega]}{f_s [Hz]}$$

$$C [\mu F] = \frac{159\,000}{f_s [Hz] \cdot R_g [\Omega]}$$

gdzie:

f_s – częstotliwość środkowa pasma [Hz].

Istotna jest szerokość pasma przenoszenia B filtru, która wynosi:

$$B [Hz] = \frac{159 \cdot R_g [\Omega]}{L [mH]}$$

Jak w każdym obwodzie rezonansowym poszerzenie pasma można uzyskać przez zmniejszenie dobroci, czyli zmniejszenie indukcyjności L. Oczywiście aby utrzymać częstotliwość środkową trzeba tyle samo razy zwiększyć pojemność C.

Szeregowy obwód rezonansowy z rezystancją zamiast głośnika jest często wykorzystywany do korekcji właściwości głośnika (stłumienie rezonansu) lub do wyrównania przebiegu impedancji zestawu w funkcji częstotliwości jako tzw. sobel.

Niżej podaję obiecane tabele. Tabela 1 jest odpowiednia dla głośników o rezystan-

cji znamionowej 4 Ω , a Tabela 2 dla głośników o rezystancji 8 Ω . Oznaczenia elementów w tabelach odpowiadają podanym wyżej schematom odpowiednich filtrów. Pojemności kondensatorów są wyrażone w $[\mu F]$, a indukcyjności w $[mH]$. Częstotliwości 125 ÷ 250 Hz dotyczą filtrów do subwooferów. Zakres od 315 do 1000 Hz dotyczy filtrów dolnoprzepustowych dla zestawów trójdrożnych. Zakres od 2000 do 6300 Hz to częstotliwości podziału dla zestawów dwudrożnych lub filtrów górno przepustowych zestawów trójdrożnych.

Posługiwanie się tabelką jest bardzo proste. Po zdecydowaniu się na rezystancję głośników wybieramy odpowiednią tabelkę. W wierszu odpowiadającym wybranej częstotliwości podziału znajdziemy wartości elementów zwrotnicy, odpowiednio do rodzaju filtru.

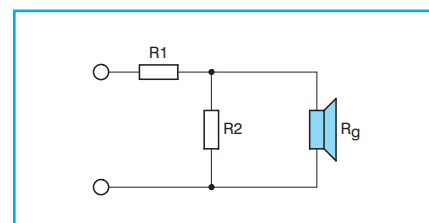
Innym obwodem spotykanym w układzie elektrycznym zespołów głośnikowych jest rezystorowy dzielnik napięcia. Zadaniem dzielnika jest zmniejszenie poziomu napięcia doprowadzanego do głośnika w celu zmniejszenia natężenia dźwięku. Stosuje się to dla wyrównania skuteczności głośnika wysokotonowego w odniesieniu do niskotonowego. Dzielnik może być zrealizowany przez włączenie rezystora w szereg z głośnikiem. Daje to wprawdzie obniżenie napięcia na głośniku, ale jednocześnie wzrasta sumaryczna rezystancja. Zastosowanie dwóch rezystorów pozwala na wyeliminowanie tej wady – uzyskujemy podział napięcia przy zachowaniu tej samej rezystancji.

Tabela 2 – Elementy filtrów dla głośnika 8 Ω

f	filtr 6 dB/Okt		filtr 12 dB/okt		filtr 18 dB/Okt					
	L	C	L1	C1	L1	L2	L3	C1	C2	C3
[Hz]	[mH]	[μF]	[mH]	[μF]	[mH]	[mH]	[mH]	[μF]	[μF]	[μF]
125	10	150	15	100	15	4,7	8,2	220	100	330
160	8,2	120	12	82	12	3,9	6,8	150	82	270
200	6,8	100	10	68	10	3,3	4,7	120	68	220
250	5,6	82	8,2	56	8,2	2,2	3,9	100	47	150
315	3,9	56	5,6	39	6,8	1,8	2,7	82	39	120
400	3,3	47	4,7	33	4,7	1,5	2,2	68	33	100
500	2,7	39	3,9	27	3,9	1,2	1,8	47	27	82
630	2,2	33	2,7	22	3,3	1,0	1,5	39	22	68
1000	1,2	18	1,8	15	2,2	0,68	1,0	27	12	39
2000	0,68	10	1,0	6,8	1,0	0,33	0,47	12	6,8	22
2500	0,56	8,2	0,82	5,6	0,82	0,22	0,39	10	4,7	15
3150	0,39	5,6	0,56	3,9	0,68	0,18	0,27	8,2	3,9	12
4000	0,33	4,7	0,47	3,3	0,47	0,15	0,22	6,8	3,3	10
5000	0,27	3,9	0,39	2,7	0,39	0,12	0,18	4,7	2,7	8,2
6300	0,22	3,3	0,27	2,2	0,33	0,1	0,15	3,9	2,2	6,8

Tabela 1 – Elementy filtrów dla głośnika 4 Ω

f	filtr 6 dB/Okt		filtr 12 dB/okt		filtr 18 dB/Ok.					
	L	C	L1	C1	L1	L2	L3	C1	C2	C3
[Hz]	[mH]	[μF]	[mH]	[μF]	[mH]	[mH]	[mH]	[μF]	[μF]	[μF]
125	5,6	330	8,2	220	8,2	2,7	3,9	470	220	680
160	3,9	220	5,6	180	6,8	2,2	3,3	330	150	470
200	3,3	180	4,7	120	4,7	1,5	2,7	270	120	390
250	2,7	150	3,9	100	3,9	1,2	1,8	220	100	330
315	2,2	120	2,7	82	3,3	1,0	1,5	180	82	270
400	1,8	100	2,2	68	2,7	0,82	1,2	120	68	220
500	1,2	82	1,8	56	2,2	0,68	1,0	100	56	150
630	1,0	56	1,5	39	1,5	0,47	0,82	82	39	120
1000	0,68	39	1,0	27	1,0	0,33	0,47	56	27	82
2000	0,33	18	0,47	12	0,47	0,15	0,27	27	12	39
2500	0,27	15	0,39	10	0,39	0,12	0,18	22	10	33
3150	0,22	12	0,27	8,2	0,33	0,1	0,15	18	8,2	27
4000	0,18	10	0,22	6,8	0,27	0,08	0,12	12	6,8	22
5000	0,12	6,8	0,18	5,6	0,18	0,06	0,1	10	5,6	15
6300	0,1	5,6	0,15	3,9	0,15	0,047	0,082	8,2	3,9	12



Rys. 7 Dzielnik napięcia

Z obliczeniem elementów dzielnika na pewno każdy sobie poradzi znając podstawy elektrotechniki. Nie chcąc narażać nikogo na stresy podam jednak tabelkę.

Przy współpracy filtru z rzeczywistym głośnikiem pojawia się wpływ parametrów głośnika na funkcjonowanie filtru. Może to być np. rezonans indukcyjności cewki głośnika z pojemnością filtru. Dlatego zawsze zaprojektowana zwrotnica wymaga sprawdzenia pomiarowego (elektroakustycznego) i odsłuchowego po zastosowaniu w zestawie głośnikowym.

Tabela 1 – Elementy dzielnika napięciowego

	$R_g = 4 \Omega$		$R_g = 8 \Omega$	
Tłumienie	R1	R2	R1	R2
[db]	[Ω]	[Ω]	[Ω]	[Ω]
1	0,47	33	0,82	68
2	0,82	15	1,8	33
3	1,2	10	2,2	18
4	1,5	6,8	2,7	15
5	1,8	5,6	3,3	10
6	2,2	3,9	3,9	8,2

W warunkach amatorskich zazwyczaj ograniczamy się do sprawdzenia odstuchowego – chociaż można tu wykorzystać opisywany w PE analizator widma.

„Proste jest piękne” – mniej problemów stwarzają filtry proste i dlatego zalecam ich stosowanie. Bardziej złożone filtry wymagają kłopotliwego dobierania elementów i badań elektroakustycznych. Co jest charakterystyczne to dobre głośniki nie wymagają ekstra filtrów. Głośnik niskotonowy najlepiej pracuje podłączony bezpośrednio do wyjścia wzmacniacza. Rezystancja cewki filtru włączona między wyjście wzmacniacza a głośnik zmniejszy tłumienie elektryczne głośnika. Powinna więc być jak najmniejsza.

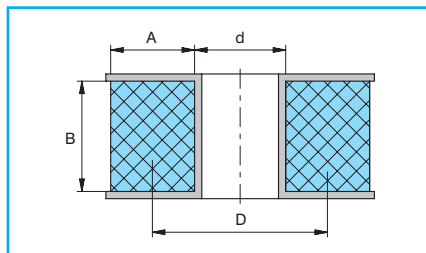
■ Elementy stosowane w zwrotnicach głośnikowych

Pomimo stosunkowo niskich częstotliwości z jakimi mamy do czynienia w zespołach głośnikowych, elementy stosowane do budowy zwrotnic głośnikowych powinny posiadać dobre parametry i zapewniać przenoszenie odpowiednio dużych prądów i mocy do głośników. Istnieją firmy specjalizujące się w produkcji elementów do zwrotnic głośnikowych a także firmy je rozprowadzające.

Cewki jak już podano powinny mieć jak najmniejszą rezystancję. Muszą więc być nawinięte odpowiednio grubym drutem. Najkorzystniejsze właściwości posiadają cewki powietrzne – nie wprowadzają zniekształceń nieliniowych. Wadą ich jest duża liczba zwojów wymagana do uzyskania odpowiednio dużej indukcyjności. Zastosowanie rdzenia ferromagnetycznego pozwala na znaczne zwiększenie indukcyjności a więc w konsekwencji daje zmniejszenie liczby zwojów i rezystancji cewki. Rdzenie nie mogą być zamknięte – wymagana jest przynajmniej kilkumilimetrowa szczelina. Mniejsze zniekształcenia mają rdzenie ferrytowe niż żelazne. Przy dużych

prądach ferryt natomiast wprowadza silne ograniczanie. Przy rdzeniu żelaznym przebiega ono znacznie łagodniej.

Można zdobyć się na wykonanie cewki filtru we własnym zakresie i dlatego przytoczę zależności pozwalające na obliczenie wymaganej liczby zwojów dla uzyskania zakładanej indukcyjności cewki powietrznej. Charakterystyczne wymiary cewki są podane na rysunku 8.



Rys. 8 Wymiary cewki powietrznej

Wzór ogólny na obliczenie takiej cewki jest dość skomplikowany:

$$z = 10^3 \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (D + 9B + 10A)}{80D^2}}$$

gdzie:

z – liczba zwojów,
L – wymagana indukcyjność [mH],
A, B, D – wymiary cewki [cm].

Wzór ten można znacznie uprościć jeśli wymiary cewki dobrane są w odpowiednich proporcjach: $d = A$; $A = 1,2B$; $D = 2A = 2,4B$. Wówczas liczbę zwojów można obliczyć z zależności:

$$z = 246 \cdot \sqrt{\frac{L [mH]}{B [cm]}}$$

Najlepiej byłoby jednak pójść do sklepu i kupić elementy o podanych parametrach.

Do nawinięcia cewki przygotować trzeba odpowiedni karkas i co najistotniejsze drut nawojowy w emalii lub bawełnie. Średnica drutu może zawierać się w przedziale od 0,7 do 2 mm. Głównym kryterium doboru średnicy drutu jest rezystancja cewki. Po obliczeniu ilości zwojów obliczymy powierzchnię przekroju uzwojenia:

$$s = z \cdot d_d^2$$

gdzie:

s – przekrój uzwojenia ($A \times B$) [mm²],
z – ilość zwojów,
 d_d – średnica drutu nawojowego [mm].

Po obliczeniu wymiaru B na podstawie podanych wyżej proporcji obliczymy pozostałe wymiary cewki:

$$B = 0,91 \cdot \sqrt{s}$$

Kondensatory stosowane w filtrach powinny mieć duże pojemności. Jako największe pojemności używane są kondensatory elektrolityczne. Powinny to być tzw. kondensatory bipolarne – nie wymagające polaryzacji napięcia stałego. Kondensator taki można uzyskać przez połączenie szeregowo w przeciwnym kierunku dwóch kondensatorów polarnych. Kondensatory elektrolityczne powinny mieć napięcie znamionowe 50 ÷ 100 V. Do łączenia szeregowo najlepsze będą kondensatory przewidziane do pracy impulsowej o małej impedancji szeregowej tzw. ESR.

Przy wyższych częstotliwościach (mniejsze pojemności) lepsze parametry posiadają kondensatory poliestrowe (KSE, MKSE, MKT), a jeszcze lepsze kondensatory z dielektrykiem polipropylenowym (MKP).

Elementy zwrotnicy można zamontować na płytce drukowanej. Dość często spotykanym rozwiązaniem jest montaż powietrzny. Oczywiście skomplikowaną zwrotnicę lepiej wykonać solidnie na płytce. Płytkę może być bezpośrednio połączona z zaciskami zewnętrznymi zespołu głośnikowego. Podłączenie głośników do płytki wykonać przewodami o odpowiednim przekroju pamiętając o fazach głośników.

♦ R.K.

Poprawki do budzika

W układzie budzika wprowadzono kilka poprawek. Oto ich lista:

1. Masa układu US2 (ULN2003A) na płytce powinna być na nóżce 8 (przedłużyć zwórkę idącą poprzecznie do nóżki 9 z C5).
2. Diody LED D1, D2 należy montować odwrotnie podłączając katodę D1 do masy zegara, a anodę D2 do nóżki 21 układu US1 „Budzik”.
3. Zamienić należy wyprowadzenia układu US1 „Budzik”. Nóżkę 6 US1 podłącza się do złącza GK’ pole 2, nóżkę 24 (RB3) US1 do R7.
4. Na płytce klawiatury nóżka 2 złącza GK powinna być połączona z dolnym, lewym, wolnym oczkiem włącznika „Urząd.” Patrząc od strony montażu.
5. Do kondensatora C9 należy dołączyć równolegle rezystor 2,4 kΩ.
6. Zmienić wartość rezystora R13 z 4,7 kΩ na 47 kΩ.

♦ mgr inż. Tomasz Kwiatkowski