

Filtry zespołów głośnikowych (1)

W artykule podano podstawowe wiadomości o biernych filtrach elektrycznych stosowanych w zespołach głośnikowych. Dane zawarte w artykule powinny ułatwić konstruowanie zespołów głośnikowych w warunkach amatorskich.

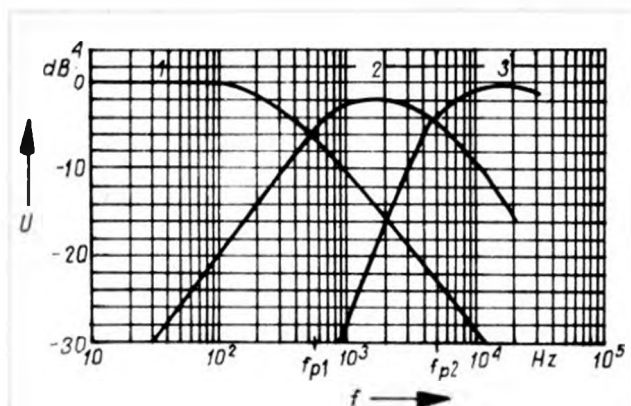
Dominująca część zespołów głośnikowych jest wyposażona w bierne filtry elektryczne (zwrotnice prądowe). Wiele argumentów przemawia za tym, że i w okresie nadchodzących lat, zespoły głośnikowe wyposażone w takie filtry będą najczęściej stosowane.

Amator-konstruktor powinien dysponować środkami umożliwiającymi wykonanie pomiarów elektrycznych, takich jak: pomiar charakterystyki impedancji wejściowej głośników i zespołów głośnikowych oraz pomiar charakterystyk napięcia na wyjściach filtrów zespołu głośnikowego. Poza tym pożądane jest posiadanie przyrządów umożliwiających pomiary wartości elementów R, L, C. Bez wymienionych pomiarów elektrycznych „zestrojenie” filtrów zespołu głośnikowego jest bardzo problematyczne.

Przy braku możliwości wykonania obiektywnych pomiarów akustycznych, szczególne znaczenie ma umiejętność przeprowadzania odsłuchowych prób subiektywnych zespołów głośnikowych. Konieczne jest zdobycie wystarczającego doświadczenia. Pierwsze konstrukcje bywają nieudane. Następne są coraz lepsze, a najlepsze konstrukcje amatorskie przewyższają niekiedy jakością standardowe wyroby fabryczne.

Zadaniem zespołu filtrów jest przeniesienie, do poszczególnych głośników zespołu, składowych sygnału wejściowego o częstotliwościach leżących w wybranych zakresach częstotliwości. Na rys. 1 przedstawiono przykładowo charakterystyki filtrów trójdrożnego zespołu głośnikowego.

Komplet filtrów składa się z trzech filtrów (dolnoprzepustowego, środkowoprzepustowego i górnoprzepustowego), do których wyjść są przyłączone odpowiednio głośniki: niskotonowy (N), średnionotonowy (M) i wysokotonowy (W). Jeżeli charakterystyki napięcia na wyjściach filtrów są właściwie skorelowane i zastosowane głośniki mają jednakową efektywność, to charakterystyka przenoszenia zespołu głośnikowego będzie przebiegać prawidłowo od jakiejś najmniejszej częstotliwości f_g , do jakiejś największej częstotliwości f_o , wynikających z parametrów zastosowanych głośników i właściwości



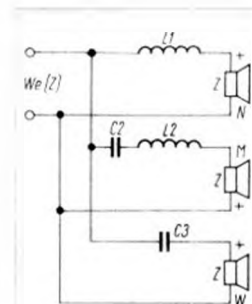
Rys. 1. Charakterystyki filtrów trójdrożnego zespołu głośnikowego (przykład)
1 — filtr dolnoprzepustowy 6 dB/okt. 2 — filtr środkowoprzepustowy 6 dB/okt. 3 — filtr górnoprzepustowy 12 dB/okt. f_{p1} , f_{p2} — częstotliwości podziału zespołu filtrów

obudowy. Z przebiegu charakterystyk filtrów można wyznaczyć częstotliwości podziału. W przypadku przedstawionym na rys. 1 wynoszą one:

$$f_{p1} = 550 \text{ Hz}, \quad f_{p2} = 5000 \text{ Hz}.$$

Układy filtrów

Na rys. 2 przedstawiono schemat zespołu filtrów 6 dB/okt¹⁾ (filtry pierwszego rzędu). Filtr dolnoprzepustowy składa się z cewki L1, której impedancja zwiększa się w miarę zwiększania się częstotliwości ograniczając wartość przepływającego przez głośnik niskotonowy (N) prądu. Przeciwnie działa kondensator C3 w obwodzie głośnika wysokotonowego (W), który ogranicza przepływ składowych sygnału o małych częstotliwościach. Filtr środkowoprzepustowy składa się z kondensatora C2 i cewki L2, których wartości są tak dobrane, aby zostało wydzielone określone pasmo częstotliwości przeznaczone dla głośnika średnionotonowego (M — od ang. medium, tak oznaczają swoje głośniki ZWG Tonsil).



Rys. 2. Schemat filtrów 6 dB/okt trójdrożnego zespołu głośnikowego

Wzory, które mogą posłużyć do obliczenia wartości elementów filtrów, przy założeniu, że głośniki przedstawiają sobą obciążenie czysto rezystancyjne, są następujące:

$$L1 = \frac{160 \cdot Z}{f_{p1}} \quad [\text{mH}] \quad L2 = \frac{160 \cdot Z}{f_{p2}} \quad [\text{mH}]$$

$$C2 = \frac{160 \cdot 000}{f_{p1} \cdot Z} \quad (\mu\text{F}) \quad C3 = \frac{160 \cdot 000}{f_{p2} \cdot Z} \quad (\mu\text{F})$$

przy czym:

Z — wartość znamionowej impedancji głośnika $[\Omega]$.

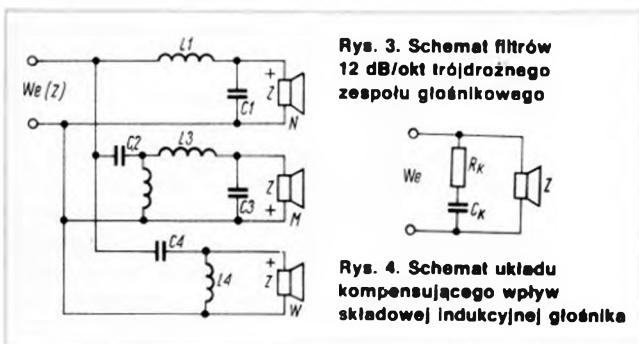
f_{p1} i f_{p2} — przyjęte częstotliwości podziału $[\text{Hz}]$.

Załóżmy, że do posiadanego kompletu głośników produkcji krajowej, o impedancji 8Ω , przyjęliśmy częstotliwości podziału: $f_{p1} = 1000 \text{ Hz}$, $f_{p2} = 6500 \text{ Hz}$. Obliczone wg wzorów wartości elementów filtrów są następujące: $L1 = 1,3 \text{ mH}$, $C2 = 20 \mu\text{F}$, $L2 = 0,20 \text{ mH}$, $C3 = 3,1 \mu\text{F}$.

Z opisywanych wielokrotnie w „Re” zespołów głośnikowych, wzorowanych na zespołach ZWG Tonsil wiadomo, że stosowane przez tę wytwórnię, w trójdrożnych zespołach, filtry 6 dB/okt mają inne wartości, a mianowicie: $L1 = 2,4 \text{ mH}$, $C2 = 6,8 - 10 \mu\text{F}$, $L2 = 0,22 \text{ mH}$, $C3 = 2,2 \mu\text{F}$. Przyczyną tych różnic jest złożony charakter impedancji wejściowej głośników, której nie można traktować jako rezystancji.

Najistotniejszym czynnikiem jest składowa indukcyjna impedancji wejściowej głośników, która powoduje, że wartość impedancji wejściowej głośników (moduł) zwiększa się mniej lub bardziej wraz ze zwiększaniem częstotliwości przebiegu zasilającego. Powoduje to konieczność stosowania w filtrach elementów o odpowiednio skorygowanych wartościach. Na rys. 3 jest przedstawiony schemat klasyczny filtrów 12 dB/okt (drugiego rzędu), w którym każdy z obwodów zawiera elementy L i C.

¹⁾ Oktawa jest jednostką interwału częstotliwości; między dwiema częstotliwościami, których stosunek wynosi jak 2:1, występuje interwał równy 1 oktawie.



Wzory, według których można obliczyć wartości elementów filtrów, przy założeniu, że głośniki stanowią obciążenie czysto rezystancyjne, są następujące:

$$L1 = L2 = \frac{225 \cdot Z}{f_{p1}} \quad [\text{mH}] \quad C1 = C2 = \frac{112 \cdot 500}{f_{p1} \cdot Z} \quad [\mu\text{F}]$$

$$L3 = L4 = \frac{225 \cdot Z}{f_{p2}} \quad [\text{mH}] \quad C3 = C4 = \frac{112 \cdot 500}{f_{p2} \cdot Z} \quad [\mu\text{F}]$$

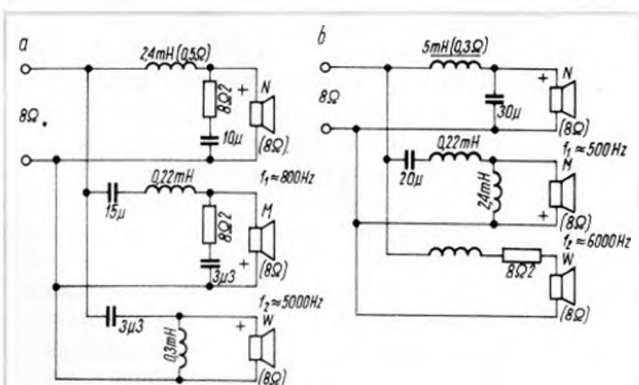
Filtr taki zapewnia większą stromość zboczy (nominalnie 12 dB/okt), dzięki czemu zakres nakładania się pasm przenoszonych składowych sygnału o różnych częstotliwościach zmniejsza się. Jest to zaletą tego typu filtrów, powodującą, że są one bardzo często stosowane w fabrycznych zespołach głośnikowych. Do wad tych filtrów należy większa ich złożoność, trudniejsze „zestrojenie” oraz niebezpieczeństwo znacznego zmniejszenia się wartości impedancji wejściowej zespołu głośnikowego w razie zastosowania elementów filtru o nieodpowiednich wartościach.

Wpływ składowej indukcyjnej impedancji wejściowej głośnika można częściowo skompensować stosując układ R,C przedstawiony na rys. 4. Działanie tego układu jest następujące. Przy małych częstotliwościach układ nie wpływa na działanie filtru. Przy większej częstotliwości impedancja wejściowa głośnika zwiększa się, a impedancja układu kompensacyjnego maleje. Jeżeli wartości układu są dobrze wybrane (Ck i Rk), obciążenie filtru jest w zasadzie niezmiennie.

Rezystancję Rk przyjmuje się zwykle równą liczbowo znamionowej impedancji głośnika.

Wartość pojemności Ck określa się z zależności:

$$Ck = \frac{160 \ 000}{f_k \cdot Z} \quad [\mu\text{F}]$$



Rys. 5. Przykłady stosowanych zespołów filtrów
 a — filtry 6 dB/okt i układy kompensacyjne w obwodach głośników N i M, filtr 12 dB/okt w obwodzie głośnika W;
 b — filtr 12 dB/okt w obwodzie głośnika N, filtr 12 dB/okt i 6 dB/okt w obwodzie głośnika M, filtr 6 dB/okt w obwodzie głośnika W.

w której:

Z — wartość znamionowej impedancji głośnika $[\Omega]$,

f_k — częstotliwość, przy której impedancja wejściowa głośnika (moduł) przybiera wartość dwukrotnie większą od znamionowej $[\text{Hz}]$.

W odniesieniu do głośników niskotonowych wartość ta wynosi $10 \div 20 \mu\text{F}$. W odniesieniu do głośników średnionowych wartość Ck wynosi $2,2 \div 4,7 \mu\text{F}$. Stosując układy kompensacyjne można przybliżyć działanie filtru do obliczonego teoretycznie.

Na rys. 5 są przedstawione układy filtrów dwóch zespołów głośnikowych, w których zastosowano rozwiązanie mieszane, tj. filtry 6 dB/okt, filtry 12 dB/okt i układy kompensacyjne. Układy filtrów powinny być dostosowane do zastosowanych głośników i założonych parametrów całego zespołu głośnikowego.

W układzie z rys. 5a do głośników niskotonowego i średnionowego przyłączono układy kompensacyjne oraz zastosowano filtry 6 dB/okt. Głośnik wysokotonowy (kopułkowy) jest zasilany przez filtr 12 dB/okt, co zmniejsza szkodliwe jego obciążenie składowymi sygnałami o zbyt małej częstotliwości. W układzie z rys. 5b zastosowano filtry 12 dB/okt do rozdzielania zakresów tonów niskich i średnich. Głośnik średnionowy przenosi częstotliwości do $6 \div 7 \text{ kHz}$. Największe częstotliwości przenosi głośnik wysokotonowy (tubowy) przyłączony przez kondensator $2,2 \mu\text{F}$ i rezystor $8,2 \Omega$, który zmniejsza zbyt dużą efektywność tego głośnika.

Zastosowanie określonych filtrów do konkretnego zestawu głośników jest ułatwione, jeżeli dysponujemy zaleceniami producenta. Tak np. postępujemy wzorując się na filtrach stosowanych przez ZWG Tonsil. Podobnie zagraniczne „kity”, jeżeli nie są wyposażone w gotowy komplet filtrów, zawierają dokładne wskazówki co do parametrów zalecanych filtrów. W przypadku okazjnie zdobytych głośników parametry filtrów dobiera się podczas pomiarów i prób zespołu głośnikowego. Jeżeli charakterystyki elektryczne przenoszenia filtrów obciążonych głośnikami nie będą dobre, to z całą pewnością zespół głośnikowy nie będzie dobrze działał. Gdy natomiast przebiegi elektryczne na zaciskach głośników odpowiadają założeniom, a wynik akustyczny nie jest dobry, konieczna jest powtórna analiza właściwości zastosowanych głośników i założenia co do parametrów zespołu głośnikowego jako całości.

W przypadku konstruowania dwudrożnych zespołów głośnikowych potrzebny jest tylko filtr dolnoprzepustowy i górno-przepustowy. Częstotliwość podziału powinna być właściwie wybrana ze względu na możliwość przeciążenia zbyt dużą mocą głośnika wysokotonowego. Częstotliwość tę wybiera się przeważnie w zakresie $2000 \div 4000 \text{ Hz}$. Do obliczenia elementów filtrów są stosowane podane wcześniej wzory.

Filtry 6 dB/okt przesuwają fazę (przy częstotliwości podziału) o 45° w przeciwnych kierunkach. Tak więc teoretycznie przesunięcie fazy napięć zasilających głośniki przy częstotliwości podziału wynosi 90° . W praktyce sposób przyłączenia głośników należy dobrać ostatecznie podczas prób.

Filtry 12 dB/okt przesuwają fazę o 90° , a więc napięcie zasilające dwa sąsiednie głośniki jest przesunięte o 180° . wskutek czego w pobliżu częstotliwości podziału promieniowana przez te „sąsiadujące” głośniki energia wzajemnie się znosi. Jest konieczne odwrotne przyłączenie jednego z głośników, co daje zgodność faz promieniowanych fal dźwiękowych (patrz rys. 3 i 5).

Stosunki fazy między głośnikiem średnionowym i wysokotonowym są bardzo złożone. W związku z tym zaleca się w każdym przypadku dobranie doświadczalne najlepszego kierunku przyłączenia głośnika wysokotonowego. A.W. □

Filtry zespołów głośnikowych (2)

Cewki indukcyjne

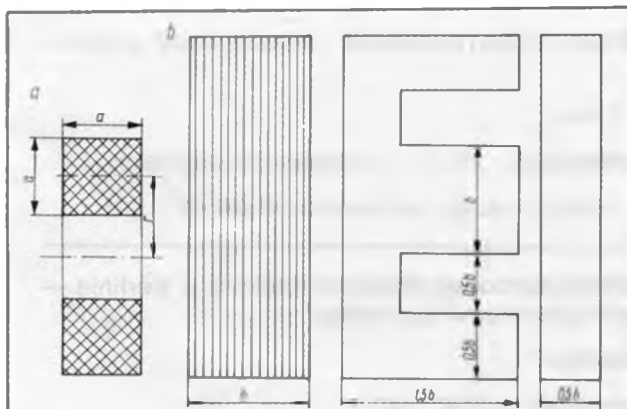
Najlepsze są cewki indukcyjne powietrzne, bowiem nie ma wówczas obawy o wnoszenie jakichkolwiek zniekształceń nieliniowych wskutek zjawisk związanych ze zmianami wartości indukcji w rdzeniu ferromagnetycznym. Takie właśnie cewki są wykonywane najczęściej w warunkach amatorskich. Trudność pojawia się w przypadku cewek o indukcyjności większej niż 2–3 mH włączanych w obwód głośnika niskotonowego, bowiem powinny one mieć małą wartość rezystancji, co wymaga stosowania drutu nawojowego o dużej średnicy. Wówczas jest celowe stosowanie cewek nawiniętych na rdzeniu transformatorowym (z blach krzemowych) lub rdzeniu ferrytowym. Indukcyjność cewek powietrznych, których uzwojenie ma w przekroju kształt kwadratu (lub zbliżony) może być obliczona wg wzoru:

$$L = \frac{1,68 \cdot r \cdot n^2}{100\,000} \text{ [mH]}$$

w którym:

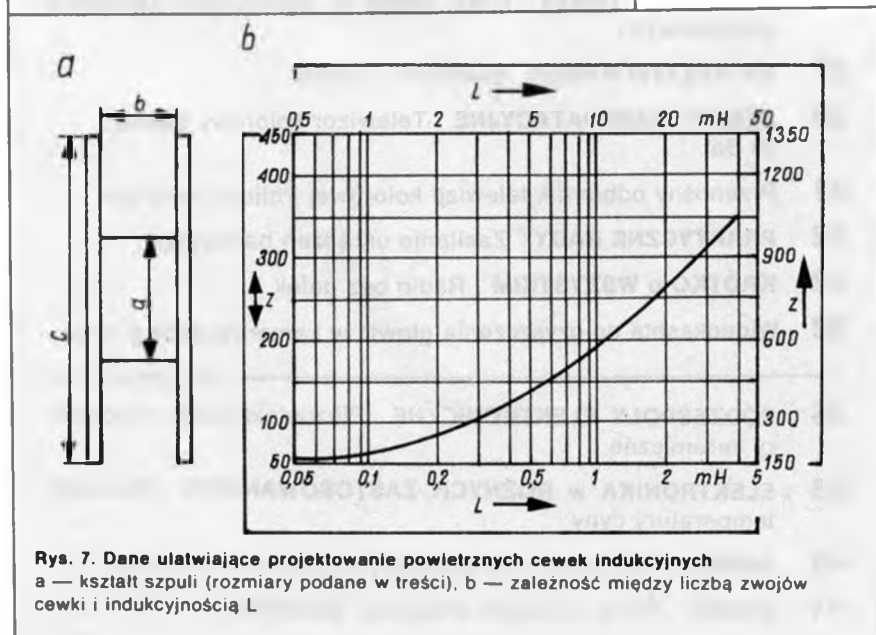
r — promień cewki, jak przedstawiono na rys. 6a [cm]

n — liczba zwojów uzwojenia cewki.



Rys. 6. Cewki indukcyjne

a — szkic cewki o kwadratowym przekroju uzwojenia i promieniu r ; b — kształt rdzenia do wykonania cewki indukcyjnej



Rys. 7. Dane ułatwiające projektowanie powietrznych cewek indukcyjnych

a — kształt szpuli (rozmiary podane w treści); b — zależność między liczbą zwojów cewki i indukcyjnością L

Na rys. 7 jest przedstawiony wykres, z którego można określić przybliżoną liczbę zwojów cewki w zależności od wymaganej indukcyjności. Dotyczy on cewek nawiniętych na szpuli, której kształt jest przedstawiony na rys. 7, a rozmiary szpuli są następujące:

- cewki do 2 mH: $a = 25$ mm, $b = 25$ mm, $c = 75$ mm; liczba zwojów jest podana po lewej stronie wykresu
- cewki do 10 mH: $a = 25$ mm, $b = 40$ mm, $c = 110$ mm; liczba zwojów jest podana po prawej stronie wykresu.

Cewki o małej wartości indukcyjności można nawijać na mniejszej szpuli o rozmiarach: $a = 20$ mm, $b = 12$ mm, $c = 50$ mm. Liczby zwojów są następujące: 0,1 mH — 60 zw., 0,2 mH — 85 zw., 0,3 mH — 102 zw.; drut nawojowy o średnicy 0,7 ÷ 0,8 mm.

Rezystancje 1 m drutu nawojowego, miedzianego, o różnych średnicach są następujące:

Srednica drutu [mm]	Rezystancja 1 m bieżącego drutu [Ω]
0,69	0,0469
0,8	0,0349
1,0	0,0224
1,2	0,0155
1,45	0,0106
1,56	0,0092

Cewka nawinięta najgrubszym z podanych drutów, o indukcyjności 5 mH (liczba zwojów 400), ma rezystancję ok. 0,75 Ω, co stanowi więcej niż 10% rezystancji cewki głośnika o impedancji znamionowej 8 Ω. Jest to wartość duża w przypadku filtra do głośnika niskotonowego. Celowe jest zastosowanie cewki indukcyjnej z rdzeniem, co zmniejszy liczbę zwojów i rezystancję cewki do wartości 0,2 ÷ 0,3 Ω.

Do nawinięcia cewki indukcyjnej należy wybierać rdzeń z cienkich blaszek krzemowych o kształcie EI. Jeżeli rdzeń ma proporcje przedstawione na rys. 6b, przybliżony związek między liczbą zwojów n i indukcyjnością cewki L daje wzór:

$$n \approx 282 \sqrt{\frac{L}{b}}$$

w którym:

b — rozmiar rdzenia [mm]

L — indukcyjność cewki [mH].

Szczelina powietrzna między rdzeniem i zworą powinna wynosić 0,1 b.

Rdzeń nie powinien być nadmiernie magnesowany. Indukcja w rdzeniu nie powinna przekraczać wartości 0,4 T. Wartość indukcji w rdzeniu sprawdza się, zakładając największe napięcie (wartość skuteczna) dostarczane przez wzmacniacz przy częstotliwości równej częstotliwości podziału f_{p1} , która wynosi zwykle 500 ÷ 1200 Hz. Wartość indukcji w rdzeniu można obliczyć z zależności:

$$B = \frac{450\,000 U}{f_{p1} \cdot b^2 \cdot n} \text{ [T]}$$

w której:

b — rozmiar rdzenia [mm],

n — liczba zwojów,

f_{p1} — częstotliwość podziału [Hz],

U — napięcie maksymalne na wejściu zespołu głośnikowego [V].

W przypadku rdzeni ferrytowych największa wartość indukcji w rdzeniu nie powinna być większa niż 0,2 T. Mogą być stosowane rdzenie o różnym kształcie (walcowe, kubkowe i rdzenie od transformatorów wysokiego napięcia w telewizorach). Zawsze powinna być szczelina powietrzna wyrównująca parametry obwodu magnetycznego. Zastosowanie rdzeni ferromagnetycznych daje znaczną oszczędność drutu nawojowego i zmniejsza rezystancję cewek.

Kondensatory filtrów

Do zastosowania w filtrach najlepiej nadają się kondensatory foliowe lub papierowe na napięcie 100 – 160 V. W zespołach głośnikowych bardzo dużej mocy (profesjonalnych) są stosowane kondensatory 250 V. W przypadku bardzo dużych pojemności bateria kondensatorów foliowych jest bardzo droga. Znacznie tańszym rozwiązaniem jest zastosowanie kondensatorów elektrolitycznych. W krajach zachodnich można nabyć bipolarne kondensatory elektrolityczne na napięcie do 100 V i o pojemności do 100 μF , przeznaczone specjalnie do zastosowania w filtrach zespołów głośnikowych. Kondensatory te zawierają dwa kondensatory elektrolityczne połączone szeregowo i odwrócone pod względem kierunku polaryzacji.

Wykorzystując krajowe kondensatory unipolarne można tworzyć układy wg schematu przedstawionego na rys. 8a.

Powinny być stosowane identyczne kondensatory elektrolityczne pochodzące z tej samej serii produkcyjnej, na napięcie 63 V lub większe.

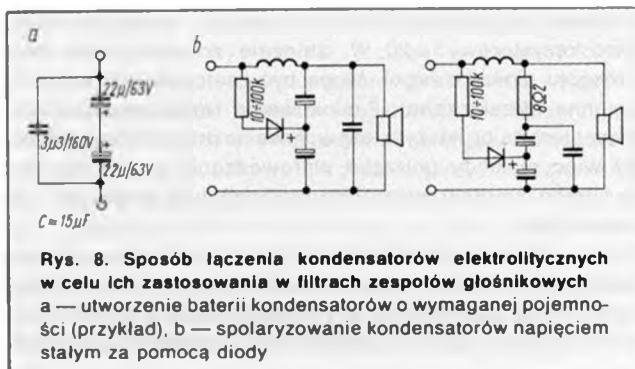
Przyłączenie równolegle kondensatora foliowego jest korzystne oraz umożliwia dobranie wymaganej pojemności, bowiem pojemność kondensatorów elektrolitycznych odbiega znacznie od wartości znamionowej. Jest wskazane, aby kondensatory elektrolityczne były spolaryzowane napięciem stałym, co wpływa korzystnie na ich parametry i trwałość. Można to osiągnąć stosując układ przedstawiony na rys. 8b. Napięcie zmienne m.c.z. jest prostowane przez diodę i powoduje ładowanie kondensatorów napięciem stałym. Rezystor zabezpiecza diodę przed nadmiernym natężeniem prądu mogącym pojawić się w początkowym okresie ładowania kondensatorów o wielkiej pojemności. Konieczne jest zastosowanie kondensatorów na napięcie 4 – 5 razy większe niż wynosi wartość amplitudy sygnału.

Na rys. 9 przedstawiono kilka filtrów z indukcyjnymi cewkami powietrznymi, wykonanych fabrycznie.

Pomiary filtrów

Jest celowe sprawdzenie, jak działa skonstruowany filtr przy obciążeniu rezystorami. W tym celu przyłącza się zamiast głośników rezystory 8,2 Ω , 5 W oraz korzystając z generatora akustycznego i wzmacniacza zasila się układ napięciem 3 – 5 V. Mierzając woltomierzem napięcie na rezystorach zastępujących głośniki wykreśla się charakterystyki częstotliwości poszczególnych filtrów.

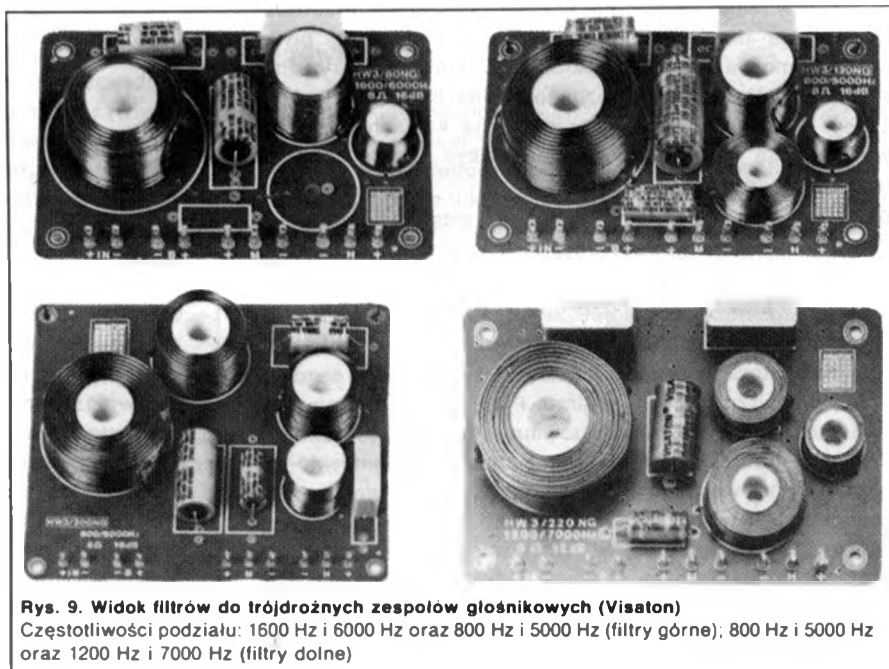
Liczbę dokonywanych pomiarów można znacznie zmniejszyć, jeżeli ograniczy się do zakresów częstotliwości zbliżonych do założonych częstotliwości podziału. Następnie przyłącza się głośniki, napięcie na wejściu zespołu ustala się tak, aby



nie przeciążyć głośnika wysokotonowego (np. 0,02 mocy znamionowej zespołu). Powtarza się pomiar napięć na zaciskach głośników tak, aby możliwe było określenie przebiegu charakterystyk, szczególnie w pobliżu częstotliwości podziału. Następnie analizuje się istotne odchyłki przebiegu tych charakterystyk od przyjętych założeń i próbuje dociec przyczyny powstałych różnic. Stosownie do wyciągniętych wniosków zmienia się wartość elementów filtru i powtarza pomiary. Załóżmy, że zastosowany został układ filtrów z rys. 5a. Pomiar wykazuje, że częstotliwość podziału f_{p1} jest zbyt duża. Należy więc przeprowadzić dodatkowy pomiar impedancji głośnika niskotonowego z przyłączonym układem korekcyjnym C_k, R_k . Jeżeli okaże się, że impedancja układu zmienia się nieznacznie w zakresie 300 – 2000 Hz, należy zwiększyć indukcyjność cewki filtru.

Pomiary wykazują, że napięcie na głośniku średnionowym maleje zbyt wolno w zależności od częstotliwości. Zastosowany dobry wysokotonowy głośnik kopułkowy firmy zachodniej rokuje efektywne przenoszenie wielkich częstotliwości. W takim przypadku należy sprawdzić, czy nie jest zbyt mała pojemność kondensatora w układzie kompensacyjnym (C_k) oraz w razie potrzeby zwiększyć indukcyjność cewki filtru włączonej w szereg z głośnikiem, bądź zastosować filtr 12 dB/okt.

Gdy charakterystyki elektryczne filtrów przebiegają zadowalająco, przystępuje się do prób odsłuchowych zespołu głośnikowego. Najczęstszym przypadkiem jest niezadowolające wyrównanie (równowaga) między zakresem tonów niskich, średnich i wysokich. Stosuje się wówczas rezystory włączone



w szereg z głośnikami: średniotonowym i wysokotonowym (moc rezystorów $5 \div 20$ W, zależnie od mocy głośników i zespołu głośnikowego). Mogą być zastosowane rezystory zmienne (przełączane). Zastosowanie rezystorów jest rozwiązaniem najprostszym, ale wpływa na pracę filtrów. Zachodzi więc niekiedy potrzeba wprowadzenia zmian również i w filtrach, aby zakresy pracy poszczególnych głośników były optymalne.

Filtry są tylko jednym z ogniw łańcucha transmisyjnego, który stanowi zespół głośnikowy wraz z pomieszczeniem odsłuchowym. Każdy głośnik jest w pewnym sensie „filtrem środkowoprzestupowym”. Obudowa wpływa na właściwości głoś-

nika niskotonowego i charakteryzuje się rezonansami w zakresie częstotliwości większych. Pomieszczenie uwypukla określone częstotliwości pasma akustycznego. Trzeba o tym pamiętać, konstruując filtry do zespołów głośnikowych. □

A.W.

LITERATURA

- [1] Witort A.: Zestawy głośnikowe. NOT-SIGMA Warszawa 1986
- [2] Zębalski T.: Z elektroakustyką za pan brat. ISKRY, Warszawa 1979
- [3] Żuk J.: Zespół głośnikowy hi-fi. „Radioelektronik” nr 9/1985
- [4] „Amaterské Radio” (pro konstruktéry) nr 2/1984
- [5] Klínger H.H.: Hi-Fi — Lautsprecher-Kombinationen (RPB 161). Franzis Verlag, München