

Zabezpieczenia we wzmacniaczach mocy (2)

ZABEZPIECZENIE PRZED ZWARCIEM WYJŚCIA WZMACNIACZA

Zabezpieczenie przed zwarcie wyjścia wzmacniacza do masy należy do najczęściej stosowanych zabezpieczeń we wzmacniaczach mocy. W wyniku działania układu zabezpieczającego następuje ograniczenie wartości prądu płynącego przez tranzystory stopnia końcowego, co w efekcie zapobiega przekroczeniu maksymalnej mocy strat tranzystorów.

W ogranicznikach prądu stosowane są głównie tranzystory, jakkolwiek są również ograniczniki skonstruowane w oparciu o diody. Przykład ogranicznika prądu wykorzystującego tranzystor przedstawiono na rys. 7a, natomiast odpowiednik diodowy z diodą Zenera, na rys. 7b.

Zasada działania jest następująca. Spadek napięcia na rezystorze RE wyznacza potencjał bazy tranzystora T3. W warunkach normalnej pracy jest on mniejszy od wartości napięcia U_{BE} tranzystora przewodzącego i tranzystor T3 jest w stanie zatkania. Gdy prąd obciążenia przekroczy dopuszczalną wartość, tranzystor T3 zacznie przewodzić ograniczając wysterowanie tranzystorów T1 i T2. Układ przekształca się wówczas w ogranicznik prądu przepływającego przez tranzystory i rezystor RE.

Wadą układu jest stosunkowo duża moc wydzielana na tranzystorach stopnia końcowego podczas zwarcia wyjścia

wzmacniacza do masy. Wynika to z zasady działania ogranicznika – niezbędny jest przepływ największego dopuszczalnego prądu przez rezystor RE. Układ wprowadza poza tym zniekształcenia nieliniowe przy zbliżaniu się do progu zadziałania układu zabezpieczającego; dlatego wartość prądu ograniczenia musi być określana z odpowiednim zapasem w stosunku do maksymalnego prądu użytecznego.

Do zalet układu należy rzeczywista kontrola przepływającego prądu bez względu na stopień wysterowania wzmacniacza.

Praktyczny układ symetrycznego ogranicznika przedstawiono na rys. 8.

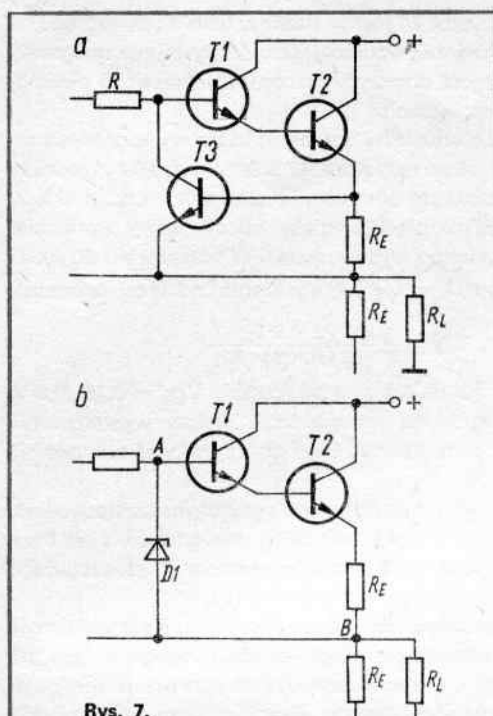
Zastosowanie w obwodzie bazy tranzystora T3 diody D1 i D2 ograniczają prąd kolektora tego tranzystora w razie zwarcia wyjścia wzmacniacza. Wartość rezystora R1 w emiterze tranzystora T3 należy tak dobrać, aby wartość prądu ograniczenia była 2...3 razy większa od maksymalnego prądu przepływającego przez tę rezystancję w czasie normalnej pracy. Z warunków tych wynika zależność:

$$R1 = \frac{U_D}{(2...3) \cdot I_{E_{max} T3}} \quad [\Omega] \quad (6)$$

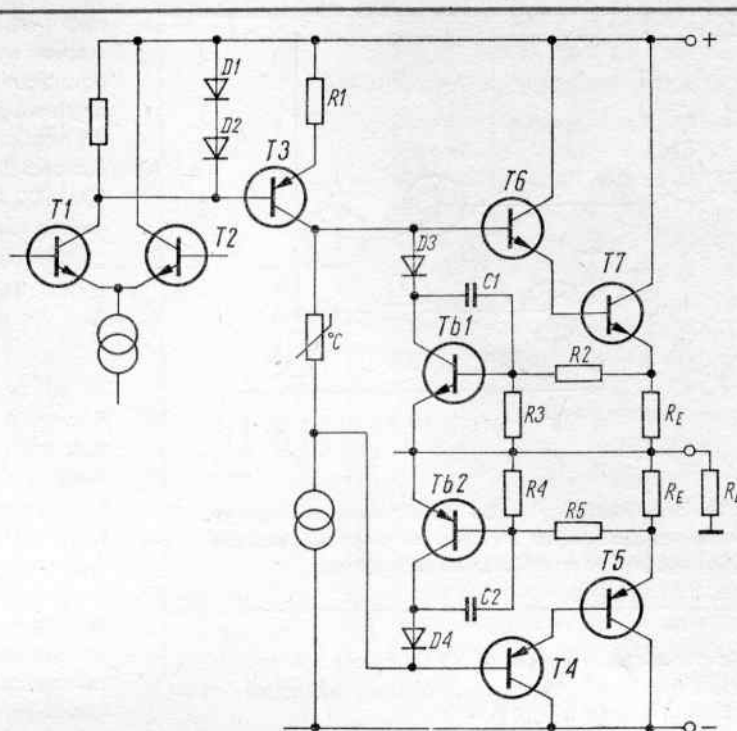
przy czym:

$I_{E_{max} T3}$ – maksymalny prąd emitera tranzystora T3 będący sumą prądów źródła prądowego oraz bazy tranzystora T6;

U_D – napięcie zespółu diod.



Rys. 7.
Ogranicznik prądu
a - z tranzystorem, b - z diodą Zenera



Rys. 8. Schemat wzmacniacza z układem symetrycznego ogranicznika prądu

Diody D3 i D4 eliminują wpływ przeciwnego półokresu napięcia sterującego na tranzystory Tb1 i Tb2 zabezpieczając ich złącza przed niepożądaną zmianą warunków polaryzacji. Wartość prądu ograniczenia można wyznaczyć z przybliżonej zależności:

$$I_{Lmax} = \frac{0,6}{R_E} \left(\frac{R_2}{R_3} + 1 \right) \quad [A] \quad (7)$$

przy czym wartość rezystancji należy wyrazić w omach.

W razie wzbudzenia się układu przy zbliżaniu się do progu zadziałania ogranicznika należy zastosować kondensatory C1 i C2 (rys. 8) o wartościach 1...3 nF.

W przypadku układu diodowego (rys. 7 b) następuje kontrola potencjału punktu A względem wyjścia układu (punkt B). Maksymalny prąd płynący przez rezystory RE w warunkach przeciążenia jest zależny od dopuszczalnej różnicy między napięciem przebicia diody Zenera D1 (może być kilka diod zwykłych połączonych szeregowo w kierunku przewodzenia), a sumą napięć złącz baza-emiter tranzystorów T1 i T2 zgodnie ze wzorem:

$$I_{Lmax} = \frac{U_{Z1} - U_{BET1} - U_{BET2}}{R_E} \quad (8)$$

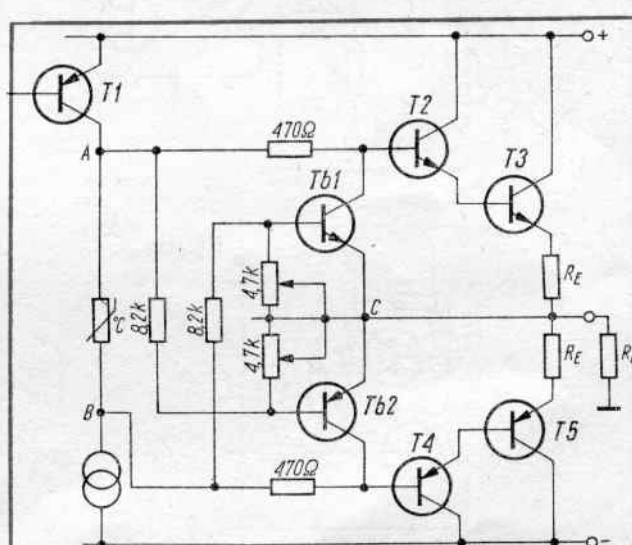
Inna koncepcja układu zabezpieczającego polega na przesterowaniu wzmacniacza w razie zwarcia jego wyjścia. Zanika wówczas napięcie wyjściowe, a tym samym brak jest sygnału sprzężenia zwrotnego i wzmacniacz pracuje jak gdyby w otwartej pętli. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 9.

W charakterze bezpieczników pracują tranzystory Tb1 i Tb2. Podczas normalnej pracy, potencjały wszystkich punktów A, B i C zmieniają się jednocześnie o tę samą wartość i w tym samym kierunku, a tranzystory Tb1 i Tb2 pozostają w stanie zatkania. W przypadku zwarcia wyjścia wzmacniacza potencjał punktu C pozostaje stały, a silnym zmianom ulegają jedynie potencjały w punktach A i B. W wyniku tego tranzystory Tb1 i Tb2 wchodzą okresowo w stan nasycenia zwierając kolejno bazy tranzystorów wyjściowych z punktem C. Ponieważ stan nasycenia tranzystorów Tb1 i Tb2 nie zależy od wartości prądu przepływającego przez rezystory RE, tranzystory wyjściowe są blokowane niemal całkowicie.

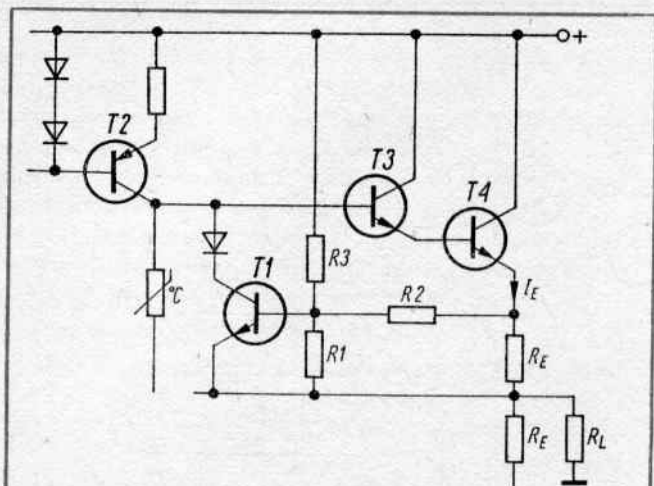
Realizacja praktyczna układu natrafia jednak na pewne trudności z uwagi na to, że nie następuje całkowita likwidacja ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza przy zwarcu wyjścia. Szybkie zmiany towarzyszące działaniu bezpiecznika powodują powstawanie sygnału sprzężenia zwrotnego na impedancjach doprowadzeń, a tym samym zmniejszają przesterowanie wzmacniacza. Dlatego przy niewielkim występowaniu przedstawiony układ jest mało skuteczny.

Ze względu na wady opisanych wyżej ograniczników pojawiły się układy, których działanie jest uzależnione zarówno od amplitudy prądu wyjściowego jak i od napięcia wyjściowego.

Zmodyfikowany układ ogranicznika przedstawiono na rys. 10. Napięcie polaryzujące bazę tranzystora T1, pracującego w układzie ogranicznika, ma dwa składniki: jeden pochodzi od napięcia występującego na rezystorze RE, natomiast drugi



Rys. 9. Układ zabezpieczający, wykorzystujący efekt przesterowania wzmacniacza przy zwarcu wyjścia



Rys. 10. Zmodyfikowany układ zabezpieczający, którego działanie uzależnione jest zarówno od amplitudy napięcia wyjściowego jak i od wartości prądu wyjściowego

wynika z przyłączenia rezystora R3 do źródła zasilania i jest proporcjonalny do różnicy między napięciem zasilania a amplitudą przebiegu wyjściowego U_L .

Uzależniono w ten sposób działanie ogranicznika nie tylko od amplitudy prądu wyjściowego, ale i od napięcia wyjściowego. Zależność określająca wypadkowe napięcie polaryzujące bazę tranzystora T1 jest następująca:

$$U_{BET1} = \frac{I_E \cdot R_E \cdot R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2 (0,5 E_C - U_L)}{R_1 \cdot R_2 + R_3 (R_1 + R_2)} \quad (9)$$

Jak wynika z zależności (9) napięcie polaryzujące złącze baza-emiter tranzystora T1 jest uzależnione od wartości przepływającego prądu emitera tranzystora wyjściowego T4 ($I_{LET4} \approx I_L$), a także od amplitudy napięcia wyjściowego U_L . Dlatego, w przypadku gdy wzmacniacz jest obciążony impedancją zna-

mionową, tranzystor T1 jest w stanie zatkania bez względu na stopień wysterowania wzmacniacza. Zalety tej nie ma prosty ogranicznik, co jest przyczyną wzrostu zniekształceń nieliniowych we wzmacniaczach.

Przy obliczaniu elementów ogranicznika należy korzystać z zależności (9). Wartość rezystora R2 należy wybrać z przedziału 100...300 Ω . Pozostałe elementy można wyznaczyć z układu dwóch równań, uwzględniając stan spoczynkowy wzmacniacza oraz stan pełnego wysterowania. W odniesieniu do stanu spoczynkowego ($U_L = 0, I_E = 0$) wyrażenie będzie miało postać:

$$U_{BE'} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot 0,5 \cdot E_C}{R_1 \cdot R_2 + R_3 \cdot (R_1 + R_2)} \quad (10)$$

W tym przypadku należy przyjąć wartość $U_{BE'} = 0,25...0,3$ V. Równanie drugie ma uwzględniać pełne wysterowanie wzmacniacza i jako wartość $U_{BE''}$ należy przyjąć wartość nie większą niż 0,4 V.

Pewną modyfikacją układową polegającą na zastosowaniu tyrystora (rys. 11a) lub odpowiedniego złożonego układu tranzystorowego (rys. 11b), zamiast tranzystora T1 stosowanego w układzie z rys. 10, przedstawiono na rys. 11.

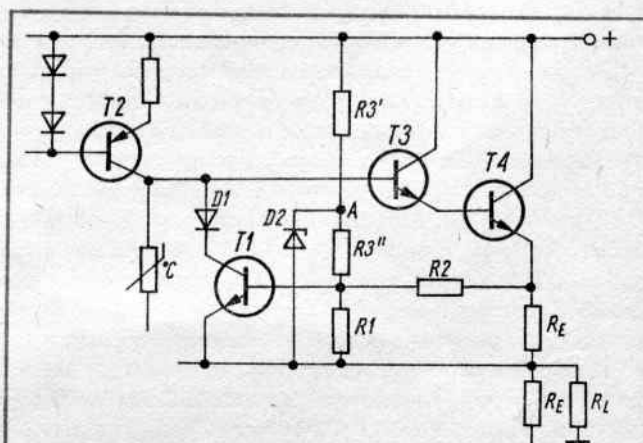
Wadą przedstawionych rozwiązań (rys. 10 i 11) jest możliwość wchodzenia elementu czynnego, zastosowanego w układzie zabezpieczającym, w stan przewodzenia przy przeciwnej polaryzacji przebiegu wyjściowego. Zapobiec temu można przez odpowiedni dobór rezystorów R2 i R3, jednak wówczas próg ograniczenia przesunie się w kierunku większych prądów, co jest zjawiskiem niepożądanym. Dlatego korzystniej jest zastosować pewną modyfikację układu polegającą na podziale rezystora R3 na dwie części i włączeniu diody Zenera D2, jak to przedstawiono na rys. 12. Napięcie pracy tej diody powinno być nieco niższe niż potencjał punktu A mierzony względem wyjścia wzmacniacza.

Bardziej rozbudowaną wersję układu przedstawiono na rys. 13. W stosunku do układu opisanego poprzednio zastosowano dodatkowe przełączniki tranzystorowe (tranzystory T1 i T10) blokujące w warunkach przeciążenia stopień sterujący wzmacniacza oraz źródło prądowe umieszczone w obwodzie kolektorowym tego stopnia.

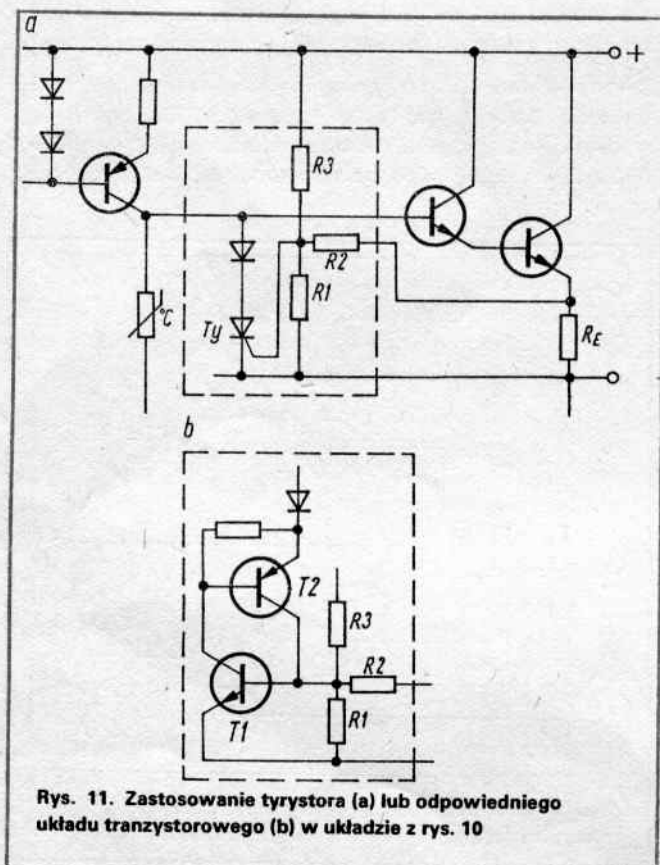
Układem mającym podobne właściwości, a także korzystną podciętą charakterystykę ograniczenia, jest układ mostkowy przedstawiony na rys. 14a. Zasada działania jest następująca.

Gdy występuje założone obciążenie R_L różnica potencjałów między punktami A i B utrzymuje tranzystor T1 w stanie zatkania bez względu na stopień wysterowania wzmacniacza. Warunkiem zadziałania układu zabezpieczającego jest spełnienie nierówności:

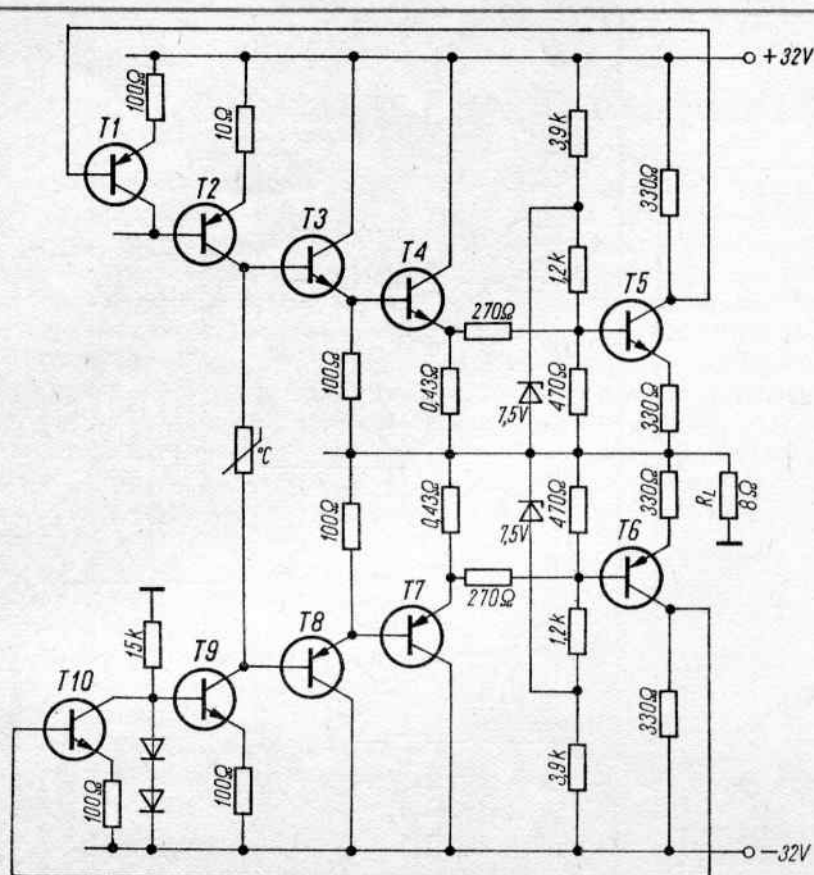
$$\frac{R_E}{R_L} > \frac{R_2}{R_3} \quad (11)$$



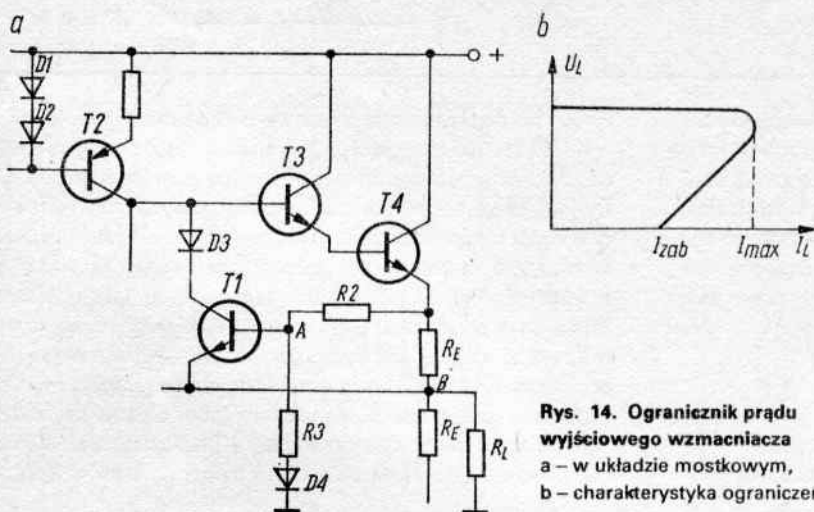
Rys. 12. Ulepszona wersja układu z rys. 10



Rys. 11. Zastosowanie tyrystora (a) lub odpowiedniego układu tranzystorowego (b) w układzie z rys. 10



Rys. 13. Schemat wzmacniacza z rozwiniętym układem zabezpieczającym przed skutkami zwarcia wyjścia



Rys. 14. a - Schemat ogranicznika prądu wyjściowego wzmacniacza w układzie mostkowym, b - charakterystyka ograniczenia

Sytuacja taka występuje w chwili zwarcia wyjścia układu do masy ($R_L = 0$). Układ przekształca się wówczas w prosty ogranicznik. Wartość prądu zwarcia wyniesie w przybliżeniu:

$$I_{zw} = \frac{0,7}{R_E} \quad [A] \quad (12)$$

Wartość rezystora R_2 , w zależności od pozostałych elementów można określić z wyrażenia:

$$R_2 = \frac{I_{Lmax} \cdot R_E \cdot R_3}{I_{Lmax} \cdot R_L - U_{D4}} \quad [\Omega] \quad (13)$$

w którym:

I_{Lmax} – maksymalna amplituda prądu obciążenia;
 U_{D4} – spadek napięcia na diodzie D_4 (dla elementu krzemowego ok. 0,6 V).

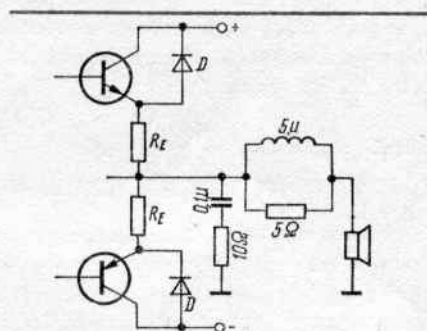
Rezystor R_3 ma wartość 1...2 k Ω . Układ nadaje się do wzmacniaczy zasilanych dwoma symetrycznymi napięciami.

ZABEZPIECZENIE WZMACNIACZA PRZED OBCIĄŻENIAMI O CHARAKTERZE REAKTANCYJNYM

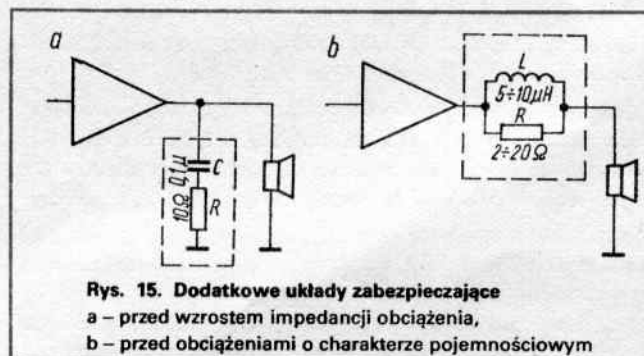
Oprócz układów zabezpieczających wzmacniacz przed zwarcie wyjścia są stosowane także dodatkowe elementy zmniejszające możliwość wzbudzenia się wzmacniacza na częstotliwościach ponadakustycznych. Wszelkiego rodzaju oscylacje są niebezpieczne zarówno dla tranzystorów wyjściowych, których punkt pracy może znaleźć się poza dozwolonym obszarem roboczym, jak i dla głośników, szczególnie głośników wysokotonowych. Jedną z przyczyn wzbudzenia się wzmacniacza może być impedancyjny charakter obciążenia, jakie stanowi głośnik lub zespół głośników.

Zabezpieczenie polega na kompensacji składowej indukcyjnej za pomocą dwójnika RC, jak to przedstawiono na rys. 15a. Przyczyną nieprawidłowej pracy wzmacniacza może być także pojemnościowy charakter obciążenia, który może wystąpić w przypadku stosowania kolumn głośnikowych o rozbudowanych filtrach rozdzielających. Przeciwdziałanie temu zjawisku polega na włączeniu szeregowo z obciążeniem niewielkiej indukcyjności rzędu 5...10 μH (rys. 15b) w postaci jednowarstwowej cewki powietrznej. Zbocznikowanie indukcyjności rezystorem ma na celu eliminowanie wpływu jej rezonansów własnych. Rezystory stosowane w opisywanych układach powinny być typu bezindukcyjnego.

Stopień wyjściowy wzmacniacza zabezpieczony za pomocą wymienionych elementów przedstawiono na rys. 16.



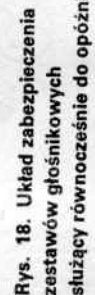
Rys. 16. Schemat stopnia wyjściowego wzmacniacza zabezpieczonego przed obciążeniami o charakterze reaktancyjnym



Rys. 15. a - Dodatkowe układy zabezpieczające przed wzrostem impedancji obciążenia, b - przed obciążeniami o charakterze pojemnościowym

Rys. 17. Układ zabezpieczający głośniki i wzmacniacz przed pojawieniem się statego potencjału na wyjściu

Wyjścia wzmacniaczy mocy są połączone z układem przetęczników (tranzystory T1...T3) za pomocą rezystorów R1 i R2. Składowa zmienna jest „filtrowana” przez kondensator C1 o dużej pojemności i nie powoduje zadržania przetęczników. Natomiast składowa stała o polaryzacji dodatniej spowoduje nasycenie tranzystora T1, a o polaryzacji ujemnej – zadržanie pary tranzystorów T2 i T3. W obu przypadkach tranzystor T5 wchodzi w stan nasycenia uruchamiając przekaznik P1, co powoduje odłączenie zasilania wzmacniacza. Aby układ nie



10