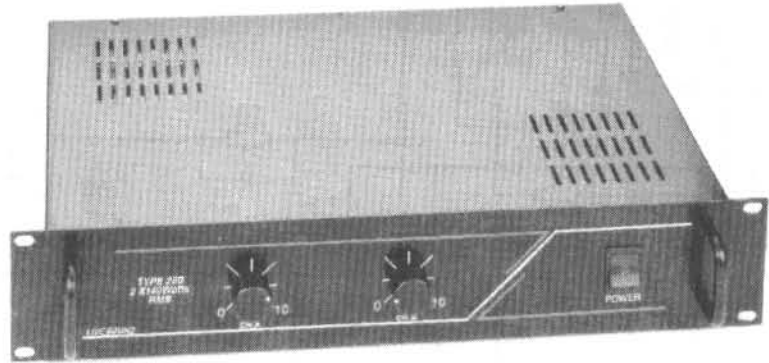


Wzmacniacz mocy z tranzystorami HexFET

kit AVT-200

Przedstawiamy konstrukcję wzmacniacza mocy wysokiej jakości, wykonanego na licencji bardzo popularnego we Francji modelu z serii Live Sound, w którego końcówce zastosowano nowoczesne tranzystory HexFET.



PROJEKT
Z OKŁADKI

Tranzystor HexFET działa inaczej niż konwencjonalny tranzystor bipolarny. Przy sterowaniu przebiegami o niewielkiej stromości zboczy stanowi on rezystancję zależną od napięcia polaryzującego elektrodę sterującą - bramkę. W pewnym przybliżeniu można więc przyjąć, że ten tranzystor jest sterowany napięciowo. Jednak stosunkowo duża pojemność pasożytnicza pomiędzy bramką i kanałem (rzędu setek pF) sprawia, że sterowanie przebiegami o dużych amplitudach i stromych zboczach wymaga bardzo wydajnego „wspomagania” prądowego, które jest niezbędne do szybkiego przeładowania pojemności. Stąd też w stopniu sterującym tranzystory końcowe zastosowano tranzystory bipolarnie o dość dużej obciążalności.

Wzmacniacz pracuje w klasie AB, choć możliwe jest przesunięcie charakterystyki pracy w stronę klasy A, co nieznacznie poprawia jakość odtwarzania dźwięku, za to niekorzystnie zwiększa moc wydzielaną we wzmacniaczu.

Bardziej szczegółowy opis tranzystorów ze strukturą HexFet znajduje się w Elektorze Elektroniku 1/94.

Układ składa się z dwóch niezależnych wzmacniaczy monofonicznych umieszczonych w jednej obudowie z zainstalowanymi regulatorami wzmocnienia i podwójnym wej-

ściem stereofonicznym (gniazda wejściowe Cinch oraz Jack). Przedwzmacniacz o parametrach dorównujących opisywanemu wzmacniaczowi, który będzie wyposażony w regulatory charakterystyki przenoszenia, przedstawimy w jednym z najbliższych numerów EP.

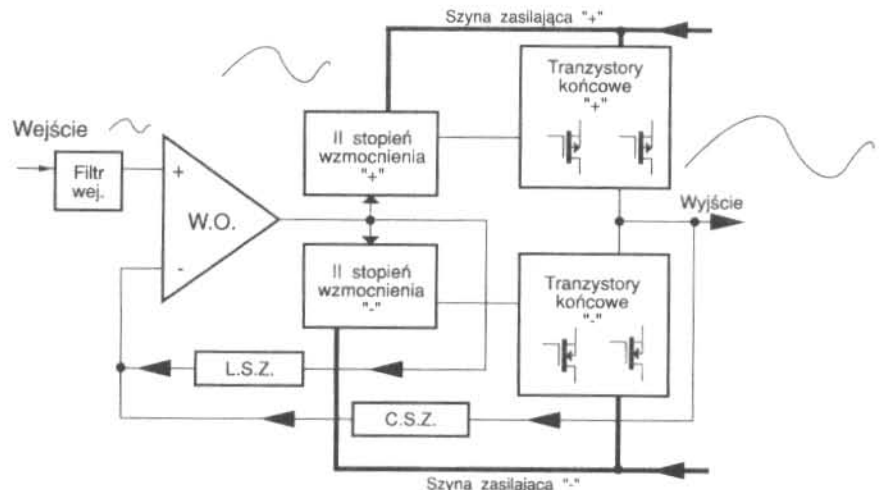
Parametry wzmacniacza (jeden kanał) są następujące:

- znamionowe napięcie wejściowe: 1V;
- napięcie przesterowania stopnia wejściowego: 1,6V;
- impedancja wejściowa: 43kΩ;
- stosunek S/N (ważony): 86dB;
- pasmo przenoszenia: 2Hz..90kHz (nie-równomierność ±1dB);

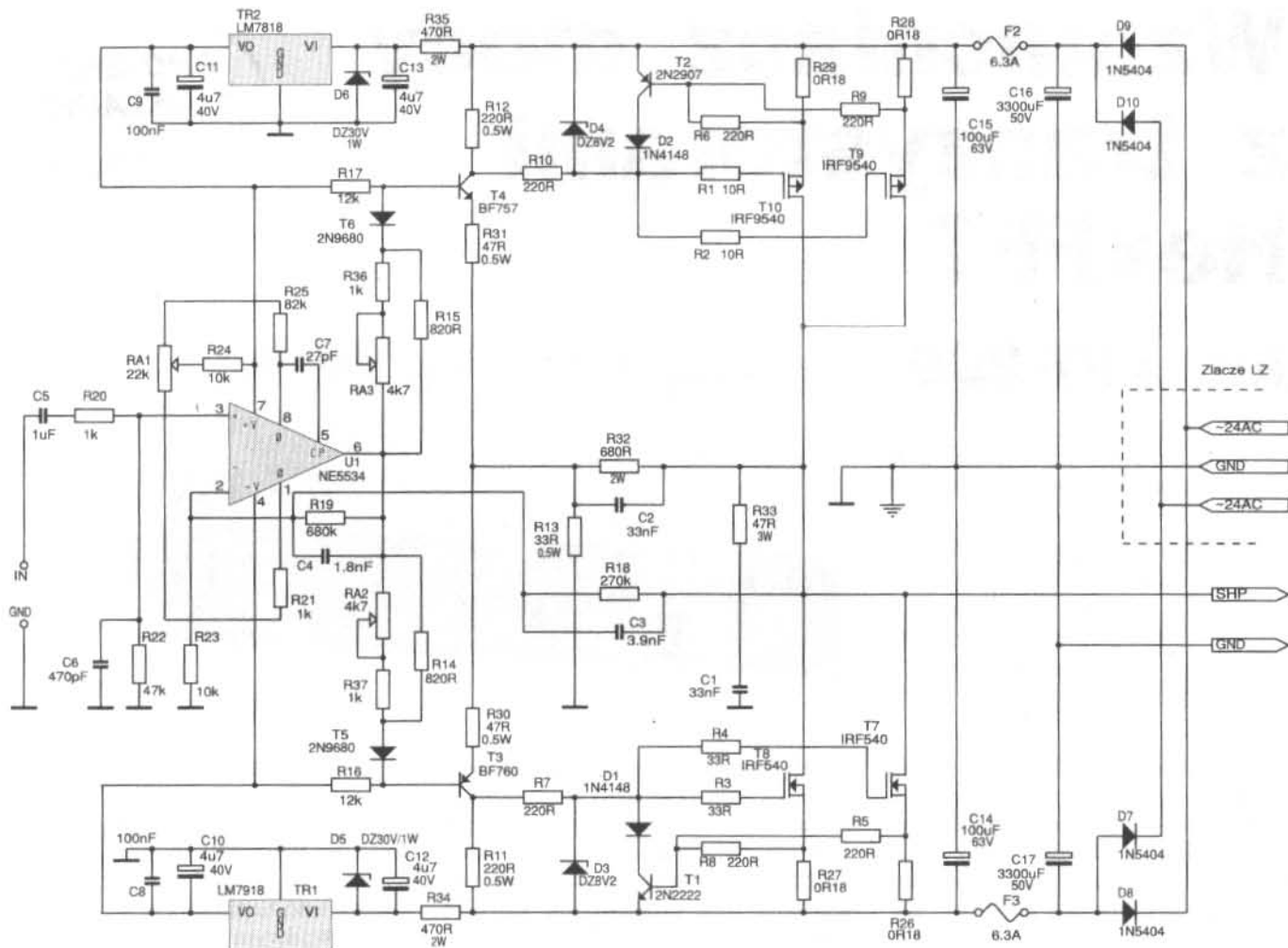
- moc wyjściowa (sinus): 100W;
- moc muzyczna: 140W;
- szybkość narastania sygnału na wyjściu, przy pobudzeniu prostokątem 1kHz: 11V/μs;
- zawartość harmonicznych w sygnale wyjściowym, w pasmie 15Hz...22kHz dla mocy wyjściowej 80W: max. 0,04%;
- pobór mocy z sieci zasilającej: 200W/kanał.

Do pomiarów wykorzystano wysokiej klasy przyrządy pomiarowe firmy Fluke (Philips), udostępnione przez profesjonalne laboratorium pomiarowe:

- oscyloskop PM3335;
- generator funkcyjny PM5133;



Rys. 1. Schemat blokowy wzmacniacza



Rys. 2. Schemat elektryczny wzmacniacza mocy

- miernik zawartości harmonicznych PM6309;
- miernik mocy akustycznej PM 6333.

Jak widać, osiągnięto parametry porównywalne ze średniej klasy sprzętem markowych producentów i zdecydowanie lepsze od bardziej nawet skomplikowanych układów konstrukcji ze standardową końcówką na tranzystorach bipolarnych.

Należy jednak pamiętać o konieczności bardzo precyzyjnego wyregulowania wzmacniacza, ponieważ od tego w znacznym stopniu zależy końcowy efekt naszej pracy.

Opis układu

Schemat blokowy wzmacniacza przedstawia rys. 1. Na wejściu zastosowano różnicowy wzmacniacz napięciowy, który zapewnia dopasowanie impedancyjne wejścia do źródła sygnału oraz odpowiednie wzmocnienie sygnału wejściowego. Takie rozwiązanie stopnia wejściowego znacznie zmniejsza zawartość harmo-

nicznych w sygnale wyjściowym i obniża poziom zniekształceń nieliniowych. Dzięki zastosowaniu szybkiego wzmacniacza operacyjnego (SVR=13V/μs) zniekształcenia TIM są także bardzo małe. Kolejnym stopniem jest dwutranzystorowy wzmacniacz z układem polaryzacji wstępnej, zapewniającym niski poziom zniekształceń skrośnych, typowych dla wzmacniaczy pracujących w klasie AB. Stopień wyjściowy wykonano na tranzystorach unipolarnych z dodatkowym zabezpieczeniem nadprądowym, które zapobiega uszkodzeniu tranzystorów mocy w czasie przypadkowego zwarcia obciążenia.

Na rys. 1 przyjęto następujące oznaczenia:

- L.S.Z. - pętla lokalnego sprzężenia zwrotnego;
- C.S.Z. - całkowite sprzężenie zwrotne;
- W.O. - wejściowy wzmacniacz operacyjny;

Struktura blokowa wzmacniacza jest więc taka sama jak dla kon-

wencjonalnych konstrukcji z tranzystorami bipolarnymi.

Na rysunku 2 pokazano schemat elektryczny wzmacniacza. W stopniu wejściowym zastosowano wzmacniacz operacyjny U1, którego wejście nieodwracające jest zabezpieczone przed sygnałami elektrycznymi o dużych częstotliwościach za pomocą bardzo prostego filtra dolnoprzepustowego C6, R20. Sygnal akustyczny (przeznaczony do wzmacniania) jest podawany na to samo wejście poprzez układ separacji składowej stałej C5, R20. Na wzmocnienie wzmacniacza U1 mają wpływ dwie pętle ujemnego sprzężenia zwrotnego - lokalna z elementami R19, C4, R23 oraz całkowita z elementami R18, C3, R23. Pierwsza z nich ogranicza wzmocnienie stopnia wejściowego niezależnie od amplitudy sygnału wyjściowego całego wzmacniacza, co zabezpiecza układ przed przesterowaniem, zwiększa pasmo przenoszenia stopnia wejściowego i zapobiega wzbudzeniom powodującym szkodliwe oscylacje na

wyjściu. C7 jest kondensatorem kompensującym wzmacniacz operacyjny, dopasowując charakterystykę fazową i częstotliwościową przeniesienia do potrzeb układu. Pojemność tego kondensatora jest dołączona równoległe do wewnętrznego kondensatora kompensującego (zintegrowanego ze strukturą wzmacniacza U1) o pojemności 12pF, który zapewnia stabilną pracę wzmacniacza przy wzmacnieniu powyżej 3 w całym pasmie częstotliwości.

Potencjometr RA1 wraz z rezystorami R21, R24 i R25 umożliwiają dokładne „wyzerowanie” stopnia wyjściowego wzmacniacza, poprzez sprowadzenie wyjściowego napięcia niezrównoważenia do wartości możliwie najbliższej zeru. Ma to ogromne znaczenie dla poprawnej pracy wzmacniacza ponieważ nawet niewielki poziom napięcia stałego na wyjściu U1 po wzmacnieniu w następnych stopniach może dać kilka woltów napięcia stałego na wyjściu, co obciąża niepotrzebnie głośniki i stopień końcowy, a dodatkowo zmniejsza użyteczną amplitudę sygnału na wyjściu - przez to także moc. Skutek złego wyzerowania wzmacniacza przedstawia wykres na rys. 3.

Z wyjścia układu U1, poprzez układy polaryzacji wstępnej, wykonane z elementami T5, R37, R14 i RA2 (dla połówki ujemnej) oraz T6, R36, R15 i RA3 (dla połówki dodatniej), sterowane są bazy tranzystorów T3 i T4. Rezystory R16 i R17 zasilają bazy tych tranzystorów ze stabilizowanych źródeł napięcia (TR1 i TR2), zapewniając stabilny spoczynkowy punkt pracy. Zastosowanie dwóch oddzielnych czujników temperatury wywodzi się z zastoso-

wania dwóch oddzielnych radiatorów dla tranzystorów końcowych (oczywiście, można również stosować jeden radiator, odpowiednio większy). W emiterach T3 i T4 włączono rezystory R30 i R31, dające ujemne sprzężenie zwrotne, a więc zmniejszające wzmacnienie tego stopnia. Tranzystory T5 i T6 pracują w połączeniu diodowym (kolektor zwarty z bazą) i są wykorzystywane do stabilizacji termicznej punktu pracy końcówki mocy (montowane są na radiatorze za pomocą specjalnych uchwytów gwarantujących dobry kontakt termiczny). Z kolektorów tranzystorów T4 i T5 wzmacniony sygnał jest podawany na bramki tranzystorów mocy T9, T10 oraz T7, T8. Pracują one w standardowym układzie wzmacniacza z obciążonym drenem. Zastosowano połączenie równoległe dwóch par tych tranzystorów, co umożliwiło zmniejszenie rezystancji wyjściowej wzmacniacza, wzrost mocy wyjściowej i dodatkowo zminimalizowanie strat mocy w tranzystorach.

W obwodach źródeł tranzystorów końcówki mocy T7..T10 są włączone rezystory R26..29, które spełniają dwa zadania:

- ograniczają prąd wyjściowy, dodając się do rezystancji kanału włączonego tranzystora;
- odkłada się na nich napięcie polaryzujące tranzystory (T1, T2) zabezpieczające końcówkę przed przeciążeniem prądowym.

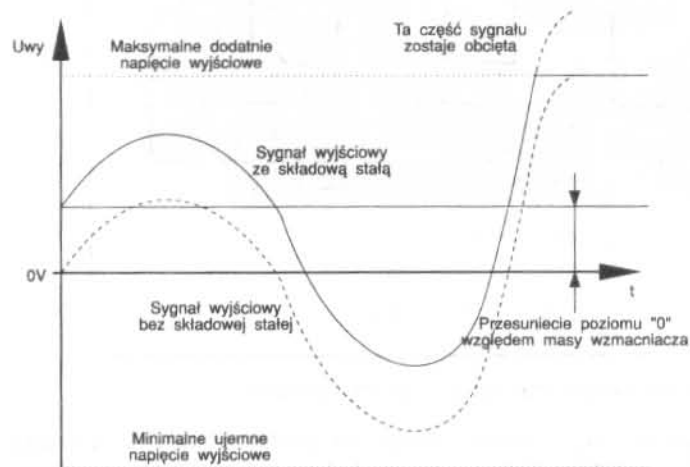
Bezpieczniki wykonano z elementami T2, D2, R6 i R9 (dla połówki dodatniej) oraz T1, D1, R5 i R8 (dla połówki ujemnej). Jeżeli przez tranzystory T7, T8 lub T9, T10 popłynie prąd, który na rezystorach R26, R27

lub R28, R29 spowoduje powstanie spadku napięcia ok. 0,6..0,7V to tranzystory zabezpieczające T1 lub T2 zaczną przewodzić zwierając bramki tranzystorów mocy z ich źródłami, co w konsekwencji ograniczy prąd wyjściowy. Od tego momentu stopień wyjściowy pracuje w obszarze stabilizacji prądu wyjściowego. Sposób ograniczenia prądu wyjściowego przedstawia rys. 4. Diody D1 i D2 zabezpieczają tranzystory T1 i T2 przed możliwością ich uszkodzenia w czasie pracy wzmacniacza. Niebezpieczeństwo uszkodzenia pojawia się w chwili wysterowania wzmacniacza sygnałem o dużej amplitudzie, co powoduje duże zmiany napięcia (ze zmianą polaryzacji) na wyjściu układu zabezpieczającego.

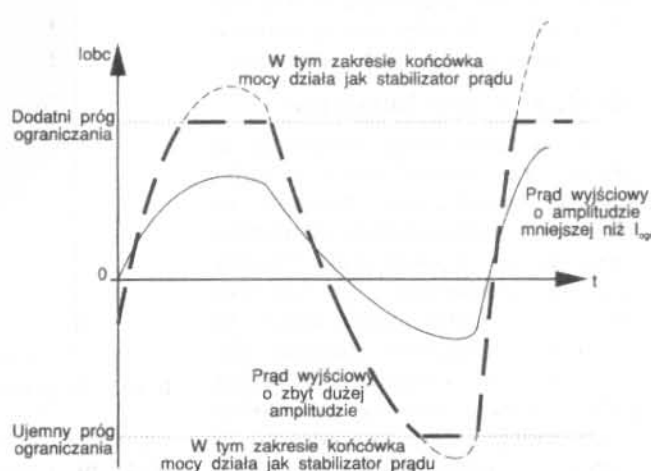
Zastosowane elektroniczne bezpieczniki przeciwzwarciowe cechuje duża prostota działania, ale i jedna wada. Otóż w zakresie prądów wyjściowych bliskich (nieco mniejszych) prądowi zadziałania ogranicznika, układ zabezpieczający wprowadza dodatkowe zniekształcenia nieliniowe w sygnale wyjściowym. Wynika to z faktu że przy napięciu B-E bliskim napięciu progowemu ($U_{BE}=0,6..0,7V$) tranzystor zaczyna przewodzić obniżając nieco wysterowanie końcówki mocy, co powoduje zniekształcenia sygnału wyjściowego. Należy więc unikać pracy wzmacniacza na granicy maksymalnego prądu wyjściowego.

Diody Zenera D3 i D4 zabezpieczają wejścia tranzystorów mocy (obwody G-S) przed przekroczeniem napięcia powyżej wartości bezpiecznej.

Elementy R33 oraz C1 zapewniają dociążenie wzmacniacza w zakresie wysokich częstotliwości. Jest to dość



Rys. 3. Zniekształcenia sygnału spowodowane złym wyzerowaniem wzmacniacza



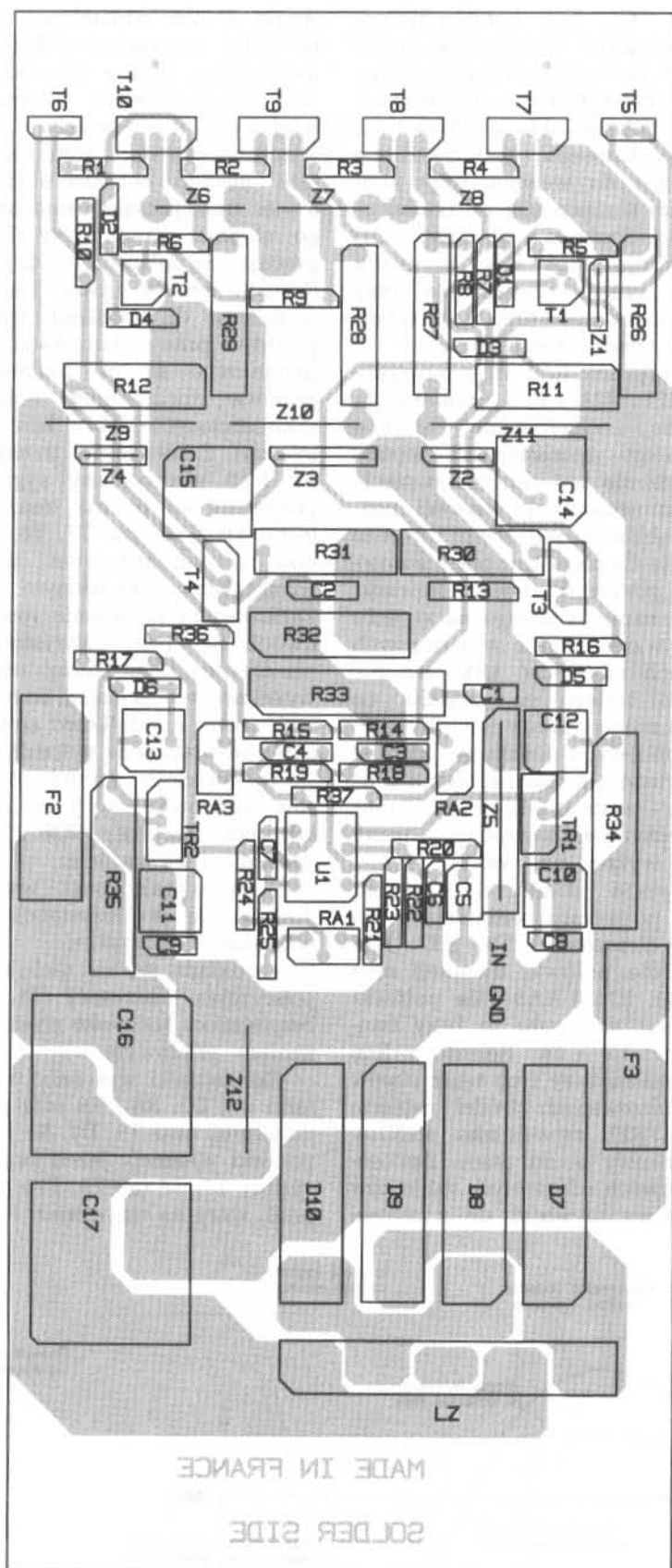
Rys. 4. Wpływ zabezpieczenia przeciwzwarciowego na kształt prądu wyjściowego

ważny element obwodu wyjściowego, ponieważ impedancja zespołu głośnikowego w zakresie wyższych częstotliwości rośnie, co powoduje niedociążenie wzmacniacza. W skrajnym przypadku może to nawet doprowadzić do uszkodzenia tranzystorów wyjściowych. Elementy R32, C2 wraz z rezystorem R13 spełniają rolę lokalnego sprzężenia zwrotnego w stopniu wyjściowym. Rola pojemności C2 sprowadza się do ograniczenia wzmocnienia stopnia wyjściowego dla składowych sygnału wejściowego o wyższych częstotliwościach. Dodatkowo do wyjścia wzmacniacza dołączony został obwód całkowitego sprzężenia zwrotnego - są to elementy R18, C3. Takie rozdzielanie pętli sprzężeń gwarantuje poprawną pracę wzmacniacza w szerokim zakresie częstotliwości.

W zasilaczu wykorzystano transformator z rdzeniem toroidalnym o mocy 200VA i podwójnym uzwojeniu wtórnym 2x24V. Napięcia zasilające są prostowane w prostowniku dwupołkowym D7..D9 i filtrowane przez kondensatory C16 i C17 o stosunkowo dużej pojemności. Oprócz bezpieczników elektronicznych, które zabezpieczają wyjścia wzmacniacza zastosowano dwa bezpieczniki topikowe F1 i F2. Zabezpieczają one cały układ wzmacniacza przed przekroczeniem progu maksymalnego poboru prądu z zasilacza. Do zasilania wejściowego wzmacniacza operacyjnego U1 zastosowano dwa stabilizatory scalone (dodatni i ujemny) TR1 i TR2. Od strony wejść stabilizatorów zastosowano ograniczniki napięcia wejściowego R35 i D6 dla stabilizatora TR2 oraz R34 i D5 dla TR1. Zapobiegają one nadmiernemu nagrzewaniu się stabilizatorów, tak więc nie są konieczne radiatory dla tych układów.

Montaż i uruchomienie

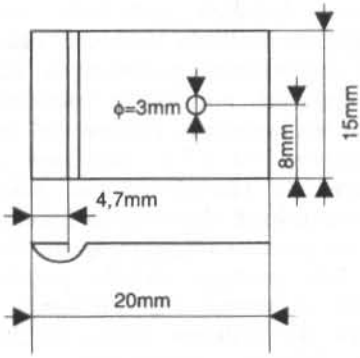
Wzmacniacz został wykonany na płytce drukowanej, której mozaikę ścieżek przedstawia rysunek na wkładce, a rozmieszczenie elementów - rys. 5. Cały stopień mocy (mono), włącznie z zasilaczem - ale bez transformatora, został „upakowany” na tej płytce. Kolejność montażu elementów jest w zasadzie dowolna. Jedyna uwaga dotyczy radiatorów, które najlepiej jest zamontować na końcu, tuż przed włożeniem płytki do obudowy. Tranzystory T5 i T6 należy wsunąć w opaskę wykona-



Rys. 5. Rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej

na z blachy o grubości ok. 0,6mm (rys. 6) i następnie przymocować do radiatora za pomocą śruby M3. Ta sama śruba mocuje zewnętrzne -

licząc od środka płytki - tranzystory mocy. Połączenia wyjść oraz zasilania należy wykonać za pomocą przewodu (linki) miedzianego o przekroju



Rys. 6. Kształt obejmy mocującej tranzystory

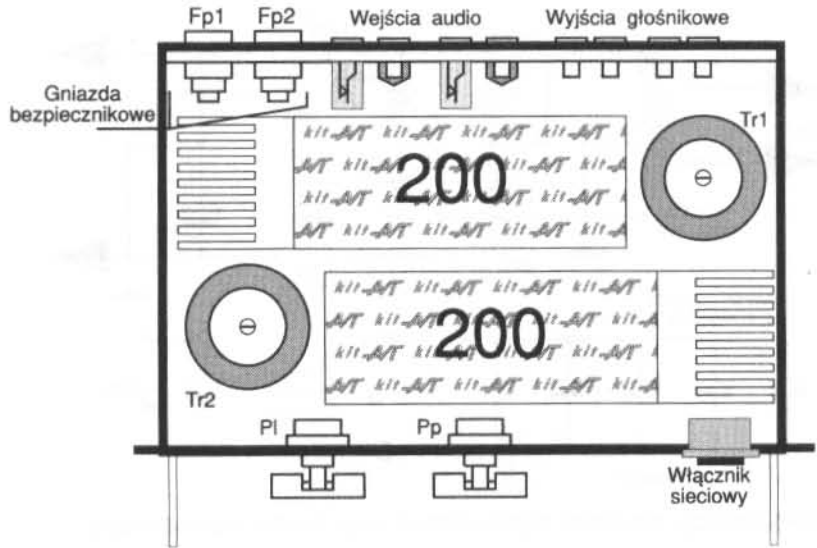
minimum 5..8mm² w izolacji. Podobnym przewodem, a najlepiej miedzianym drutem w izolacji, należy wykonać połączenia na płycie drukowanej oznaczone jako zwory. Sygnały wejściowe należy doprowadzić przewodem ekranowanym.

Do płyty czołowej należy przykręcić potencjometry regulacji wzmocnienia z ośką o długości ok. 12..18 mm (zależnie od typu zastosowanej gałki), następnie montujemy zewnętrzną płytę czołową wraz z uchwytami transportowymi. Oprócz otworów na potencjometry na płycie czołowej wykonany został jeszcze jeden, prostokątny otwór na włącznik sieciowy. Jest on montowany na wcisk - wysunięciu się z obudowy zapobiegają specjalne paski rozporowe z nacięciami. Można również zastosować włącznik z podświetleniem (za pomocą wbudowanej neonówki).

Pod tranzystory końcówki mocy T7..10 należy włożyć podkładki izolacyjne (teflonowe lub z miki) z otworem na śrubę mocującą, dokładnie posmarowane pastą silikonową. Śruby mocujące należy dodatkowo odizolować od radiatora tranzystorów za pomocą tulejek z tworzywa. Ogólne zalecenie jest następujące: każdy z tranzystorów powinien być odizolowany galwanicznie od aluminiowego radiatora, przy zapewnionym możliwie dobrym kontakcie termicznym.

Montażowi tych tranzystorów warto poświęcić dużo uwagi, ponieważ niedokładny montaż może spowodować uszkodzenie drogich elementów.

Dokładnego odizolowania od obudowy wymagają także śruby mocujące obwód drukowany. Można tu wykorzystać przelotki z tworzywa (podobne jak dla tranzystorów) lub tulejki wykonane z ebonitu lub innego dielektryka.



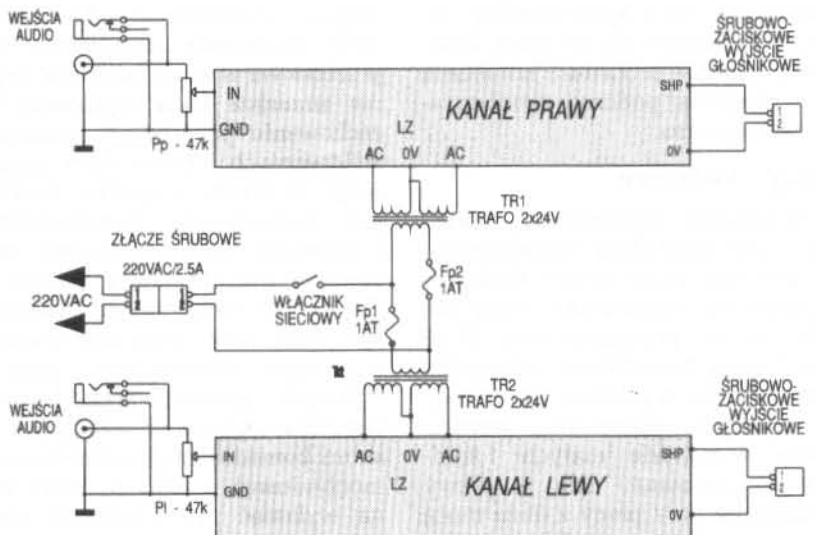
Rys. 7. Schemat montażowy wzmacniacza

Transformatory zasilające należy zamontować za pomocą śrub o średnicy 5..8mm bezpośrednio do dolnej powierzchni obudowy, wykorzystując standardowe uchwyty dołączone do transformatora.

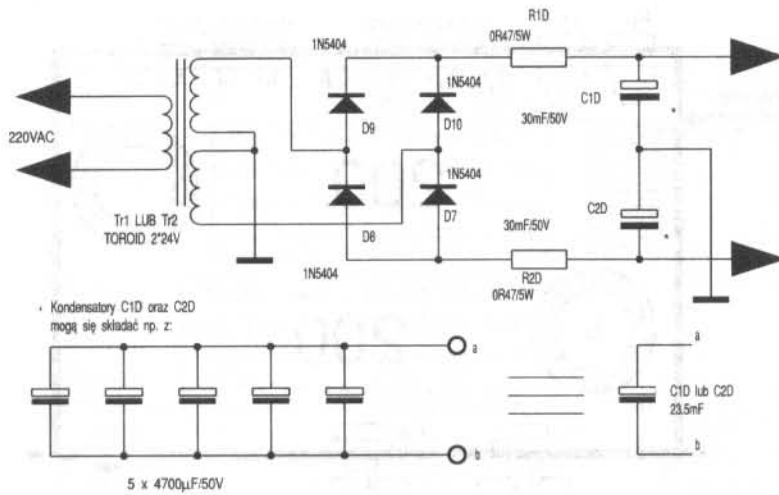
Na rys. 7 znajduje się schemat montażowy wzmacniacza, a na rys. 8 przedstawiono połączenia elektryczne, które należy wykonać poza płytką drukowaną. Połączenia niskonapięciowe, np. wyjścia do głośników, zasilania należy wykonać izolowaną linką miedzianą o możliwie dużym przekroju, nie mniejszym niż 15mm². Połączenia od strony sieci zasilającej muszą być wykonane przewodem przystosowanym do tego typu zadań. Tu także warto zadbać o zapewnienie dobrej jakości sznura sieciowego z grubymi przewodami. Moc pobierana z sieci wynosi do

ok. 450W, tak więc przewód sieciowy musi wytrzymać obciążenie ok. 2..3A.

Po weryfikacji wszystkich połączeń należy wyjąć bezpieczniki F1 i F2 (dla wersji stereo w obydwu płytach), włączyć zasilanie sieciowe i odczekać kilkanaście sekund. Następnie należy skontrolować napięcia zasilające, które powinny wynosić ±30..35V. W dalszej kolejności roładowujemy za pomocą rezystora 220Ω/5W kondensatory C16 i C17, montujemy bezpieczniki i ustawiamy suwaki potencjometrów RA2 i RA3 w położeniach środkowych. Za pomocą amperomierza mierzymy prąd płynący przez tranzystory końcowe i odpowiednio regulując sprowadzamy ten prąd do wartości ok. 270..330mA. Czynności te należy powtórzyć dla drugiego kanału. Po



Rys. 8. Schemat połączeń poza płytkami wzmacniacza



Rys. 9. Modyfikacja zasilacza poprawiająca właściwości wzmacniacza

odczekaniu ok. 20 minut (wzmacniacz cały czas włączony) ponownie kontrolujemy prąd spoczynkowy i ustawiamy jego wartość na ok. 200..230mA. Po dołączeniu generatora przebiegu sinusoidalnego (ok. 1kHz) do wejścia wzmacniacza, za pomocą oscyloskopu obserwujemy kształt przebiegu wyjściowego. Korygując jeden z potencjometrów RA2 lub RA3 doprowadzamy do pełnej symetrii obydwu połówek przebiegu wyjściowego (po dodatniej i ujemnej stronie osi amplitudy). Należy teraz odłączyć generator i ponownie zmierzyć prąd stopnia końcowego. Jeżeli jego wartość mieści się w przedziale 200..250mA to tę regulację można uznać za zakończoną. Jeżeli zmierzony prąd jest mniejszy lub większy to ponownie należy przeprowadzić regulację w podanej wyżej kolejności.

Po długotrwałym dalszym wyrzewaniu wzmacniacza, za pomocą potencjometru RA1 sprowadzamy napięcie wyjściowe do wartości 0,0V, co jest ostatnią procedurą konieczną do wykonania podczas uruchamiania wzmacniacza.

Uwagi końcowe

W zasilaczu wzmacniacza zastosowano wysokiej klasy transformatory toroidalne zapewniające doskonałe parametry dynamiczne pracy układu. Filtry pojemnościowe (C16 i C17) mają stosunkowo niewielką pojemność, co wystarcza dla uzyskania wysokich parametrów wzmacniacza w zakresie małych i średnich wysterowań. Dla poprawy parametrów przy pracy z dużą mocą wyjściową zaleca się zwiększenie pojemności tych kondensatorów do

ok. 20..30mF (20000..30000µF). Pojedyncze kondensatory o tak dużej pojemności i stosunkowo dużym napięciu pracy (ok. 50V) są trudno dostępne, dlatego pozostaje składowanie baterii kondensatorów połączonych równolegle. Przy tak dużych pojemnościach należy nieco zmodyfikować zasilacz, tzn. w szereg z szyną zasilającą należy włączyć opornik o rezystancji rzędu 0,1..1Ω, który ograniczy początkowy prąd ładowania do wartości bezpiecznej dla transformatora i prostownika. Schemat elektryczny rozbudowanej wersji zasilacza przedstawia rys. 9.

Łatwo zauważyć, że usunięcie jednej pary tranzystorów mocy na wyjściu wzmacniacza nie spowoduje praktycznie żadnych konsekwencji dla pracy wzmacniacza, oprócz zmniejszenia mocy wyjściowej. Podczas prób z tak „okrojonym“ wzmacniaczem moc wyjściowa zmniejszyła się do ok. 70..80W, co można uznać za wartość wystarczającą do przeciętnych zastosowań domowych. Taka przebudowa wzmacniacza dość wydatnie zmniejsza koszt wykonania przy zachowaniu pozostałych parametrów elektrycznych (oprócz mocy wyjściowej). W takim wypadku możliwe jest zastosowanie transformatorów o mniejszej mocy (w modelu zastosowano transformatory 200W), co dodatkowo obniży koszt wykonania, nie będą one jednakże dostępne w ramach oferowanego zestawu. Przewody sieciowe dochodzące do włącznika zasilania są zakończone żeńskimi konektorami (standardowe samochodowe) w izolacji, którą można wykonać np. z koszulki termokurczliwej.

Ze względu na konieczność utrzy-

mania symetrii końcówki mocy względem zasilania niezbędne okazało się zastosowanie parowanych (czyli dobraćanych pod kątem współczynnika wzmocnienia prądowego) tranzystorów T3 i T4. Możliwe jest oczywiście przeprowadzenie selekcji w warunkach domowych (choćby za pomocą charakterografu AVT-78 lub prostego układu pomiarowego z dwoma multimetrami), co może dać całkiem niezłe rezultaty. Złe dobranie tranzystorów może powodować wzrost zniekształceń i zmniejszenie mocy wyjściowej wzmacniacza. W oferowanym przez AVT zestawie są stosowane parowane zamienniki tych tranzystorów. Przeprowadzone zostały próby z tranzystorami BD285/6, które doskonale zdały egzamin.

Podczas kompletacji elementów szczególną uwagę należy zwrócić na jakość potencjometrów RA1..3. Bardzo duże znaczenie dla poprawnej pracy wzmacniacza ma stabilność termiczna rezystancji tych potencjometrów.

AVT

Wszystkie elementy wraz z płytami drukowanymi i obudową metalową (z sitodrukiem płyty czołowej) można nabyć w postaci kitu AVT-200.

WYKAZ ELEMENTÓW**(dla jednego kanału)****Rezystory 0,125W, jeżeli nie podano inaczey**

R1, R2: 10Ω
 R3, R4: 33Ω
 R5, R6, R7, R8, R9, R10: 220Ω
 R11, R12: 220Ω/0,5W
 R13: 33Ω/0,5W
 R14, R15: 820Ω/0,5W
 R16, R17: 12kΩ
 R18: 270kΩ
 R19: 680kΩ
 R20, R21, R36, R37: 1kΩ
 R22: 47kΩ
 R23, R24: 10kΩ
 R25: 82kΩ
 R26, R27, R28, R29: 0,18Ω/3W
 R30, R31, R33: 47Ω/0,5W
 R32: 680Ω/3W

R33: 47Ω/3W
 R34, R35: 470Ω/3W
 RA1: 22k potencjometr miniaturowy
 RA2, RA3: 4k7 potencjometr miniaturowy
 Pp lub Pi: 47kΩ/B przykręcany do obudowy

Kondensatory

C1, C2: 33nF/63V
 C3: 3,9nF
 C4: 1,8nF
 C6: 470pF
 C7: 27pF
 C8, C9: 100nF/63V
 C10, C11, C12, C13: 4,7μF/63V
 C5: 1μF/63V unipolarny
 C14, C15: 100pF/63V
 C16, C17: 3300μF/50V

Kondensatory mogą mieć wyższe napięcie pracy niż podano.

Półprzewodniki

D1, D2: 1N4148
 D3, D4: DZ8V2/0,25W
 D5, D6: DZ30V/1W
 D7, D8, D9, D10: 1N5404 lub inne min. 3A/50V
 T1: 2N2222

T2: 2N2907
 T3: BF760 lub BD286
 T4: BF757 lub BD285
 T5, T6: 2N9680
 T7, T8: IRF540
 T9, T10: IRF9540
 TR1: LM7918
 TR2: LM7818
 U1: NE5534

Różne

F2, F3: 6,3AT
 Tr: transformator toroidalny 2x24VAC/200VA
 Obudowa kpl.