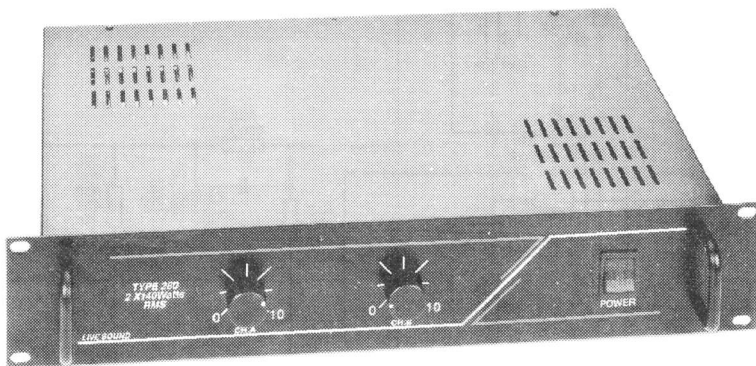


Wzmacniacz mocy z tranzystorami HexFET

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 bipolarne 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.

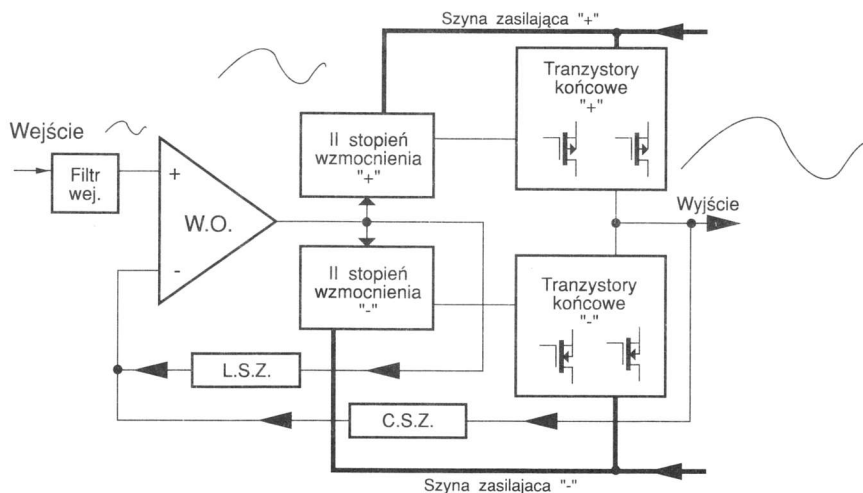
Parametry wzmacniacza (jeden kanał) są następujące:

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

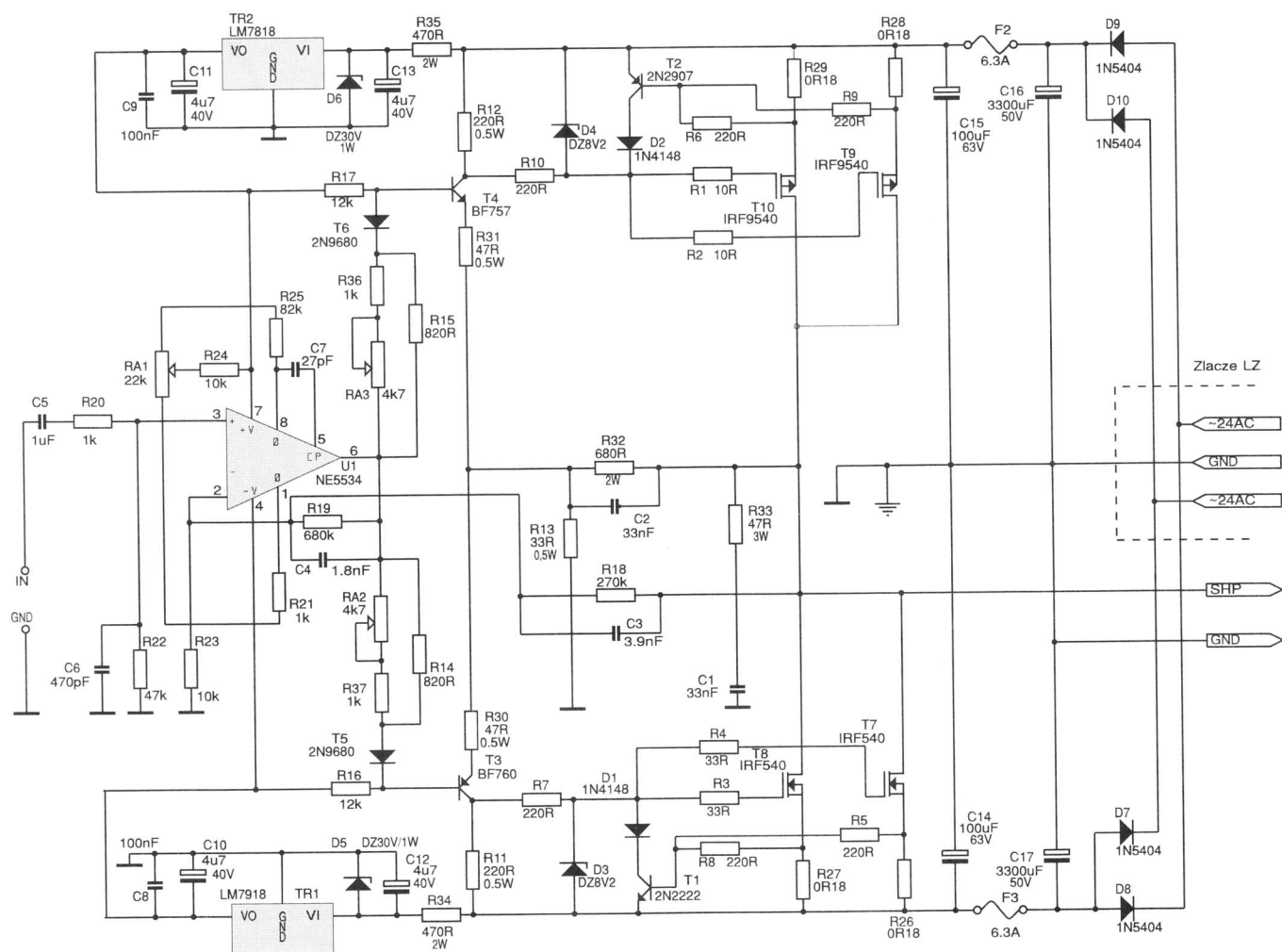
- moc wyjściowa (sinus): 100W;
- moc muzyczna: 140W;
- szybkość narastania sygnału na wyjściu, przy pobudzeniu prostokątem 1kHz: 11V/μs;
- zawartość harmonicznych w sygnale wyjściowym, w pasmie 15Hz...22kHz dla mocy wyjściowej 80W: max. 0,04%;
- pobór mocy z sieci zasilającej: 200W/kanał.

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 ($SVR=13V/\mu s$) 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. Sygnał 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 przenoszenia do potrzeb układu. Pojemność tego kondensatora jest dołączona równolegle do wewnętrznego kondensatora kompensującego (zintegrowanego ze strukturą wzmacniacza U1) o pojemności 12pF, który zapewnia stabilną pracę wzmacniacza przy wzmocnieniu powyżej 3 w całym pasmie częstotliwości.

Potencjometr RA1 wraz z rezystorami R21, R24 i R25 umożliwiające dokładne „wyzerowanie” stopnia wyjściowego wzmacniacza, poprzez sprowadzenie wyjściowego napięcia nierównoważenia do wartości możliwie najbliższej zeru. Ma to ogromne znaczenie dla poprawnej pracy wzmacniacza ponieważ nawet niewielki poziom napięcia stałego na wyjściu U1 po wzmocnieniu 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 wzmocnienie 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 wzmocniony 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.

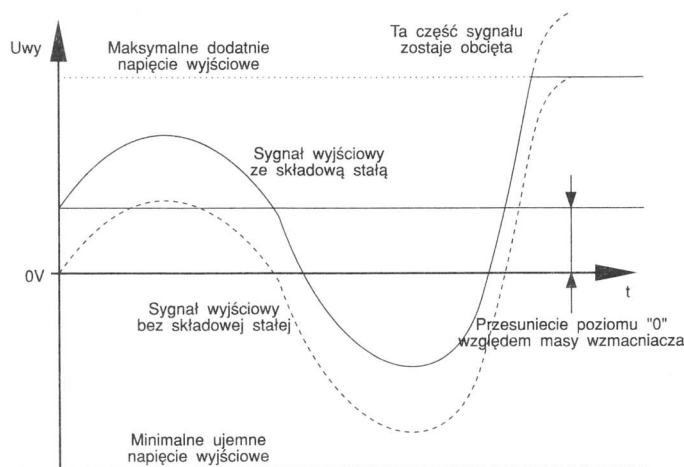
Bezpieczniki wykonano z elementami T2, D2, R6 i R9 (dla połówki dodatniej) oraz T1, D1, R5 i R8 (dla połówki ujemnej). Jeżeli przez tranzystory T7, T8 lub T9, T10 popłynie prąd, który na rezystorach R26, R27

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 występowania wzmacniacza sygnałem o dużej amplitudzie, co powoduje duże zmiany napięcia (ze zmianą polaryzacji) na wyjściu układu zabezpieczającego.

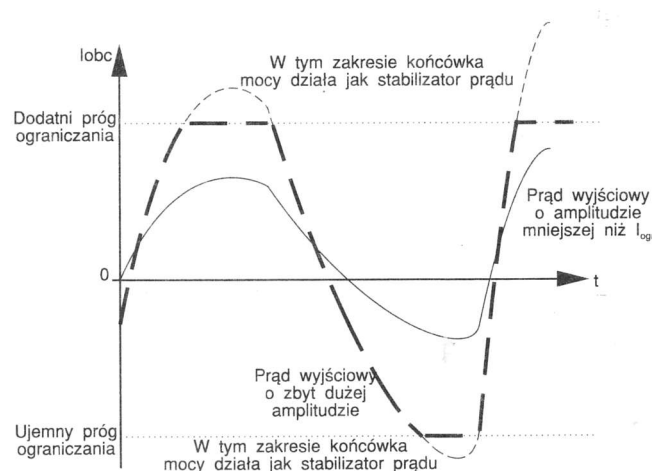
Zastosowane elektroniczne bezpieczniki przeciwzwarceniowe cechuje duża prostota działania, ale i jedna wada. Otóż w zakresie prądów wyjściowych bliskich (nieco mniejszych) prądowi zadziałania ogranicznika, układ zabezpieczający wprowadza dodatkowe zniekształcenia nieliniowe w sygnale wyjściowym. Wynika to z faktu że przy napięciu B-E bliskim napięciu progowemu ($U_{BE}=0,6..0,7V$) tranzystor zaczyna przewodzić obniżając nieco występowanie 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



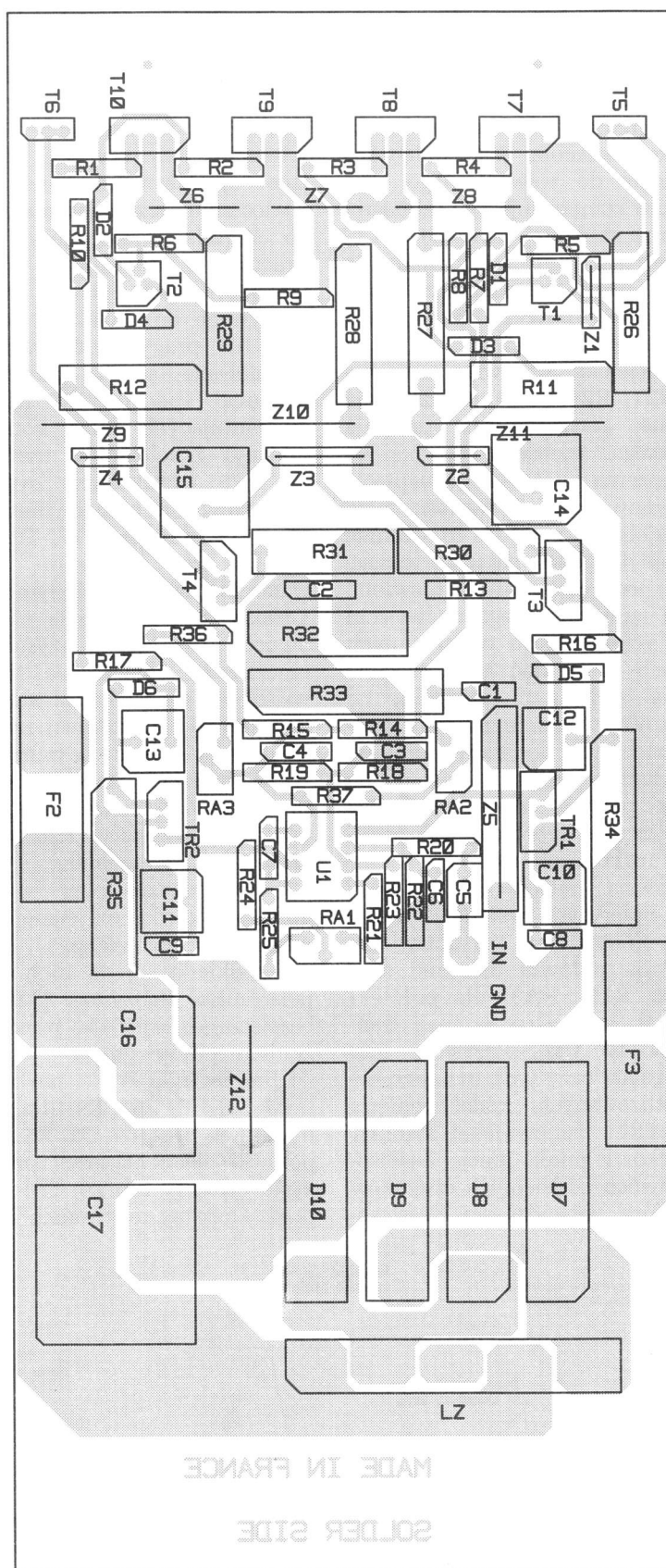
Rys. 4. Wpływ zabezpieczenia przeciwzwarceniowego na kształt prądu wyjściowego

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 sygnałów 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 dwupołówkowym 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

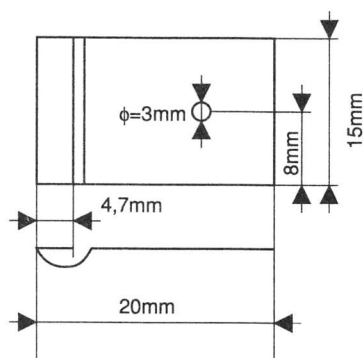
Wzmacniacz został wykonany na płytce drukowanej, której mozaikę ścieżek przedstawia rysunek na wkladce, a rozmieszczenie elementów - rys. 5. Cały stopień mocy (mono), włącznie z zasilaczem - ale bez transformatora, został „upakowany” na tej płytce. Kolejność montażu elementów jest w zasadzie dowolna. 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

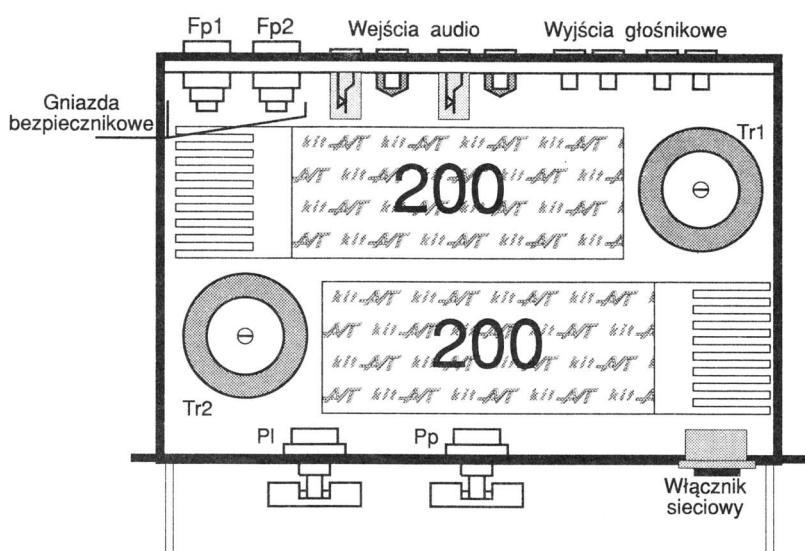
minimum 5..8mm² w izolacji. Podobnym przewodem, a najlepiej miedzianym drutem w izolacji, należy wykonać połączenia na płycie drukowanej oznaczone jako zwory. Sygnały wejściowe należy doprowadzić przewodem ekranowanym.

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.



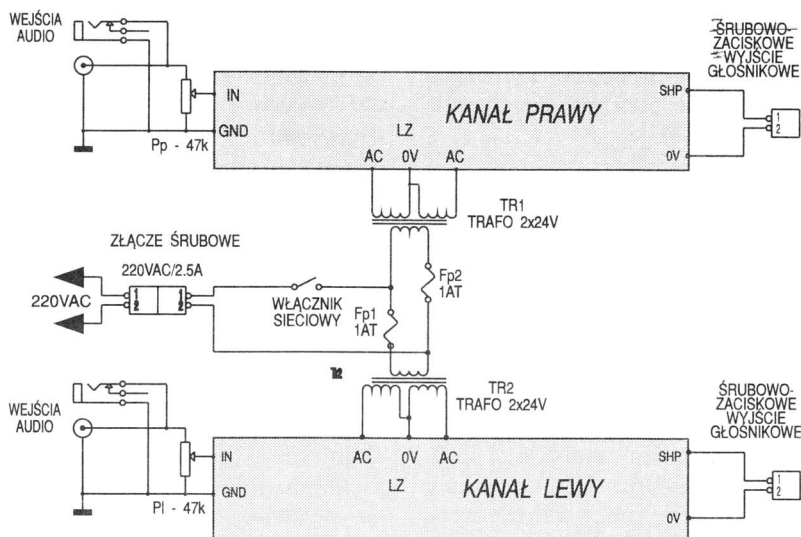
Rys. 7. Schemat montażowy wzmacniacza

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

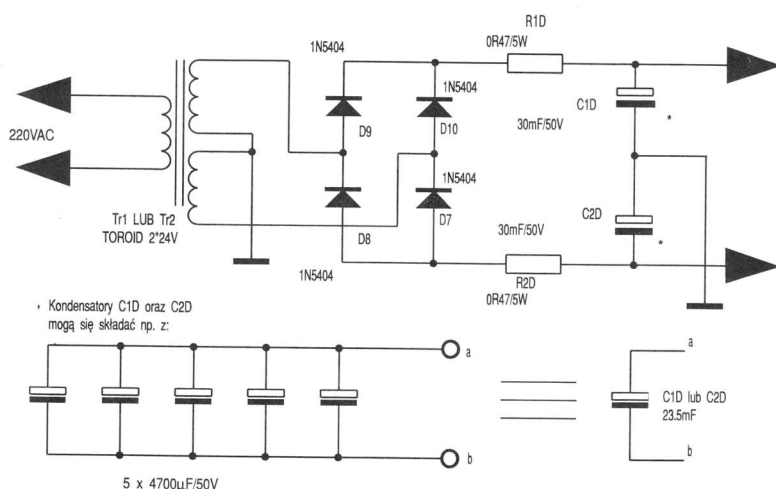
Na rys. 7 znajduje się schemat montażowy wzmacniacza, a na rys. 8 przedstawiono połączenia elektryczne, które należy wykonać poza płytką drukowaną. Połączenia niskonapięciowe, np. wyjścia do głośników, zasilania należy wykonać izolowaną linką miedzianą o możliwie dużym przekroju, nie mniejszym niż 15mm². 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 rolaodujemy 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 wygrzewaniu 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 średnichysterowań. 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 dobieranych 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 płytkami 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 inaczej**

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.

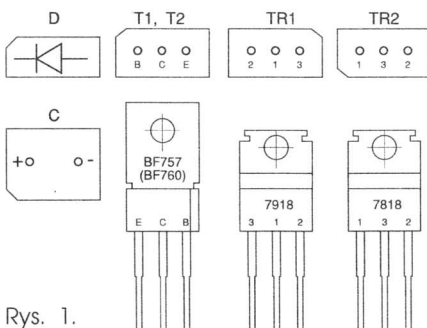
Otrzymaliśmy wyjątkowy list od naszego Czytelnika, opisujący szczegółowo jego „przygodę” z kitem AVT-200. Opis jest pasjonujący i może być bardzo przydatny dla przyszłych nabywców tego niezwykle popularnego kitu. Uruchamianie skomplikowanego układu ma zawsze posmak podróży w nieznanne, dlatego list naszego Czytelnika przywodzi na myśl reportaże z podróży. Stąd tytuł tej rubryki. Zachęcamy Czytelników do przesyłania podobnych korespondencji, które chętnie opublikujemy (honorarium - 1mln zł za 1 stronę w EP).

Przedstawiam opis montażu i uruchomienia stereofonicznego wzmacniacza mocy wysokiej jakości, opisanego w EP 5/94, w którego końcówkach zastosowano nowoczesne tranzystory Hex-FET. Mam również kilka rad i wskazówek, które przydadzą się przy „odpalaniu” tego kitu.

Pierwszym krokiem było rozpakowanie kitu i obejrzenie jego wszystkich elementów, począwszy od estetycznej płyty czołowej przez dwa bardzo ciężkie toroidalne transformatory, solidne radiatory, a skończywszy na wyglądających niepozornie tranzystorach mocy. Po przeczytaniu dokumentacji od razu zabrałem się do montażu wzmacniacza. Zacząłem od przykręcenia zacisków głośnikowych, gniazd wejściowych cinch i jack oraz gniazd bezpiecznikowych. Celowe okazało się przyklejenie gniazd bezpiecznikowych do obudowy za pomocą popularnego kleju „Super Glue”, w celu zapobiegnięcia ich obracaniu się przy wykręcaniu lub wkręcaniu bezpiecznika sieciowego. Następnie „przymierzyłem” transformatory, płytki i radiatory do obudowy wzmacniacza. Uwzględniając to, że płytki będą przymocowane na wysokości ok. 7mm nad podstawą, skróciłem je od strony mostka prostowniczego (tam gdzie nie ma ścieżek) powiększając tym samym miejsce na transformatory. Obcinając płytkę zostawiłem trochę miejsca na jej przymocowanie. W tym celu wywierciłem po cztery otwory $\phi 3,5$ przez płytki i dolną obudowę, ułatwiając sobie późniejszy montaż. Wywierciłem również dodatkowy otwór ($\phi 13\text{mm}$) na przewód sieciowy pod gniazdami bezpieczników sieciowych (najpierw wiertłem 2mm, a później stopniowo go rozwiercałem). W otworze tym osadziłem gumową przelotkę, która znajdowała się w zestawie. Kolejną czynnością było zamontowanie płyty czołowej wraz z uchwytami transportowymi. W istniejące otwory wcisnąłem włącznik sieciowy i przykręciłem potencjometry regulacji wzmacnienia. Na koniec przymocowałem transformatory i wykonałem połączenia elektryczne:

- sieciowe: przewodem w izolacji i powłoce polinitowej;
- wejściowe: przewodem ekranowanym;
- wyjściowe: przewodem (linką 2,5mm²) w izolacji polinitowej.

Oczywiście, przewody dochodzące do płytki odizolowałem, ocynowałem i zostawiłem „luzem”.



Rys. 1.

Live Sound kit AVT-200

Przed następnym etapem zatarłem ręce, ponieważ **nadeszła kolej na montaż płytki drukowanej**. Za pomocą próbnika ciągłości połączeń wykręciłem i usunąłem kilka mikrozwarców, znajdujących się między ścieżkami. Następnie wlutowałem zworki Z1...Z4 z drutu CuAg oraz Z5...Z12 z drutu miedzianego o przekroju 1,5mm².

Po zastanowieniu się, które elementy należy w pierwszej kolejności wlutować, obrałem metodę etapową, polegającą na montażu poszczególnych bloków i zarazem ich uruchamianiu. Unika się w ten sposób uszkodzenia drogich tranzystorów mocy w przypadku gdy wcześniejsze stopnie nie będą sprawne. Cały wzmacniacz podzieliłem na **cztery bloki**:

Pierwszym blokiem jaki wlutowałem i uruchomiłem był zasilacz główny zapewniający dostarczenie mocy i pomocniczy, stabilizowany, do wejściowego wzmacniacza operacyjnego (elementy D7...D10, C8...C17, F2, F3, TR1, TR2, D5, D6, R34, R35). Na **rysunku 1** podaje sposób montażu elementów, które muszą mieć zachowaną biegunowość. Pod gniazda bezpieczników F2 i F3 wywierciłem po jednym dodatkowym otworze, tak aby mogły „złapać” bezpiecznik całą powierzchnią styku. Uzyskałem napięcia (względem masy) +35V na bezpieczniku F2 i -35V na bezpieczniku F3 oraz +18V na kondensatorze C11 i -21V na kondensatorze C10 (stabilizator LM 7918 dopiero po obciążeniu zachowuje się normalnie, dając napięcie -18V).

Drugim blokiem jest różnicowy wzmacniacz napięciowy oraz układ rozsuwania napięć, który zapobiega powstawaniu zniekształceń skrośnych i sprzężenia zwrotnego (elementy C5...C7, R14...R25, R36, R37, RA1...RA3, T5, T6, U1). Tranzystory T5 i T6 pracujące w połączeniu diodowym (kolektor i baza zwarte) wlutowałem na krótkich przewodach (miejsce lutowania zabezpieczyłem koszulką), tak aby można je było wsadzić do zewnętrznych, nagwintowanych otworów w radiatorze. Suwaki potencjometrów RA1...RA3 ustawiłem w położenia środkowe. Po podłączeniu zasilania, na nóżce nr 6 wzmacniacza operacyjnego, potencjometrem RA1 ustawiłem napięcie 0,0V; na rezystorze R17 (od strony T4), potencjometrem RA3 ustawiłem +1,3V, a na rezystorze R16 (od strony T3) napięcie -1,3V.

Do tak przygotowanych płytek można dołączyć na wejście generator lub źródło dźwięku i obserwować przebieg przy pomocy oscyloskopu czy też szukać sygnału podłączając je do trzech w.w. punktów pomiarowych. W punktach tych powinien występować taki sam, czysty, niezniekształcony przebieg (wejściowe napięcie przesterowania ok 200mV), różniący się jedynie składową stałą.

Trzecim blokiem jest dwutranzystorowy wzmacniacz i układ zabezpieczenia przeciwzwarciowego (elementy R1...R13, R26...R33, T1...T4, D1...D4, C1, C2; uwaga! dioda D1 jest odwrotnie narysowana na płytce drukowanej, należy włożyć ją jak to widać na **rysunku 2**).

W celu jego sprawdzenia dołączyłem generator do wejścia układu i sprawdziłem czy występuje przebieg na rezystorach R1-R4. Jeżeli amplituda sygnału na rezystorach R1 i R2 nie jest taka sama jak na rezystorach R3 i R4 (pomijając składową stałą), to świadczy to o różnicy wzmocnienia prądowego tranzystorów T3 i T4. Przebieg może być trochę niestabilny, ponieważ nie działa całkowite sprzężenie zwrotne, ale nie powinien zawierać widocznych zniekształceń.

Jeżeli pomyślnie doszliśmy do tego momentu, można montować **czwarty blok**: radiator i tranzystory mocy (T7...T8).

Najpierw oczyściłem radiatory, a szczególnie miejsca dotyku tranzystorów, drobnociastym papierem ściernym. Po usunięciu opiłków i zanieczyszczeń przykręciłem radiator do płytki jedną śrubą M3 i posmarowałem miejsca styków z tranzystorami dokładnie pastą silikonową. W miejsca pod tranzystory „przykleiłem” podkładki mikowe zwracając szczególną uwagę czy nie są uszkodzone i je również posmarowałem. Aby przykręcić tranzystory do radiatora, najpierw powyginałem ich nóżki tak, aby całą powierzchnią dotykały radiatora i jednocześnie luźno wchodziły w płytkę. Otwory w radiatorze powinny być nagwintowane gwintem M2,5, ale skoro były już przygotowane pod śrubę M3, powiększyłem otwory w tulejkach kołnierzych wiertłem $\phi 2,8$ (ręcznie), a następnie po wciśnięciu ich w tranzystory mocy wkręciłem w nie śruby. Tak przygotowane tranzystory posmarowałem dokładnie pastą silikonową i przykręciłem do radiatora zwracając uwagę na ich oznaczenia i na to by były odizolowane od niego. Nadmiar silikonu usunąłem i omiarem sprawdziłem czy nie ma zwarcia któregoś radiatora tranzystora z radiatorem aluminiowym. Po przyłutowaniu tranzystorów mocy, włożeniu tranzystorów-czujników w otwory radiatora i zamontowaniu płytek, przyszła kolej na „gwóździł programu”, czyli uruchomienie całego wzmacniacza.

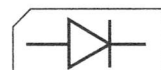
Przedstawiam teraz opis w miarę precyzyjnego sposobu wyregulowania wzmacniacza, po którym końcowy efekt jest w zupełności zadowalający.

Kanały uruchamiałem pojedynczo. Podczas uruchamiania kanału A bezpiecznik sieciowy kanału B był wykręcony i odwrotnie.

Jeżeli wcześniej nie były dokonywane żadne regulacje, to suwaki potencjometrów RA1...RA3 ustawiamy w położeniach środkowych.

Za pomocą amperomierza regulujemy prąd płynący przez tranzystory końcowe. Wyjmując bezpiecznik F2 mierzymy prąd płynący przez tranzystory T9 i T10 i za pomocą potencjometru RA3 sprowadzamy go do wartości ok. 70mA dla dwóch par tranzystorów mocy, lub 35mA dla jednej pary,

D1



Rys. 2.

gdy radiatory są jeszcze zimne. Wyjmując bezpiecznik F3, za pomocą potencjometru RA2, korygujemy do tej samej wartości prąd płynący przez tranzystory T7 i T8, zwracając uwagę na to, że rezystor R35 jest włączony przed bezpiecznikiem F2, a R34 za bezpiecznikiem F3. Prąd płynący przez rezystor R34 wynosi 12mA. Wartość tę należy odjąć przy pomiarze. Następnie za pomocą potencjometru RA1 sprowadzamy napięcie wyjściowe do wartości możliwie najbliższej 0V. Po odczekaniu aż temperatura radiatora przestanie rosnąć (ok 20-30 minut) ponownie kontrolujemy prąd spoczynkowy tranzystorów mocy i ustawiamy jego wartość na 100mA (50mA). Zmniejszenie wartości prądu spoczynkowego tranzystorów mocy w stosunku do opisu z EP 5/94 nie pogarsza jakości wzmacniacza, a znacznie przyczynia się do obniżenia temperatury spoczynkowej radiatorów (z 60°C do 45°C). Po dołączeniu generatora przebiegu sinusoidalnego (ok. 1kHz) do wejścia wzmacniacza, za pomocą oscyloskopu ustawionego w tryb „ze stałą składową”, (łatwo wtedy rozróżnić, który potencjometr jest od interesującej nas połówki przebiegu) obserwujemy amplitudę sygnału wyjściowego. Jeżeli jedna połówka przebiegu wyjściowego ma większą wartość niż druga, to korygując nieznacznie jeden z potencjometrów RA2 lub RA3 należy zmniejszyć „większą” połówkę doprowadzając tym samym do pełnej symetrii obydwu połówek tego przebiegu. Po odłączeniu generatora ponownie mierzymy prąd końcówek mocy. Jeżeli jego wartość mieści się w zakresie 90-110mA (45-55mA dla jednej pary) to tę regulację można uznać za zakończoną. Następnie ponownie sprowadzamy napięcie wyjściowe do wartości 0.00V. Te czynności należy powtórzyć dla drugiego kanału.

Po wyregulowaniu wzmacniacza należy założyć obudowę górną i obciążyć go pełną mocą (przy obciążeniu 4Ω dla dwóch par końcówek mocy i 8Ω dla jednej pary) przez 10 minut. Po odłączeniu sygnału należy jeszcze raz sprawdzić napięcie stałe na wyjściu i ewentualnie skorygować je potencjometrem RA1 oraz zmierzyć prąd końcówek mocy. Jeżeli przekracza wartość 150mA (75mA), świadczy to o słabym kontakcie termicznym tranzystorów T5 i T6 z radiatorem (powinien mieć wartość poniżej 100mA). W moim modelu zdecydowałem się na umieszczenie tych tranzystorów w zewnętrznych otworach radiatorów, i na zalanie ich silikonem. Przyklejenie do radiatora tranzystorów nie przyniosło zadowalających rezultatów, a obejmy nie pasowały do tranzystorów mocy.

Po wyregulowaniu wzmacniacza mogę go polecić najbardziej wymagającym melomanom, jak również zwolennikom istniejącego mocnego uderzenia.

Dla jednej pary tranzystorów mocy wzmacniacz obciążyłem zestawem głośnikowym 100W 8Ω i uzyskałem moc 40W przy napięciu wyjściowym 0.77V (temp. radiatora ok. 55°C). Dla dwóch par przy tym samym obciążeniu moc nieznacznie wzrosła, a po dołączeniu zestawu głośnikowego 200W 4Ω uzyskałem moc 90W (temp. radiatora ok. 70°C).

Największym moim „odkryciem” jest usunięcie kondensatorów C3 i C4, co przyczynia się do polepszenia jakości dźwięku i stabilności wzmacniacza. Oczywiście, polecam wylutowanie tych kondensatorów osobom, które już złożyły taki wzmacniacz. Można porównać sobie parametry kanału z tymi kondensatorami i bez nich i dokonać własnego wyboru.

W moim przypadku, po złożeniu wzmacniacza (wraz z kondensatorami C3 i C4), za pomocą oscyloskopu można było zaobserwować przebieg sinusoidalny o częstotliwości 2.9 MHz i amplitudzie 1Vp.p. (międzyzycytow). Występował on w obu kanałach po około 3-4 minutach od chwili włączenia wzmacniacza, bez podania jakie-

gokolwiek sygnału na wejście. (Muszę dodać że duża część świeżych projektów ma podobne objawy, które się później eliminuje.) Nie wyklucone, że inne egzemplarze tego wzmacniacza też mogą się wzbudzać. Mimo tego, że przebiegu o takiej częstotliwości nie słyhać, to obciąża on niepotrzebnie tranzystory mocy mogąc je uszkodzić i wprowadza dodatkowe zniekształcenia (należy więc obowiązkowo sprawdzić oscyloskopem zachowanie się wzmacniacza na wyjściu).

Wzbudzenie się wzmacniacza świadczy o jego niestabilności, więc początkowo zastosowałem tradycyjne kondensatory (ok. 100-470pF) między bazą a kolektor tranzystorów sterujących, aby szkodliwe częstotliwości nie były przez nie wzmacniane. Uzyskałem tylko zmniejszenie amplitudy do 0.6Vp.p. Dalsze zwiększanie pojemności kondensatorów mija się z celem, gdyż ograniczałyby one znacznie użyteczne pasmo wzmacniacza. Po prostu nie tędy droga.

A co zapewnia odpowiednią stabilność wzmacniacza? Odpowiedź jest prosta - sprzężenie zwrotne. Z kolei tu zaczynam „wojować”. Wiadomo, że na krańcach wzmacnianego pasma występują przesunięcia fazowe. Jeśli do tego dodamy przesunięcie fazowe w pętli sprzężenia zwrotnego (poprzez zastosowanie kondensatora), które obejmuje kilka stopni, a tym samym jest głębokie, to może ono (względem przebiegu wejściowego) stać się na tyle dodatnie i dostatecznie silne, że wzmocnienie może wzrosnąć do nieskończoności, a wówczas wzmacniacz przekształca się w generator, generujący drgania własne. Tu wylutowałem z jednej płytki kondensator C3 (3.9nF) z pętli całkowitego sprzężenia zwrotnego. Pomogło. Wzmacniacz przestał się wzbudzać. Wylutowałem kondensator z drugiej płytki-też pomogło.

Po przeróbce, analizując charakterystykę przeniesienia wzmacniacza doszedłem do wniosku, że nadmiernie obcina on pasmo częstotliwości począwszy od 12kHz. Przyczyną był kondensator C4 (1.8nF) w pętli lokalnego sprzężenia zwrotnego. Po zastosowaniu kondensatora o mniejszej pojemności (kilkanaście pF - bezpiecznej dla pasma) znacząco wpływa on na powstawanie zniekształceń TIM. Tak więc zadowolili mnie jego brak. Po wylutowaniu kondensatora C4, aż korciło wylutować kondensator C2 (33nF). Jednak jest on naprawdę potrzebny, ponieważ ogranicza pasmo częstotliwości grubo ponad akustycznych. W ten sposób zapobiega powstawaniu przypadkowych, szkodliwych oscylacji na wyjściu i „wygladza” przebiegi o dużych amplitudach oraz bardzo stromych zboczach, zapobiegając powstawaniu znacznych przepięć oraz zniekształceń TIM. Poza tym, obejmuje tylko dwa stopnie i nie wprowadza tak znacznych przesunięć fazowych jak kilka kondensatorów.

O ocenie wzmacniacza poprosiłem kilku znanych melomanów, którzy wykonali szereg testów. Przy wykonywaniu testów cały czas były podłączone cztery jednokolumny 100W 8Ω (po dwie równolegle na kanał). Wstępnie przesłuchali wzmacniacz w pomieszczeniu zamkniętym. W ich odczuciu subiektywnym przy mocy około 2x80W nie dało się zaobserwować zniekształceń wnoszonych przez wzmacniacz. Z uznaniem wypowiedzieli się o czystości dźwięku w zakresie częstotliwości powyżej 10kHz. Niektóre krajowe wzmacniacze przy dużych mocach zmieniają te częstotliwości na męczący gwizd. Wzmacniacz przenosił również bardzo dobrze częstotliwości począwszy od 5Hz, zapewniając tym samym mocne uderzenie i wprawianie w rezonans wszystkich możliwych przedmiotów.

Później przenieśli cały sprzęt na otwartą przestrzeń, pod gołe niebo, przy temperaturze powietrza 35°C. Wzmacniacz pozbawili jakiegokolwiek chłodzenia (stał on bez nóżek, pod korektorem i magnetofonem, wystawiony na działanie promieni słonecznych). Następnie obciążyli go pełną mocą

przez jedną godzinę. Obudowy magnetofonu, korektora i wzmacniacza miały temperaturę 58°C, a radiatory wzmacniacza dogrzały się do temperatury 75°C. **Wzmacniacz jednak doskonale zdał egzamin.** Forsowanie mocy w tak wysokiej temperaturze wywołało tylko zrozumiałe zainteresowanie mieszkańców sąsiednich domów.

Myślę więc, że wzmacniacz ten, mimo swojej prostoty, zadowoli wielu amatorów sprzętu audio.

Daniel Magdziarz

Od redakcji

Trzeba przyznać, że umiejętność opracowania tak precyzyjnego opisu sposobu montażu i uruchomienia wzmacniacza Live Sound świadczy o ogromnej wiedzy fachowej oraz dociekliwości naszego Czytelnika. Nie ukrywamy, że wielką przyjemność sprawiły nam informacje końcowe o wysokiej ocenie jakości dźwięku i walorów użytkowych tego wzmacniacza. W egzemplarzu modelowym wykonanym w oparciu o oryginalną francuską dokumentację) zastosowany został zestaw elementów ściśle odpowiadających dokumentacji. Dotyczy to przede wszystkim parametrów tranzystorów BF757 i BF760. Wzmocnienie tranzystorów stosowanych w oryginalnym wzmacniaczu wynosi ok. 90.140 co zagraża stabilności wzmacniacza i jedyną metodą usunięcia wzbudzenia się końcówek mocy jest „zacieśnienie” pętli sprzężenia zwrotnego za pomocą kondensatorów o stosunkowo dużych pojemnościach. W Polsce zdobycie ścisłych odpowiedników tych tranzystorów było bardzo trudne. Ze względu na wysoki koszt sprowadzenia tych elementów z Francji zdecydowaliśmy się na zastosowanie tranzystorów o nieco mniejszym wzmocnieniu (wg danych katalogowych są to ściśle odpowiedniki), co mogło spowodować niestabilność wzmacniacza opisaną przez naszego Czytelnika.

W kolejnych seriach produkcyjnych kitów AVT - 200 mogą pojawić się tranzystory o dużym wzmocnieniu i wówczas C3 będzie niezbędny dla zapewnienia stabilności wzmacniacza.

Mamy kilka uwag dodatkowych do trzech kwestii.

1. Komentarza wymaga przede wszystkim sprawa usunięcia kondensatora C3, gdyż jest to bądź co bądź modyfikacja konstrukcji. Jest pewne, że według zamieszczonego przez nas schematu nasz licencjodawca wykonał tysiące egzemplarzy wzmacniaczy Live Sound sprzedanych dotychczas na rynku francuskim. Jednak uruchamianie nowej produkcji, nawet w oparciu o licencję, wymaga etapu „dotarcia” konstrukcji, gdyż szereg drobnych nawet zmian elementów i materiałów może prowadzić do powstania nowych zjawisk, nie występujących w modelu wzorcowym.

2. Koncepcja wzmacniacza została opracowana pod kątem pracy w przejściowej klasie AB (bardzo płytkie A), czego jednym z objawów jest duży prąd spoczynkowy i wydane grzanie się tranzystorów mocy. Nie stoi oczywiście nic na przeszkodzie żeby ten prąd zmniejszyć, należy wtedy się liczyć z nieco większym „plywaniem” wartości prądu spoczynkowego podczas głośniego słuchania muzyki. Jednak najnowsze trendy w technice audio wyznaczają powrót do klasy A lub w jej okolicy, czego przejawem jest właśnie Live Sound.

3. Wartość kondensatora C4, jak zauważył to nasz Czytelnik, znacząco wpływa na kształt charakterystyki przenoszenia wzmacniacza, ale wydaje się, że zmniejszenie jego pojemności do kilkunastu pF jest pewną przesadą - oczywiście wszelkie eksperymenty są dozwolone, ale bez żadnego problemu możliwe jest osiągnięcie deklarowanego pasma do 22kHz przy podanych wartościach elementów.

Podsumowując - dziękujemy naszemu Czytelnikowi za niezwykle pożyteczne uwagi.