



Hybrydowy wzmacniacz słuchawkowy klasy A



Wzmacniacze elektroakustyczne od lat cieszą się zainteresowaniem elektroników konstruktorów. Ze zrozumiałych względów najczęściej konstruowane są wzmacniacze mocy, którymi można zasilać kolumny głośnikowe. Nieco mniej popularne są wzmacniacze słuchawkowe, ale wciąż wielu elektroników jest zainteresowanych ich budową – tak konstrukcjami opartymi na półprzewodnikach, jak też lampowymi.

Spośród wzmacniaczy licznych klas, najwięcej wzmacniaczy audio pracuje w „klasycznej” klasie AB, która charakteryzuje się stosunkowo dużą efektywnością i niskimi zniekształceniami. Klasa A niestety charakteryzuje się niską efektywnością pracy, bowiem przez elementy stopnia mocy (lampa, tranzystor) bez względu na to, czy podawany jest sygnał, czy nie, cały czas płynie potężny prąd spoczynkowy, dając duże straty mocy. Wydzielana jest poważna ilość ciepła, którą trzeba odprowadzić na zewnątrz obudowy.

Klasa A wzmacniacza, mimo wad, cieszy się sporym zainteresowaniem wśród osłuchanych melomanów czy audiofilów ze względu na wiele zalet: łagodniejszy dźwięk, dobrą dynamikę i wierność przekazu.

Wzmacniacze słuchawkowe mają o wiele mniejszą moc niż typowy wzmacniacz audio, dzięki czemu mogą mieć prostszą konstrukcję. By zasilać typowe, 32-omowe słuchawki wystarczy wzmacniacz 100–200 miliwatowy, dzięki czemu, mimo pracy w klasie A, nie ma większych problemów z odprowadzeniem ciepła.

Jak każdy wzmacniacz, tak i wzmacniacz słuchawkowy składa się z kilku podstawowych bloków: zasilacza, układu wejścia wraz z przedwzmacniaczem oraz wzmacniacza mocy.

W bardziej rozbudowanych wzmacniaczach spotyka się także inne moduły, jak

selektor wejść, regulatory barwy dźwięku, sterowanie pilotem itp.

Wzmacniacz słuchawkowy

Wzmocnienie wzmacniacza słuchawkowego nie musi być duże – 2...5x wystarczy by zasilać słuchawki z magnetofonu czy innego źródła o niezbyt wysokim poziomie sygnału. Odtwarzacze CD czy DVD mają wysoki poziom sygnału wyjściowego (2...3V), więc możliwe jest zasilanie słuchawek wzmacniaczem o wzmocnieniu 1 (a więc bez wzmocnienia napięciowego). Właściwość tę wykorzystamy do zbudowania najprostszego wzmacniacza składającego się z jednego elementu aktywnego (tranzystora lub lampy).

W takich najprostszych wzmacniaczach, by zapewnić odpowiednią wydajność prądową i niską impedancję wyjścia, jako elementy wyjściowe stosuje się tranzystor lub lampę pracującą w układzie wtórnika. Układ wtórnika pracuje bez wzmocnienia napięciowego.

Z jednym tranzystorem

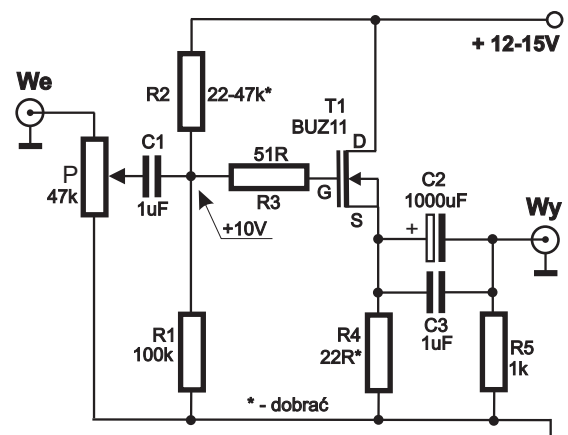
Popatrz na **rysunek 1** – schemat (jeden kanał) najprostszego wzmacniacza, zbudowany na jednym tranzystorze polowym mocy MOSFET. Można wykorzystać dowolny połowy tranzystor mocy, ale sprawdzone są tanie i łatwo dostępne tranzystory typu BUZ10, BUZ11, IRF530-540, IRF630-640. Za pomocą dzielnika napięcia składającego się z rezystorów R1 i R2 uzyskuje się właściwą polaryzację bramki G tranzystora. Napięcie polaryzacji powinno wynosić około 10V. Prąd podkładu (bias) płynący przez tranzystor ustalany jest za pomocą rezystora R4. Prąd podkładu wystarczający do zasilania popularnych

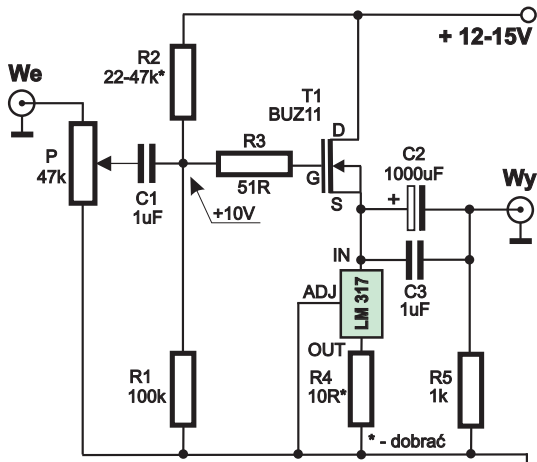
słuchawek 100mW powinien wynosić ok. 100 mA. Wartość prądu podkładu można zwiększyć np. do 150–300 mA, pamiętając jednak, że wraz ze zwiększeniem prądu, rosną straty mocy, zarówno na tranzystorze T1, jak i na rezystorze R4.

Ponieważ na rezystorze R4 będzie wydzielano się sporo ciepła, powinien on mieć moc przynajmniej 5W. Wartość rezystancji należy dobrać doświadczalnie. Zależać będzie od napięcia zasilania i od wartości prądu podkładu, który chcemy uzyskać; z reguły będzie to mniej niż 30 omów.

Zasilanie wzmacniacza napięciem stałym 12–15V jest w zupełności wystarczające. Należy je stabilizować np. za pomocą stabilizatora 7812, 7815 czy stabilizatorem regulowanym LM317 (plus dwa rezystory do ustalenia napięcia zasilającego). Oba kanały można zasilać z jednego zasilacza. Tak na tranzystorach, zarówno i na stabilizatorze należy umieścić niewielkie radiatory, np. z blaszki aluminiowej.

Rys. 1





Rys. 2

Wzmacniacz rozbudowany

Dla polepszenia parametrów wzmacniacza warto dodać w obwodzie tranzystora mocy T1 źródło prądowe, czyli po prostu stabilizator prądu. Źródło prądowe zapewnia niezmienny prąd podkładu (prąd spoczynkowy) płynący przez tranzystor, przez co jest on niezależny od temperatury pracy tranzystora, zmniejszając się także zniekształcenia nieliniowe.

Źródłem prądowym może być odpowiednio włączony stabilizator napięcia LM317 (rysunek 2). Regulacji prądu podkładu dokonujemy za pomocą rezystora R4 o wartości kilku omów. Należy go dobrać tak, by otrzymać pożądaną wartość prądu podkładu.

Wygodniejszym (niektórzy twierdzą, że lepszym) sposobem stabilizacji prądu podkładu jest użycie drugiego, identycznego jak T1, tranzystora polowego (rysunek 3). Regulacji prądu podkładu dokonuje się za pomocą zmiany napięcia polaryzacji bramki G tranzystora T2, czyli za pomocą regulacji potencjometrem P2. Ze względu na różne potencjały występujące na radiatorach tranzystorów T1 i T2 nie należy ich umieszczać na wspólnym radiatorze, chyba że zastosujemy podkładki i śruby z izolacją.

Oczywiście wzmacniacz należy zasilac napięciem stabilizowanym 12–15V.

Jak widzimy, by zbudować prosty wzmacniacz słuchawkowy, nie potrzeba wielu elementów. Taki wzmacniacz można zbudować na uniwersalnej płytce drukowanej lub nawet metodą montażu przestrzennego.

Najprostszy wzmacniacz lampowy

Podobnie jak w układach tranzystorowych, by zbudować lampowy wzmacniacz słuchawkowy, wykorzystamy układ wtórnika. Niestety, nie każda lampa nawet dużej mocy nadaje się do tych celów. Lampy zasilane są wysokim napięciem i stosunkowo niewielkim prądem, a do tego mają wysoką impedancję wyjściową. W układzie wtórnika impedancja wyjściowa lampy wynosi $1/S_a$, gdzie „ S_a ” to nachylenie charakterystyki lampy (podane w katalogu każdej lampy). Do wzmacniacza słuchawkowego nadają się więc

takie lampy, które mają spory prąd katodowy i duże nachylenie charakterystyki.

Rysunek 4 przedstawia przykładowy schemat wtórnika katodowego opartego na dwóch triodach połączonych równolegle, dzięki czemu impedancja zmniejszyła się o połowę i uzyskano większą wydajność prądową.

W tej konstrukcji wypróbowałem z dobrym skutkiem rosyjskie triody średniej mocy 6N6P (pisownia polska). Europejskim odpowiednikiem tej triody jest produkowana do dziś ECC99.

Ponieważ lampowy wzmacniacz słuchawkowy nie jest tematem tego artykułu, schemat podałem tylko przykładowo. Zainteresowanych odsyłam do Internetu, znajduje się tam wiele stron na ten temat.

Warto dodać przedwzmacniacz

Wszystkie schematy wzmacniaczy podane dotychczas miały wzmocnienie nieco mniejsze niż 1, trzeba więc je zasilac sygnałem audio o wysokiej amplitudzie. Bardziej uniwersalny jest wzmacniacz, w którym sygnał muzyczny jest wzmocniany kilkakrotnie. Dlatego do wzmacniacza mocy dodawany jest przedwzmacniacz. Wzmocnienie napięciowe 2–5x w zupełności wystarczy, bowiem słuchawki charakteryzują się dużą sprawnością (zwykle ponad 90dB) i niewielkim poziomem napięcia wzmocnionego sygnału potrzebnego do ich wysterowania.

Zainteresowanych zbudowaniem kompletnego wzmacniacza słuchawkowego opartego o polowe tranzystory mocy odsyłam do artykułu Piotra Góreckiego „Wzmacniacz słuchawkowy klasy A” z EdW 12/2000.

Hybryda lampowo-tranzystorowa

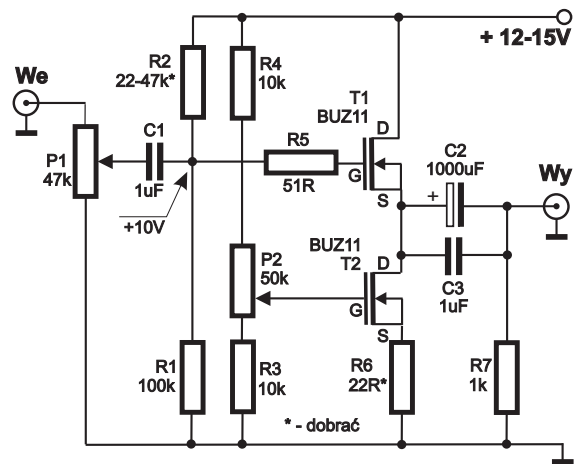
Po zbudowaniu najprostszej końcówki mocy, opartej na jednym, a potem dwóch MOSFET-ach, która doskonale radziła sobie ze słuchawkami 32-omowymi, postanowiłem sprawdzić, jak na działanie wzmacniacza wpłynie dodanie przedwzmacniacza. Ponieważ zastosowanie tranzystora jest zbyt oczywiste, postanowiłem jako przedwzmacniacz zastosować triodę. Lampy niestety wnoszą wiele ograniczeń do konstrukcji, a także często pogarszają parametry mierzone układu audio – wnoszą większe zniekształcenia, szumy, a zdarza się, że ograniczają też pasmo przenoszenia wzmacniacza. Ale mają swój urok, dają pewien charakter dźwięku, który wielu osobom się podoba. Po wykonaniu kilku próbnych układów, na rysunku 5 przedstawiam ostateczny projekt wzmacniacza. We

wzmacniaczu mocy zastosowałem polowe tranzystory mocy BUZ11, ale można użyć innych, o podobnych parametrach. W przedwzmacniaczu wykorzystałem popularną lampę – ECC8CC.

Tranzystor T1 (T1A w drugim kanale) pracuje w układzie wtórnika. Został on wstępnie spolaryzowany napięciem uzyskanym z dzielnika, który tworzą rezystory R6 i R7. W tym układzie napięcie polaryzacji bramki G tranzystorów powinno wynosić 15–16V. Do poprawy parametrów wzmacniacza zastosowałem tranzystor T2 (T2A), który pracuje jako źródło prądowe. Regulacji prądu podkładu (bias), płynącego przez końcówkę mocy, dokonujemy za pomocą potencjometru P1 (P1A).

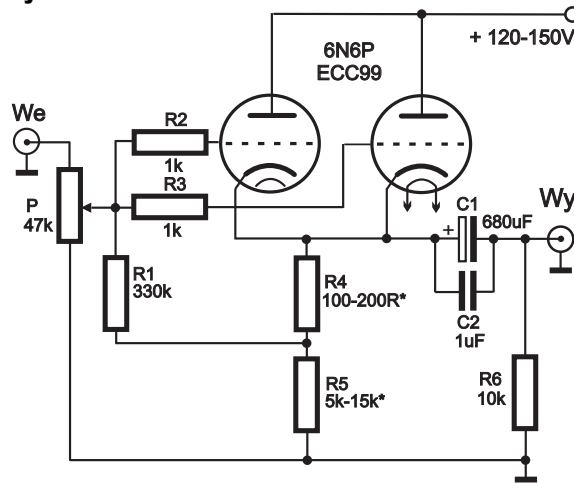
Przedwzmacniacz

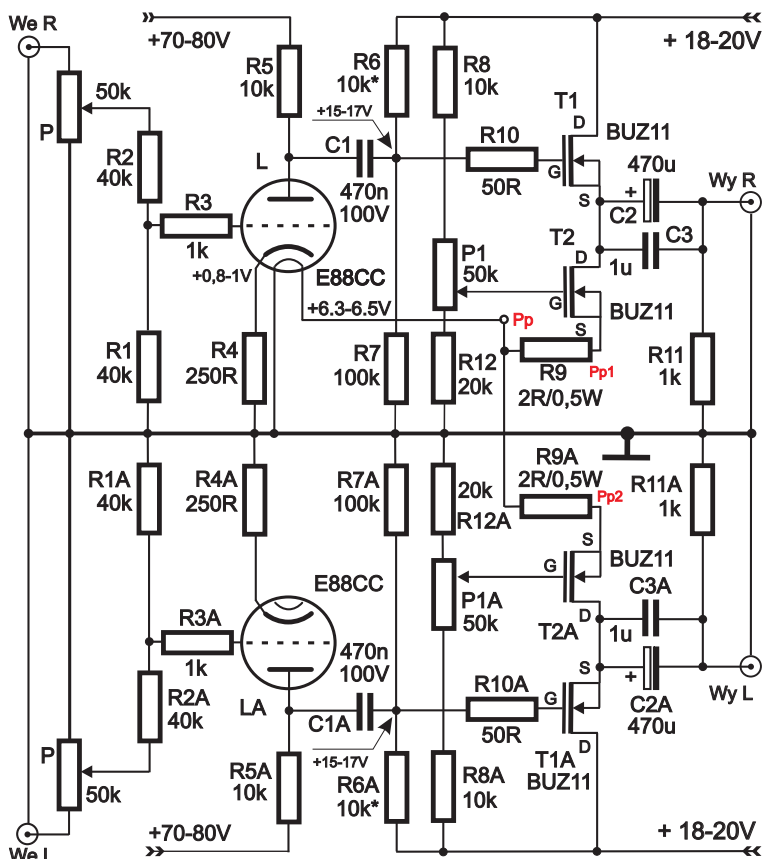
W przedwzmacniaczu zastosowałem triodę małej mocy ECC8CC. Jak widać na rysunku 6, w bańce lampy znajdują się dwie triody, więc do budowy wzmacniacza stereofonicznego wystarczy jedna lampa. Zamiennikami tej triody są 6DJ8, 6922 czy rosyjska 6N23P (pisownia polska). Oczywiście można użyć lampy ECC88, która jest bliskim odpowiednikiem ECC8CC, różni się tylko niektórymi parametrami. ECC8CC jest niskonapięciową lampą małej mocy, pierwotnie stosowaną w układach wysokiej częstotliwości. Ze



Rys. 3

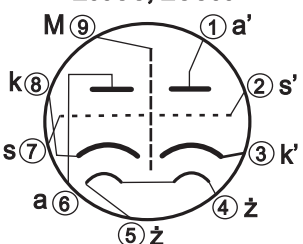
Rys. 4





Rys. 5

Rys. 6
E88CC, ECC88



względu na dobre parametry – niskie szумы, dobrą liniowość – chętnie stosowana jest w układach audio.

W tym układzie lampa pracuje w typowym układzie ze wspólną katodą, który to charakteryzuje się wysoką impedancją wejścia i stosunkowo niską impedancją wyjścia.

Układ ma dość duże wzmocnienie, zależne od typu lampy (E88CC ma teoretyczne wzmocnienie 35) i od wartości rezystora anodowego R5 (R5A). Ponieważ we wzmacniaczach słuchawkowych nie stosujemy dużych wzmocnień, wartość rezystora anodowego powinna być dość niska (10–12kΩ).

Ponieważ lampa ma zbyt duże – jak na ten wzmacniacz – wzmocnienie napięciowe, dlatego na wejściu zastosowałem dodatkowo (oprócz potencjometru P) dzielnik składający się z rezystorów R1, R2 (R1A, R2A), który obniża wartość sygnału wejściowego o połowę. Gdyby wzmocnienie w Twoim przypadku okazało się zbyt duże lub zbyt małe, można zmienić proporcję wartości tych rezystorów.

Zasilacz i zasilanie

Schemat zasilacza przedstawiony jest na rysunku 7. Zasilanie wzmacniacza, ze względu na lampę w przedwzmacniaczu,

jest nieco bardziej skomplikowane. Dla uproszczenia zasilania lampy zastosowałem takie rozwiązania, które pozwalają na zasilanie całego wzmacniacza z pojedynczego uzwojenia transformatora. Napięcie zmienne 20–24V z transformatora prostowane jest na diodzie D1 i wygładzane dwoma kondensatorami elektrolitycznymi C101 i C102. Użyłem dwa kondensatory ze względu na lepsze wygładzanie napięcia prostowanego tylko jedno-półkondensatorem diodą D1. Napięcie, po wstępnym wygładzeniu na elektrolitach C101, C102 jest powielane na

diodach D2 i D3 oraz kondensatorach C104 i C105, by po ostatecznym wygładzeniu na kondensatorach C109–110 zasilac obie triody lampy L.

Także z kondensatorów C101, C102, pobierane jest napięcie do zasilania końcówki mocy opartej na tranzystorach polowych. To napięcie zasilające może być stabilizowane stabilizatorem 7818. Ja zastosowałem stabilizator LM317, który ma lepsze parametry i łatwość regulacji napięcia wyjściowego.

Rezystory R102, R103 ustalają wartość napięcia wyjściowego. R102 ma wartość ok. 250Ω, natomiast dokładną wartość R103 należy ustalić doświadczalnie, w zależności od tego, jaka ma być wartość napięcia stabilizowanego. Wygodnie jest wlotować poten-

cjometr 5kΩ, by po ustaleniu odpowiedniego napięcia (np. 18V) zmierzyć wartość rezystancji i wlotować odpowiedni rezystor stały.

Należy pamiętać, by na wejściu (IN) stabilizatora napięcie było wyższe przynajmniej o 3–4V niż na wyjściu (OUT) po stabilizacji. Przy mniejszej różnicy napięć, w przypadku dużych spadków napięcia w sieci zasilającej, stabilizator przestaje spełniać swoją funkcję, w słuchawkach słychać głośny brum wywołany niedokładnie wygładzonym napięciem.

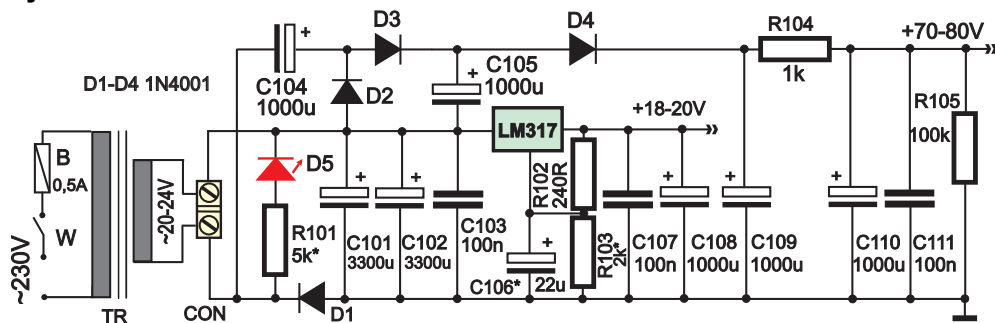
Różnica napięć może być wyższa, jednakże na stabilizatorze tracona będzie proporcjonalnie większa moc – niezbędny jest wtedy dobry radiator.

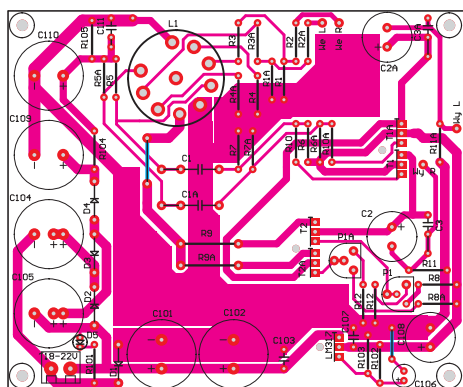
Wzmacniacz może być zasilany napięciem zmiennym 20–24V, z tym że należy pamiętać o pewnym kompromisie. Otóż zbyt niskie napięcie transformatora zasilającego da niższe napięcie anodowe, co oczywiście dla zasilania lampy nie jest korzystne. Z kolei wyższe napięcie transformatora da wprowadzić lepszą wartość napięcia anodowego do zasilania przedwzmacniacza, ale będą większe straty mocy w układzie wzmacniacza mocy – tym samym wydzieli się większa ilość ciepła na stabilizatorze.

Lampa musi być żarzona napięciem ok. 6,3V – stałym lub zmiennym. W pierwszych projektach lampę żarzyłem napięciem zmiennym z transformatora, które było redukowane do odpowiedniej wartości za pomocą rezystora redukcyjnego. Później zastosowałem inne rozwiązanie – lampa żarzona jest prądem stałym z tranzystora T2 i T2A. Pozwoliło to na pozbycie się kłopotliwego rezystora redukcyjnego i uniknięcie dodatkowych strat mocy wydzielanej na tym rezystorze. Początkowo miałem wątpliwości, czy zastosowanie takiego rozwiązania nie pogorszy parametrów wzmacniacza, ale próby praktyczne nie potwierdziły takich obaw.

Przyjęte rozwiązanie ogranicza nam jednak możliwość regulacji prądu podkładu wzmacniacza mocy, bowiem do zasilania żarzenia potrzeba napięcia 6,3V, a prąd żarzenia jest zależny od typu lampy. W przypadku E88CC prąd żarzenia wynosi ok. 300 mA, czyli w jednym kanale wzmacniacza płynie przez tranzystory T1 i T2 (T1A, T2A) prąd 150 mA. Próby praktyczne wykazały, że jest to wystarczający prąd do zasilania większości słuchawek o mocy 100 mW.

Rys. 7





Rys. 8 Skala 50%

Gdy zastosujemy lampę ECC88, prąd żarzenia będzie nieco większy – ok. 360 mA. By podnieść nieco prąd podkładu, można zwiększyć napięcie żarzenia do dopuszczalnego 6,6V.

Transformator zasilający

Transformator zasilający powinien mieć moc ok. 15VA, a uzwojenia wydajność prądową nie mniejszą niż 0,5A. Zakres napięcia zasilającego transformatora może mieścić się pomiędzy 20 a 24V (optymalne 22V).

W przedstawionym modelu użyłem transformatora TS10VA/12V, który przewinałem drutem o średnicy 0,45 mm na napięcie 24V. Pod obciążeniem napięcie spada do ok. 21–22V, i chociaż transformator po dłuższym używaniu się dość mocno grzeje, spełnia zadanie. Transformator włożyłem do przystosowanej do jego wymiarów obudowy z wtyczką (Z64), którą bez problemu można kupić w sklepie z częściami elektronicznymi. Rozwiązanie takie zwiększa bezpieczeństwo projektu, bowiem do obudowy wzmacniacza prowadzone jest niskie napięcie zasilające 20–24V. Ale uwaga – ponieważ lampa zasilana jest wysokim napięciem uzyskanym z powielacza napięcia (tutaj potrajacza napięcia), nie można do zasilania wzmacniacza używać gotowych zasilaczy prądu stałego, np. z zasilacza do telefonu komórkowego czy podobnego. Wzmacniacz musi być zasilany napięciem **zmiennym**, z transformatora. Oczywiście lepszym rozwiązaniem jest użycie transformatora o nieco większej mocy np. TS15VA/22V/0,7A.

Jeżeli zdecydujesz się na przewinięcie posiadanego transformatora tak, by uzyskać wymagane napięcie, musisz pamiętać o tym, że w transformatorach małej mocy napięcie wyjściowe spada pod obciążeniem, tym bardziej, im jest ono większe. Dlatego warto nawinać kilka dodatkowych zwojów tak, by uzyskać 1–2V więcej od wymaganego.

Jeżeli zdecydujesz się na wbudowanie transformatora do obudowy, pamiętaj o bardzo dobrej izolacji obwodu napięcia sieciowego od obudowy i innych elementów wzmacniacza.

Należy też pamiętać, że wokół transformatora istnieje zakłócające pole elektromagnetyczne, a luźno złożony rdzeń może powodować prze-

noszenie drgań mechanicznych na obudowę i wrażliwą na drgania lampę elektronową.

Montaż i uruchomienie

Przedstawiona na **rysunku 8** płytka drukowana ma wymiary 10x12 cm. Na płycie mieści się zasilacz wzmacniacza mocy oraz powielacz napięcia anodowego, lampa oraz wzmacniacz mocy. Napięcie zasilające z transformatora doprowadzamy do złącza śrubowego ARK2 na płycie drukowanej. Tranzystory oraz stabilizator chłodzone są niewielkimi radiatorami, które rozgrzewają się do temperatury 60–70°C. Żarzenie lampy także dodaje nieco ciepła, należy pamiętać o dobrej wentylacji obudowy.

Sygnał wyjściowy do stereofonicznego gniazda słuchawkowego typu jack, można prowadzić za pomocą nieco grubszych kabli ekranowanych, ale nie jest to konieczne. Wystarczy cienki kabel głośnikowy albo po prostu skrętka, czyli dwa skręcone razem przewody.

Lampy mają bardzo wysoką impedancję wejścia, są więc bardzo podatne na różne sygnały zakłócające. Sygnal muzyczny od gniazd wejściowych do potencjometru, a potem do wejścia na płytce drukowanej, prowadzimy kablem ekranowanym, chociaż sprawdza się także skrętka, a nawet wlewożyłowa taśma typu komputerowego, gdzie co druga żyła dołączona jest do masy.

W konstrukcji każdego wzmacniacza bardzo ważne jest, aby nie tworzyć pętli masy. Powstaje ona wtedy, gdy w różnych punktach masy dołączamy ekrany kabli, masy gniazd wyjściowych, wejściowych itp. Czasem pętla masy tworzy się po podłączeniu interkonektów do drugiego urządzenia (np. odtwarzacza CD). Powstają wtedy zakłócenia słyszalne jako brum sieciowy.

By uniknąć tego typu zakłóceń, stosuje się krótkie i szerokie ścieżki masy oraz jeden punkt wspólny dla mas poszczególnych stopni wzmacniacza. Ponieważ pętla może powstać także poprzez metalową obudowę, należy pamiętać o tym, by obudowę z urządzeniem łączyć tylko w jednym punkcie.

Płytke wzmacniacza proponuję umieścić w metalowej obudowie. Pozwoli to na uniknięcie wpływu zewnętrznych zakłóceń na wrażliwe obwody wejścia przedwzmacniacza. Warto, by obudowa potencjometru miała elektryczny kontakt z metalową obudową wzmacniacza.

Podczas lutowania elementów nale-

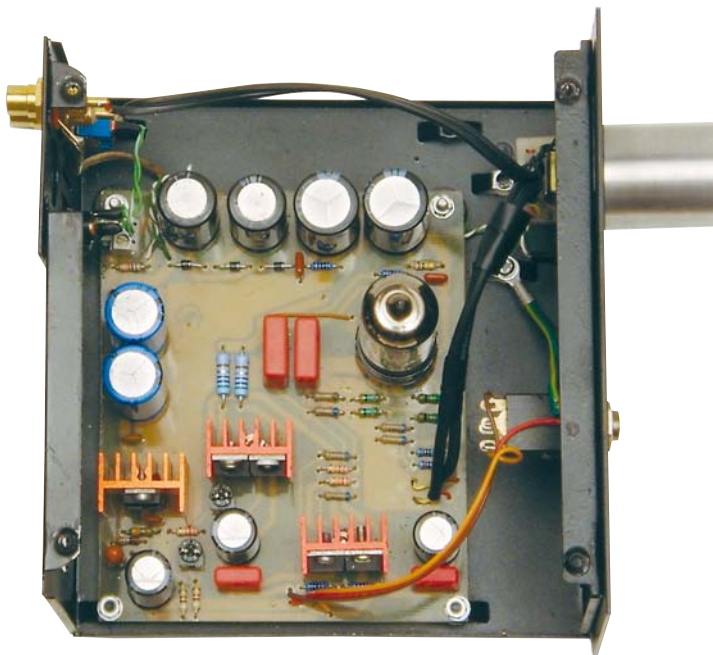
ży sprawdzić, czy montowane są zgodnie z rysunkiem płytki – dotyczy to szczególnie elektrolitów i diod prostowniczych. Podczas prób, wejście wzmacniacza zwieramy do masy, skręcając potencjometr na minimum. Jest to ważne, bowiem podczas uruchamiania i prób wzmacniacza łatwo może dojść do wzbudzenia się wzmacniacza i uszkodzenia tranzystorów. Tranzystory także łatwo uszkodzić, podając zbyt wysokie napięcie na bramki G. Zdarza się to np. podczas lutowania, gdy lutownica ma wysokie napięcie na grocie, bo nie jest właściwie uziemiona.

Pomiary

Nie wkładając jeszcze lampy, włączamy zasilanie i sprawdzamy napięcie anodowe. Powinno być w granicach 80–95V ale nie powinno przekraczać 100V. Wyższe napięcie może spowodować przebicie kondensatorów C109... C111. Napięcie stabilizowane zasilające tranzystory mocy powinno mieścić się w przedziale 18–20V, zgodnie z użytym stabilizatorem. Napięcie polaryzacji bramki tranzystorów T1 i T1A powinno mieścić się w granicach 15–16V i powinno być jednakowe w obu kanałach.

Po pomiarach wkładamy lampę. Mierzmy napięcie żarzenia lampy (punkt pomiarowy Pp). Jeżeli się różni odżądanego 6,36,6V, doprowadzamy do właściwego poziomu:

- za pomocą potencjometrów P1 (jeden kanał) i P1A (drugi kanał) wstępnie ustalimy napięcie tak, by w punktach Pp1 i Pp2 było ok. 7–7,2V,
- mierzymy napięcie w punkcie Pp. W tym właśnie punkcie napięcie jest właściwym napięciem żarzenia lampy (6,3V),
- jeżeli napięcie punkcie Pp jest inne niż żądane 6,3V, kręcąc potencjometrami P1 i P1A, zwiększamy/zmniejszamy napięcie tak, by uzyskać zbliżone do 6,3V,
- sprawdzamy punkty pomiarowe Pp1 i Pp2, czy napięcia w tych punktach są



JENAKOWE, co oznacza, że prądy podkładu w kanale lewym i prawym wzmacniacza mocy są też jednakowe.

Będzie to proste, jeżeli zrozumiesz ideę punktów pomiarowych Pp oraz Pp1 i Pp2. Spróbuję to wyjaśnić: Wartość napięcia w punkcie Pp ma być zbliżona do 6,3V. Z kolei napięcie w punktach pomiarowych Pp1 i Pp2 będzie wyższe od żadanego 6,3V o spadek napięcia na rezystorach R9 i R9A. Nie jest istotne, o ile napięcie będzie wyższe, istotne jest, by napięcie w tych punktach (Pp1, Pp2) było **jednakowe** – świadczyć to będzie o tym, że w obu kanałach płynie jednakowy prąd podkładu.

Rezystory R9 i R9A pełnią tutaj funkcję wyłącznie rezystorów pomiarowych, potrzebnych do ustalenia jednakowej wartości prądu podkładu w obu kanałach wzmacniacza mocy. Dlatego ważne jest, by oba miały jednakową wartość (najlepiej z tolerancją 1%), bo od tego zależy dokładność pomiaru.

Sprawdzamy jeszcze spadek napięcia na rezystorach katodowych triod R4, R4A – powinien być nieco niższy niż 1V i w obu kanałach zbliżony. Niewielka różnica wartości napięcia pomiędzy kanałami wynika z różnych parametrów triod. Niestety, lampy nie słyną z powtarzalności parametrów, ale kilka procent różnicy nie jest istotne dla jakości dźwięku. Ale zbyt duża różnica świadczy albo o uszkodzeniu lampy, albo o niewłaściwym montażu elementów.

Jeżeli masz dostęp do generatora i oscyloskopu, warto pomierzyć parametry wzmacniacza.

Radiatory

Tranzystory T1 i T1A przykręcone są bezpośrednio do radiatora, ponieważ na obu tranzystorach jest jednakowy potencjał. Tranzystory należy posmarować pastą silikonową w celu lepszego przekazywania ciepła do radiatora.

Tranzystory T2 i T2A **koniecznie** należy odizolować od siebie, ponieważ mają różny potencjał. Jeżeli nie mamy podkładek i wkrętów z izolacją, można dać dwa oddzielne radiatory.

Radiatory dość mocno się grzeją, ale nadmierne grzanie może świadczyć o tym, że radiatory są zbyt małe. Temperatura radiatorów 60–70°C jest całkowicie dopuszczalna. Ze względu na sporą ilość wydzielanego ciepła, należy pamiętać o dobrej wentylacji obudowy.

Modyfikacje

Wykonałem kilka różnych wersji wzmacniacza, modyfikując go w większym lub mniejszym stopniu. Największym problemem było takie poprowadzenie masy, by w słuchawkach nie słychać było brumów i zakłóceń. W tym wzmacniaczu masa prowadzona jest zgodnie z ideą punktu wspólnego.

By uniknąć szkodliwych sprzężeń i wpływu zewnętrznych zakłóceń, wzmacniacz należy umieścić w metalowej obudowie.

Na dźwięk uzyskany w słuchawkach wpływ mają elementy elektroniczne użyte do budowy. Oprócz tranzystorów i lampy, na jakość



dźwięku mają wpływ elementy bierne – tutaj kondensatory znajdujące się w torze audio. Możesz poeksperymentować, zmieniając typy kondensatorów, zarówno elektrolitów, jak i kondensatorów stałych. Ważną rolę spełniają kondensatory sprzęgające C1, C1A. Ich pojemność powinna być w miarę duża, by wzmacniacz przerosł dobrze niskie częstotliwości. Ale z kolei próby praktyczne i pomiary oscyloskopem wykazały, że zbyt duża pojemność nie jest korzystna – wyraźnie widać, jak zwiększają się zniekształcenia sygnału. Dzieje się tak już przy pojemności 1µF.

Przeglądając grupy dyskusyjne poświęcone konstrukcjom lampowym, często spotyka się opinie, że jakość kondensatora sprzęgającego ma duże znaczenie dla uzyskania dobrych parametrów sonicznych wzmacniacza. Masz więc tutaj spore pole do eksperymentów.

By wzmacniacz przerosł niskie częstotliwości bez strat, pojemność kondensatorów sprzęgających i wyjściowych elektrolitów, powinna być odpowiednio duża. Minimalną pojemność kondensatora wyjściowego (tutaj C2, C2A) można obliczyć ze wzoru: $C[\mu F]=1000 \cdot 000/6,28 \cdot x \cdot 16 \text{ (Hz)} \cdot x \cdot R_s \text{ [omy]}$, gdzie R_s to impedancja obciążenia (tutaj słuchawek). Jak wynika ze wzoru, pojemność kondensatora zależy od przyjętej przez nas najniższej częstotliwości przenoszenia i od impedancji słuchawek. Wyższa impedancja słuchawek, lub przyjęta przez nas wyższa częstotliwość graniczna (dolna), pozwala na zastosowanie kondensatora o mniejszej pojemności. Natomiast górna częstotliwość zależy od użytych elementów (lampa, kondensatory) oraz od pojemności montażowych.

Zbocznikowanie elektrolitów wyjściowych C2, C2A kondensatorami stałymi o pojemności ok. 1µF (C3, C3A) poprawia nieco pracę wzmacniacza w zakresie wyższych częstotliwości.

By zasilac anody lampy, potrzeba wyższych napięć. Dla uzyskania dobrych parametrów wzmacniacza należy zasilac ją w miarę wysokim napięciem, zbliżonym do nominalnego. Dla ECC88 (E88CC) typowe napięcie anodowe to 90V na anodzie lampy. W pierwszych wersjach w powielaczu napięcia użyłem zwykłych kondensatorów elektrolitycznych (C101...C107) oraz zwykłych

Wykaz elementów

Zasilacz

Rezystory

R101	5-7kΩ (dobrac, by uzyskac odpowiednia jasnosć swiecenia LED)
R102	240Ω
R103	2-3kΩ (dobrac, by uzyskac odpowiednie napiecie stabilizowane)
R104	1kΩ
R105	100k

Kondensatory

C101,C102	2200-3300µF/35V
C103,C107	100nF/63V
C104,C105	1000µF/63V
C106	22µF/25V
C108	470-1000µF/25V
C109,C110	1000µF/100V
C111	100nF/100V

Półprzewodniki

D1-D4	1N4001
D5	dowolna dioda LED
	Stabilizator LM317

Pozostałe

TR	transformator sieciowy 15VA, 230/22V, 0,5-0,8A,
W	wyłącznik sieciowy
B	bezpiecznik 0,5A
CON	zacisk śrubowy do druku (np. ARK)

Wzmacniacz

Rezystory

R1,R1A, R2,R2A	40kΩ
R3,R3A,R11,R11A	1kΩ
R4,R4A	250-300Ω
R5,R5A	10-12kΩ
R6,R6A	10-20kΩ (dobrac, by uzyskac odpowiednie napiecie polaryzacji)

R7,R7A	100kΩ
R8,R8A	10kΩ
R12,R12A	20kΩ
R9,R9A	2-5Ω/0,5W 1%,
R10,R10A	50-100Ω
P	50kΩ potencjometr stereo
P1,P1A	50kΩ miniaturowy potencjometr montazowy

Kondensatory

C1,C1A	470nF/100V foliowy MKT
C2,C2A	470-1000µF/25V
C3,C3A	1µF/63V foliowy
T1,T2,T1A,T2A	BUZ11, BUZ 10, IRF 530-540, IRF 630-640 lub podobny

Pozostałe

L1	trioda E88CC, ECC88 lub odpowiednik
----	-------------------------------------

Jeżeli nie podano inaczej, wszystkie rezystory 0,25W. Jeżeli nie dysponujemy rezystorami o tolerancji wartości 1%, należy dobierać jednakową wartość parami dla obu kanałów.

Płytką drukowaną jest dostępna w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-2928.

diod prostowniczych (D1–D4). Po zmianie na kondensatory o niskiej impedancji (LOW ESR) oraz zastosowaniu diod Schottky’ego, które mają niskie napięcie progowe (0,2V, w porównaniu do 0,6–0,8V diody prostowniczej) napięcie anodowe podniosło się o kilka woltów przy tym samym napięciu z transformatora zasilającego.

Obecnie przy zasilaniu z transformatora napięciem 22V, napięcie zasilające po powiehleniu wynosi w biegu jałowym (bez pracy lampy) 90V, po rozgrzaniu lampy spada do 70–75V w zależności od obciążenia.

Możesz poeksperymentować, stosując inne lampy niż E88CC (ECC88), sprawdzając wcześniej ich karty katalogowe pod względem parametrów pracy. Triody małej mocy pracują z różnymi napięciami anodowymi, mają też różne napięcia zarzenia (jak ECC81, 82, 83) lub zupełnie inny rozkład wyprowadzeń (rosyjska 6N3P).

Bezpieczeństwo

We wzmacniaczu występują wysokie napięcia. Dlatego zarówno podczas projektowania,

jak i budowy urządzenia musimy zachować pewne procedury, które zapewnią bezpieczeństwo nie tylko podczas prób i testów, ale i podczas jego późniejszego użytkowania. Największe zagrożenie niesie obwód zasilania prądem sieciowym. Dlatego przewody zasilające, transformator, gniazda, wyłączniki itp. powinny być dobrej jakości, dostosowane do pracy przy napięciu 230V (dobrze, gdy mają znak CE). Miejsca połączeń powinny być dokładnie izolowane. Najlepiej, jeżeli zasilanie sieciowe tworzy oddzielny, odpowiednio izolowany obwód, oddalony od pozostałych elementów układu. Montaż i wszelkie przeróbki wykonujemy ZAWSZE po wyjęciu wtyczki z gniazdka sieciowego.

Dotknięcie urządzenia pod wysokim nawet napięciem nie jest groźne pod jednym warunkiem - nie będzie przepływu prądu. Stąd doświadczeni elektronicy tak pracują z urządzeniami pod napięciem, by ciało nie tworzyło obwodu zamkniętego. Jednym słowem, pracują „z jedną ręką w kieszeni”.

Przed uruchomieniem urządzenia należy sprawdzić prawidłowość lutowania

elementów, a szczególnie kondensatorów elektrolitycznych (plus do plusa, minus do minusa). Odwrotne wlutowanie kończy się najczęściej wybuchem kondensatora. Urządzeń nieprzetestowanych w dłuższym okresie nie należy pozostawiać włączonych bez opieki. Metalowa obudowa urządzenia powinna być uziemiona, kabel zasilający i gniazdko sieciowe powinny mieć sprawny obwód uziemienia.

Stanisław Chrzęszcz
audioton@poczta.onet.pl

Bądź ostrożny! We wzmacniaczu występują wysokie napięcia. Wszelkich regulacji dokonuj przy wyłączonym zasilaniu i po rozładowaniu kondensatorów wysokonapięciowych. Lampa i tranzystory rozgrzewają się do wysokiej temperatury. Łatwo o poparzenie. Nieletni i niedoświadczeni elektronicy mogą wykonać i uruchomić układ wyłącznie pod kierunkiem wykwalifikowanego opiekuna, na przykład nauczyciela!