

Alexander Amplifier, czyli stałoprądowy wzmacniacz słuchawkowy



Wzmacniacz „napędzający” słuchawki, funkcjonujący jako niezależne urządzenie lub jako moduł do wbudowania, zwiększa walor użytkowy i stanowi cenne uzupełnienie posiadanej aparatury audio.

Większość popularnych zestawów audio umożliwia dołączenie doń słuchawek elektrodynamicznych. Często realizacja wyjścia słuchawkowego sprowadza się do włączenia rezystorów mocy między końcówkę mocy a gniazdo słuchawkowe, co nie jest rozwiązaniem optymalnym, ponieważ parametry wzmacniaczy o mocach powyżej kilku watów optymalizowane są do sterowania zestawami głośnikowymi. Końcówka mocy współpracując ze słuchawkami za pośrednictwem szeregowych rezystorów pracuje zwykle ze zredukowaną mocą, co pogarsza parametry dynamiczne i szumowe. Poprawę parametrów można uzyskać wzmacniając sygnał liniowy dedykowanym wzmacniaczem słuchawkowym. Na łamach czasopism elektronicznych dość często publikowane są opisy wzmacniaczy słuchawkowych. Mnogość rozwiązań rozciąga się od prostych do bardziej skomplikowanych. Od układów opartych na elementach dyskretnych, lampach, specjalizowanych układach scalonych, układów powalających pomysłową prostotą i innych dziwolągów w postaci „diamentowych tranzystorów”, do wzmacniaczy mających integrator kasujący składową stałą na wyjściu, gdy nie występuje kondensator (kondensatory) wyjściowy itp. Z doświadczenia wiem, że nie istnieje rozwiązanie idealne,

choć rozwiązanie wzmacniacz operacyjny plus wtórnik tranzystorowy wydaje mi się najbardziej „słuszne”. Może warto rozważenia są najprostsze wzmacniacze pracujące w klasie A (tranzystor, źródło prądowe). Przy mocy maksymalnej wyrażanej w mW koszarne straty cieplne, tj. mała sprawność jest do zaakceptowania. Czy do „napędzania” słuchawek warto stosować specjalizowane układy scalone, nie tracąc na jakości? To pytanie bez odpowiedzi...

Jakaś część użytkowników ma „uczulenie na wszystko, co scalone”. Na pewno brakuje wiarygodnego i rzetelnego artykułu (cyklu), prezentującego rozwiązania (różne topologie) wzmacniaczy słuchawkowych z informacjami, co w danej topologii jest zaletą, a co wadą, oraz prezentującego nie tyle rozwiązania mechaniczne słuchawek, co ich cechy czy parametry, jakie warto brać pod uwagę przy ich zakupie. Ale wiadomo, że w dziedzinie audio wiele zależy od subiektywnych odczuć i trudno o 100-procentowo pewne opinie czy stwierdzenia.

Ja uważam, że decydującym kryterium decydującym o zakupie jest odsłuch. Dobrze byłoby, by był to odsłuch podbudowany „teorią” z takiego właśnie artykułu. Słuchawki elektrodynamiczne mimo zasady działania identycznej jak głośnik pracują w innych warunkach (przy mniejszych napięciach, natężeniach prądu). Inne są zatem wymagania co do wzmacniacza i nie jest to tylko problem skali. Inaczej odczuwa się szum z oddalonego głośnika, a inaczej ze słuchawki przy uchu. Rodzaj obudowy słuchawki ma także istotne znaczenie. Czy słuchawki elektrostacyjne można

potraktować tylko jako kosztowną ciekawostkę? Słuchawki trzeba jakoś napędzać, a często spotykane rozwiązanie, polegające na dołączeniu ich do kilku- czy kilkunastowatowej końcówki mocy (przez rezystory) przeznaczonej do „sterowania” głośników, wydaje się mało optymalne i niecelowe.

W moim wzmacniaczu zastosowałem nietypową, nieczęsto spotykaną topologię. Subiektywnie na ucho odczuwa się, że osiągnięte parametry są dobre (może dlatego, że w konstrukcję wzmacniacza włożyłem dużo serca). Mam niezbyt duże doświadczenie w budowaniu układów audio, choć dobrze radzę sobie ze wzmacniaczami operacyjnymi i wzmacniaczami mocy opartymi na układach scalonych. Budowa „słuchawkowca” była dla mnie lekcją, z której dużo się nauczyłem. Zniekształceń nieliniowych wzmacniacza nie mierzyłem, ponieważ zintegrowana karta dźwiękowa mojego komputera nie dałaby miarodajnych wyników. Zdaję sobie sprawę, że rozróżnienie na ucho zawartości harmonicznych 0,01%..0,1% nawet dla zdrowego człowieka jest zupełnie niewykonalne. Zwykle ich zawartość podawana przez producentów sprzętu jest jedynie czynnikiem „marketingowym”, zresztą powszechnie chwalone wzmacniacze lampowe mają zaskakująco duże zniekształcenia. Pasma przenoszenia mojego wzmacniacza mogłoby być znacznie mniejsze. W tym przypadku wyszedłem z założenia, że stosując wzmacniacz operacyjny z górnej półki (wiem, że są jeszcze szybsze np. ze sprzężeniem prądowym, tyle że albo kosztowne lub nieosiągalne i chyba ich użycie byłoby niecelowe w takim układzie), należy wykorzystać jego mocne strony tj. szybkość narastania napięcia wyjściowego (SR) do uzyskania dobrej odpowiedzi impulsowej. To w praktyce sprowadziło się do ograniczenia pasma



od góry tak, by sygnał prostokątny nie powodował oscylacji przy osiągnięciu wartości szczytowych (aby nie było podbicia na krańcu pasma). Co do stałoprądowego toru sygnałowego, to powiedzmy, że taki jest mój kaprys. Jednak powszechnie wiadomo, że wzmacniacze i przedwzmacniacze stałoprądowe cieszą się zainteresowaniem wielu audiofilów. Zastosowanie kondensatorów wejściowych i wyjściowych, odcinających składową stałą, nie miałyby istotnego, zauważalnego wpływu, prócz zawężenia pasma od dołu, nierejestrowanego na nośnikach audio. Zastosowanie kondensatorów zwolniłoby także od dbałości o jak najmniejszą składową stałą na wyjściu – cóż, przyjmijmy, że jest to kaprys amatora konstruktora. Jednak w przypadku zastosowania kondensatorów elektrolitycznych pojawiłby się problem z ich polaryzacją przy zasilaniu symetrycznym. Być może eksperci stwierdzą, że mój wzmacniacz „wyszedł” zwyczajny, ale mam satysfakcję że to mój wzmacniacz i jego budowa była dla mnie kolejną porcją praktycznych doświadczeń.

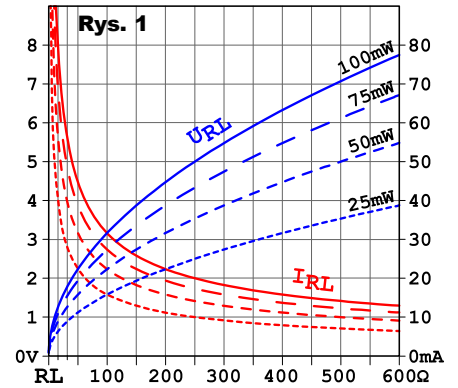
Wzmocnienie napięciowe, choć niekonieczne dla słuchawek niskoimpedancyjnych, w prezentowanym układzie jest zapewnione (6,8x≈16dB) i to nie tylko z powodu zagwarantowania wystawienia słuchawkom wysokoimpedancyjnym, ale też z przyczyn związanych z zastosowaniem szybkiego OP37, który nie może pracować przy wzmocnieniu równym jedności. Parametry szumowe, w szczególności stosunek sygnał/szum też nie był mierzony, ale znowu na ucho wydaje się bardzo dobry, choć przypuszczam, że to zasługa wzmacniacza OP37 i odpowiednio małych wartości rezystorów polaryzujących jego wejścia. „Wysilając” słuch, można usłyszeć szum potencjometru regulacji głośności przy zmianie położenia jego suwaka na węglowej ścieżce, ale tylko przy braku dołączonego sygnału, w czasie trwania ciszy. Potencjometr, ten „element standardowy”, jest najsłabszym ogniwem w układzie. Po wymianie poten-

cyjometru na taki z wyższej półki i ewentualnie mniejszej rezystancji, efekt ten powinien wyraźnie osłabnąć.

Ale w praktyce regulację głośności przeprowadza się przy dołączonym sygnale audio, który całkowicie maskuje takie delikatne szumy. Ponadto proponowany układ to końcówka mocy i ważne jest, by jak najmniej szumiące było dołączone do niej źródło sygnału (ewentualnie pierwszy stopień przedwzmacniacza). W każdym razie niski poziom szumów w „słuchawkowcu” jest istotniejszy niż we wzmacniaczu głośnikowym.

Stosunkowo niska impedancja wejściowa wzmacniacza podyktowana jest tym, by do niesymetrycznego bądź co bądź wejścia toru sygnałowego nie przedstawiał się brum sieciowy przy niepodłączonych kablach RCA. Przy włączaniu wzmacniacza słychać cichutkie „pyk”, a przy wyłączeniu sygnał się wycisza i gdy już nie jest słyszalny (po ok. 5s od wyłączenia z sieci energetycznej) słychać cichsze „pyk”. Zjawiska te nie są uciążliwe dla słuchacza (choć bardziej istotne jest, że nie są „uciążliwe” dla przetworników w słuchawkach). Dlatego też nie przewidziałem – nie było potrzeby zastosowania – dodatkowego układu opóźnionego dołączania słuchawek do wejścia wzmacniacza przy włączaniu i natychmiastowego ich odłączania przy wyłączeniu zasilania. Zastosowanie nawet prostego układu sterującego przekażnikiem z napięcia AC transformatora byłoby chyba przerostem formy nad treścią.

Zdecydowałem się na zastosowanie często spotykanego we wzmacniaczach słuchawkowych rozwiązania, tj. słuchawki dołączone są przez szeregowe rezystory, które pełnią funkcję zabezpieczenia przeciwzwarceniowego i „wyrównania” mocy dla różnych słuchawek w szerokim zakresie ich impedancji znamionowej. Jaki wpływ mają na brzmienie, tego nie jestem w stanie rozstrzygnąć. Audiofilskie „mity” o lepszym brzmieniu takiego rozwiązania jakoś mnie nie przekonują, ponieważ zdrowy rozum podpowiada, że nie polepsza to właściwości wzmacniacza (rezystory te nie są objęte pętlą sprzężenia zwrotnego) i zwiększają rezystancję wyjściową wzmacniacza, która według

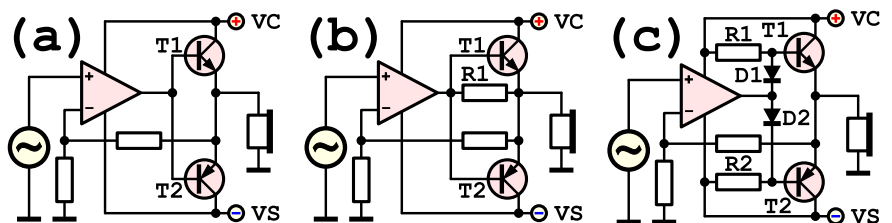


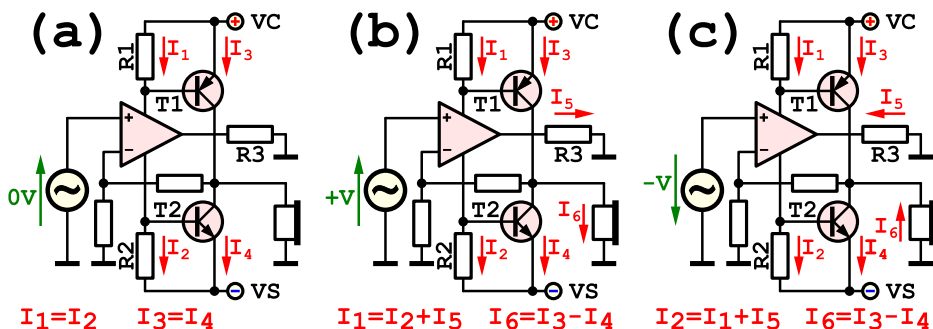
być jak najmniejsza. Z drugiej strony mają na pewno wpływ na właściwości wzmacniacza i jego dynamiczną współpracę ze skomplikowanym układem RLC, jakim są przetworniki słuchawek.

Wzmacniacz słuchawkowy powinien zapewnić poprawne wystawienie słuchawek, tj. zapewnić dynamikę odsłuchiwanej audycji (dla zakresu spotykanych impedancji znamionowych słuchawek). Na rysunku 1 widać amplitudy napięcia i prądu na słuchawce (przetworniku) potrzebne do uzyskania stałej mocy szczytowej (linie ciągłe dla stosunkowo dużej mocy 100mW), zależnie od jej impedancji znamionowej. Przy wyższych impedancjach słuchawek amplitudy napięcia i prądu można zasadniczo uzyskać wprost z wyjść większości popularnych wzmacniaczy operacyjnych. Przy dołączeniu słuchawek „niskoomowych” potrzebna amplituda napięcia ulega zmniejszeniu i wymagane jest zapewnienie większej amplitudy prądu, znacznie przekraczającej wydajność prądową wyjść popularnych wzmacniaczy operacyjnych. Wzmacniacz oprócz zapewnienia napięć umożliwiających wystawienie słuchawek „wysokoomowych” powinien również mieć odpowiednią wydajność prądową dla wystawiania słuchawek „niskoomowych”. Wyłączając stosowanie specjalizowanych układów scalonych, najprostszym sposobem na spełnienie tych wymagań jest użycie wzmacniacza operacyjnego, zapewniającego wzmocnienie napięciowe do sterowania wtórniakiem, buforem tranzystorowym zapewniającym potrzebny prąd. Najczęściej spotykane topologie wzmacniaczy słuchawkowych przedstawia rysunek 2. Typ najprostsz



Rys. 2





audio ze względu na nieakceptowalne zniekształcenia spowodowane nieprzewodzeniem tranzystorów przy małych sygnałach. W uproszczeniu: silne sprzężenie zwrotne jest w stanie zredukować zniekształcenia, lecz wymagane do tego jest znaczny iloczyn pasma i wzmocnienia GBW oraz duża szybkość narastania napięcia wyjściowego SR wzmacniacza. Lepsza jest topologia (b), która ze względu na prostotę jest często spotykana w mniej wymagających zastosowaniach. Przy małych sygnałach prąd obciążenia zapewnia wzmacniacz operacyjny, a gdy sygnał ma większy poziom, wtedy na R1 powstaje spadek napięcia otwierający tranzystory wtórnika, które zaczynają dostarczać prąd do obciążenia. Najlepsze rezultaty zapewnia wzmacniacz (c), gdzie wstępnie spolaryzowane tranzystory końcowe zapewniają przepływ określonego prądu spoczynkowego. Różnie mogą wyglądać obwody ich polaryzacji, na przykład można zastosować źródła prądowe zamiast rezystorów R1, R2, a zamiast diod D1, D2 obwód polaryzujący z „potencjometrycznym tranzystorem”. Niemniej wadą tej topologii jest moc strat ciepłych w spoczynku przy ustawionych relatywnie dużych prądach

spoczynkowych. Opisana Rys. 3 w następnym śródtytułe koncepcja układowa prezentowanego wzmacniacza jest inna i bazuje na układzie nazywanym po angielsku Alexander Amplifier (od nazwiska twórcy). Podział urządzenia na trzy płytki drukowane, tj. płytkę wzmacniacza, zasilacza i wskaźnika przesterowania, umożliwia budowę niezależnego urządzenia lub wbudowanie samego wzmacniacza do posiadanego sprzętu audio. Wzmacniacz ma stałoprądowy tor sygnałowy. Oznacza to, że pasmo przenoszenia zaczyna się od zera – brak kondensatorów odcinających składowe stałe na wejściach i wyjściach. Nadmiar mocy, na który składa się wydajność prądowa i wzmocnienie napięciowe przy zasilaniu symetrycznym $\pm 15V$, sprawia, że wzmacniacz jest w stanie wysterować nawet „toporne” słuchawki o małej skuteczności.

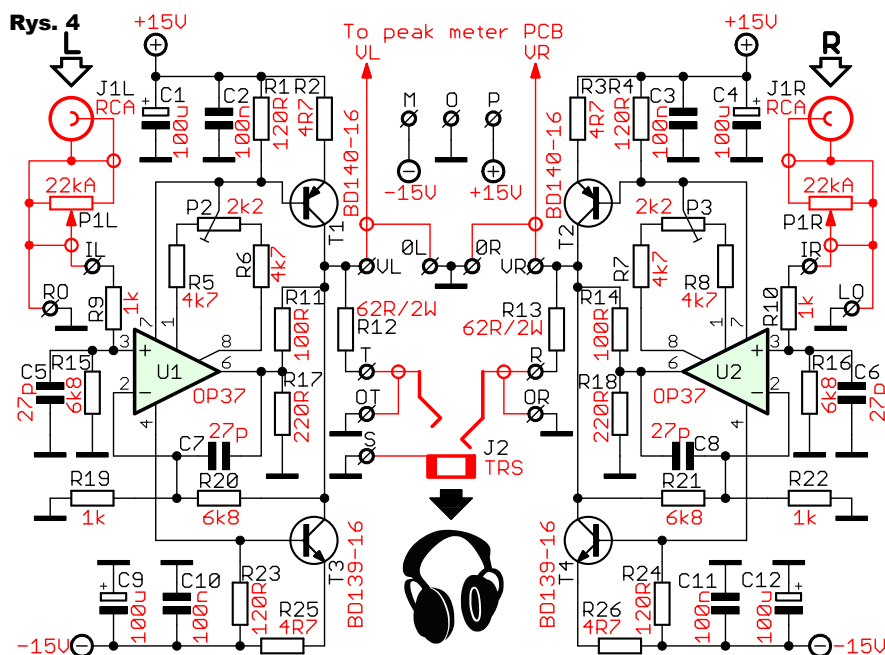
Opis układu

Zasada działania wzmacniacza przedstawiona jest na rysunku 3. Można tu zauważyć nietypowe sterowanie tranzystorami końcowymi. W spoczynku (a), gdy wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego jest na potencjale masy,



spoczynkowy prąd zasilania wzmacniacza operacyjnego ($I_1=I_2$), przepływając przez odpowiednio dobrane rezystory R1 i R2, powoduje powstanie na nich spadku napięcia, skutkując częściowym otwarciem tranzystorów T1, T2 i przepływem niewielkiego prądu spoczynkowego ($I_3=I_4$). Dzielnik pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego sprawia, że wzmacniacz pracuje w konfiguracji nieodwracającej, gdzie „stara” się utrzymać napięcie na wejściu odwracającym równe napięciu na wejściu nieodwracającym, czyli napięciu sygnału wejściowego. Brak różnicy potencjałów na wyprowadzeniach słuchawki oznacza brak przepływu prądu. W przypadku pojawienia się dodatniego napięcia wejściowego (b) z wyjścia dążącego do równowagi wzmacniacza operacyjnego znacznie wypływać prąd I_5 , zwiększając o swą wartość prąd I_1 , co powoduje zwiększenie spadku napięcia na R1. Większe napięcie na R1 oznacza większe otwarcie T1. Wzrost wartości prądu I_3 przy niezmiennym prądzie I_4 umożliwia powstanie wyższego potencjału na kolektorach T1 i T2 i przepływ prądu I_6 przez obciążenie. Dla ujemnego napięcia wejściowego (c) sytuacja jest odwrotna, tj. prąd I_5 wpływa do wzmacniacza i zwiększa o swą wartość prąd I_2 , zwiększając spadek napięcia na R2, co oznacza większe otwarcie T2 i przepływ prądu I_6 przez przetwornik w drugą stronę. Nietypowe sterowanie tranzystorów wyjściowych ma na celu w głównej mierze zmniejszenie mocy strat wzmacniacza zamienianej na ciepło, gdy jest on w spoczynku.

Rysunek 4 przedstawia schemat ideowy wzmacniacza. Wizualną analizę zasady działania wzmacniacza ułatwia rysunek 5, gdzie widoczne są przebiegi w jego kluczowych punktach (analiza przy obciążeniu 16Ω i 600Ω). Wykresy (a) dotyczą



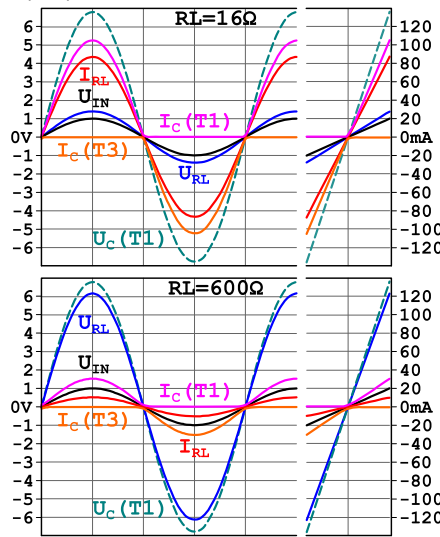
rezystorów „spadkowych” R17 i R18 o wartościach 120Ω, które dają prąd spoczynkowy 2mA. W prototypie zdecydowano się jednak na pracę z większym prądem spoczynkowym, około 20mA, wyznaczonym wartością 180Ω rezystorów „spadkowych”, co pokazują wykresy (b).

Decydujący wpływ na redukcję zniekształceń nieliniowych do akceptowalnego poziomu ma silna pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego redukująca wzmocnienie napięciowe wzmacniacza, przy sporym iloczynnie wzmocnienia i pasma przenoszenia wzmacniacza operacyjnego GBW=63MHz. Oba kanały wzmacniacza mają niezależne odprężenie szyn zasilania kondensatorami C1...C4, C9...C12. Ponieważ oba kanały są identyczne, poniższy opis dotyczy jednego z nich. Wybór typu wzmacniacza operacyjnego U1 (OP37) sterującego buforem prądowym T1, T3 podyktowany jest małym dryfem temperaturowym napięcia niezrównoważenia, co jest istotne w stałoprądowym torze sygnałowym. Duża wartość GBW, zapewniająca nadmiar wzmocnienia, wymagana do redukcji zniekształceń przez pętlę sprzężenia zwrotnego (szerokość pasma przenoszenia przy ustalonym wzmocnieniu). Mniejsze znaczenie ma jego optymalizacja szumowa do zastosowań audio przy współpracy z źródłami sygnału o rezystancji w zakresie od 500Ω do kilkudziesięciu kΩ. Ze względów „szumowych” popularna kostka TL071 równie dobrze sprawdziłaby się w układzie, jednak jej GBW i szybkość narastania napięcia wyjściowego (SR) zdecydowanie przemawia na jej niekorzyść w stosunku do OP37. Zastosowanie OP37 korzystnie przekłada się na szybkość wzmacniacza, a tym samym na jego odpowiadając impulsową.

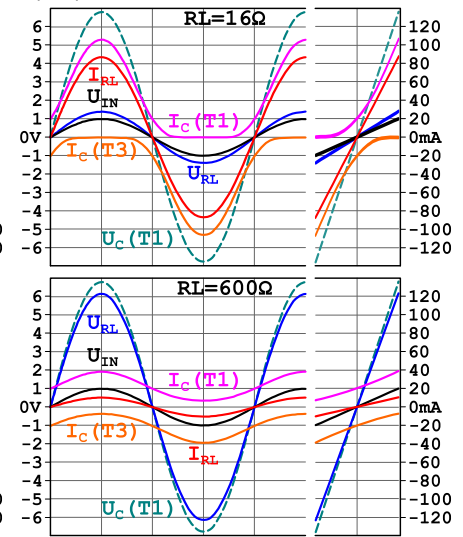
Liniowy sygnał audio ze źródła dołączanego do gniazda J1L (RCA) trafia na tłumiący potencjometr regulacji głośności P1. Dzięki dołączeniu szeregowo połączonych R9, R15 między suwak P1 (o charakterystyce liniowej) a masę regulacja głośności jest nieliniowa i zbliżona do stosowanej w takich zastosowaniach charakterystyki typu B. Rezystor R15 polaryzuje wejście nieodwracające U1, a R9 z C5 tworzą filtr tłumiący składowe sygnału o częstotliwościach radiowych, mogące indukować się w kablach przyłączeniowych. Dzielnik R19, R20 stałoprądowej pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego wyznacza wzmocnienie napięciowe ($K=R20/R19+1$) równe 7,8x. Ponieważ sygnały wejściowe są osłabiane dzielnikiem R9, R15 sumaryczne wzmocnienie napięciowe wzmacniacza wynosi 6,8x ($\approx 16\text{dB}$).

Wyjście wzmacniacza ma charakter źródła prądowego, więc konieczne jest

(a) $R_1, R_2=120\Omega$



(b) $R_1, R_2=180\Omega$

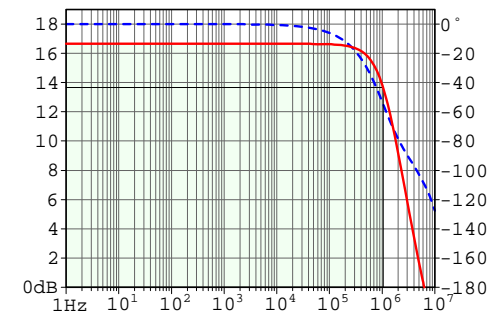


Rys. 5

sprężenie stałoprądowe między wyjściem U1 i wyjściem wzmacniacza. Jest ono realizowane za pomocą rezystora R11, bez którego układ stałby się generatorem pracującym w zakresie częstotliwości ponadakustycznych. Kondensator C7 ogranicza pasmo przenoszenia i wyrównuje charakterystykę w zakresie częstotliwości ponadakustycznych, tłumiąc podbicie na końcu pasma przenoszenia. Tak uzyskana górna granica pasma przenoszenia (-3dB) jest zbliżona do 1MHz, co ilustruje rysunek 6. Rezystory emiterowe R2, R25 eliminują niekorzystną zależność prądu spoczynkowego tranzystorów T1, T3 (ich punktu pracy) od temperatury, minimalizując dodatnie sprzężenie termiczne.

Potencjometr P2 służy do „kasowania” szczałkowego wychylenia membrany przetwornika spowodowanego przepływem składowej stałej prądu, wynikającej ze „wzmacniania niedoskonałości” użytych wzmacniaczy operacyjnych, tj. napięcia niezrównoważenia oraz napięć wynikających z różnic prądów polaryzacji wejść.

Choć zastosowany wzmacniacz operacyjny charakteryzuje się małym napięciem niezrównoważenia (typ. 10uV), to możliwy rozrzut produkcyjny, do 100uV, zależnie od wersji, przy stałoprądowym sprzężeniu zwrotnym, w najmniej korzystnym przypadku zaowocuje pojawieniem się na wyjściu wzmacniacza napięcia stałego o wartości $100\text{uV} \cdot 7,8x = 0,78\text{mV}$. Już tak niewielkie napięcie spowoduje przepływ prądu, odchylenie membrany od położenia neutralnego i teoretycznie może mieć negatywny wpływ na jakość „wytwarzanego” dźwięku. W tym przypadku zastosowanie spotykanego we wzmacniaczach słuchawkowych aktywnego układu, tzw. DC serwa, zwykle jest to układ integra-



Rys. 6

torą, służącego do aktywnego kasowania składowej stałej na przetworniku, nie jest konieczne. Zmiany prądów płynących z/do wyjścia U1 nie przekraczają $\pm 2\text{mA}$ – suma prądów płynących przez wzmacniacz zmienia się od 3mA do 5mA. Dryft temperaturowy, spowodowany nagrzewaniem struktur, można uznać za nieistotny przy typowym dla OP37 dryfie temperaturowym napięcia niezrównoważenia równym $0,2\text{uV}/^\circ\text{C}$.

Rezystor R12, tworzący dzielnik napięciowy z rezystancją obciążenia, prócz zabezpieczenia przeciwzwarciowego odpowiedzialny jest za „wyrównanie” mocy wyjściowej wzmacniacza dla słuchawek o impedancji znamionowej z zakresu 16...600Ω. Wykres mocy wyjściowej w funkcji rezystancji obciążenia dla sygnału wejściowego o amplitudzie 1V ($0,71\text{RMS}$) widoczny jest na rysunku 7. Moc tracona wydzielana w pojedynczym tranzystorze T1 i T3 nawet podczas zwarcia wyjścia do masy nie przekracza 1W, co jest w stanie rozproszyć obudowa TO126 bez radiatora. Wzmacniacz daje się wysterować blisko napięć zasilania i pomimo wymaganych na wyjściu dużych amplitud, zdecydowano się na zasilanie „standardowymi” w aparaturze audio napięciami $\pm 15\text{V}$. Dzięki temu

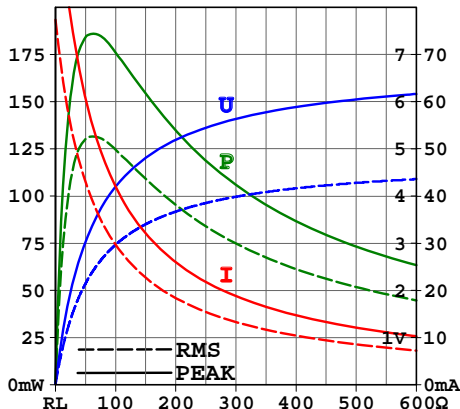


w przypadku współpracy urządzenia ze słuchawkami wysokoomowymi o małej skuteczności (czułości) możliwe jest zwiększenie wzmocnienia napięciowego (amplitudy napięcia na słuchawce) przez wymianę rezystorów R20, R21 na odpowiednio większe.

Zasilanie zapewnia symetryczny zasilacz stabilizowany, którego schemat przedstawiono na **rysunku 8**. Klasyczna aplikacja stabilizatorów U1, U2 o zmniejszonej wartości tętnień nie wymaga szerszego komentarza. Mostek Graetzta B1 wymagany jest przy zasilaniu układu transformatorem o dwóch uzwojeniach wtórnych, czyli z uzwojeniem wtórnym z odczepem. Przy zasilaniu z transformatora o jednym uzwojeniu wtórnym zamiast mostka B1 należy wlutować dwie diody prostownicze, np. 1N4001, zaznaczone na schemacie „kreskowym” deseniem. W takim przypadku jeden koniec uzwojenia wtórnego należy dołączyć do punktu O2, drugi koniec do punktów AC1 i AC2. Nadmiarowo szacowana moc zasilającego transformatora wynosi około 7VA.

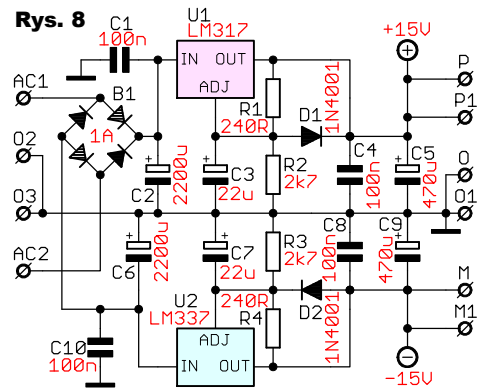
Schemat wskaźnika przesterowania widoczny jest na **rysunku 9**. Funkcję optycznego wskaźnika pełni dwustruktura LED D1. Jej świecenie sygnalizuje obecność napięć zasilania, kolor świecenia informuje o przesterowaniu (czerwony) bądź nieprzesterowa-

Rys. 7

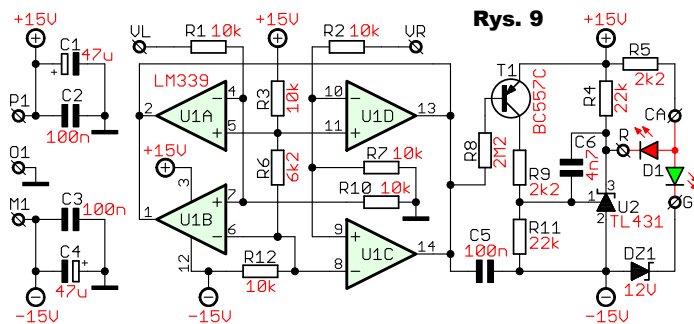


waniu (zielony) wzmacniacza. Układ U1 (LM339) realizuje dwa komparatory okienkowe odpowiednio U1A, U1B dla kanału lewego i U1C, U1D dla prawego. Bezpośrednie połączenie wyjść poszczególnych komparatorów jest możliwe dzięki wyjściom typu otwarty kolektor układu U1. Wskaźnik reaguje na przekroczenie napięcia w obu kanałach, zarówno dla dodatniej, jak i ujemnej połówki sygnału ($\pm 7V$). Przeznaczone do monitorowania sygnały z płytki wzmacniacza doprowadzono do kółkow

lutowniczych VL, VR. Na wejścia komparatorów trafiają sygnały poddane podziałowi w stosunku 1/2 dzielnikiem R1, R10 dla lewego kanału i R2, R7 dla prawego. Rezystory dzielnika R3, R6, R12 wyznaczają progi, napięcia odniesienia obu komparatorów zapewniając szerokość „okna” $\pm 3,5V$. Gdy oba monitorowane napięcia mieszczą się w tak wyznaczonym „oknie”, na wyjściach komparatorów panuje dodatnie napięcie zasilania (pomniejszone o V_{BE} nieprzewodzącego T1, a D1 świeci na zielono). Napięcie którekolwiek sygnału spoza „okna” $\pm 7V$ spowoduje ściągnięcie do minusa zasilania wyjścia odpowiedniego komparatora. Kondensator C5 zostaje szybko rozładowany, przepływ prądu przez R8 spowoduje odetkanie T1. Przepływ prądu kolektora T1 przez dzielnik R9, R11 zwiększa napięcie na wejściu referencyjnym (1) programowanej diody Zenera U2. Pracuje ona jako komparator, którego działanie przypomina tranzystor NPN o napięciu $V_{BE}=2,495V$ (tu V_{REF}) i napięciu $U_{SAT}=2V$. Napięcie na katodzie (3) zależne jest od napięcia na wejściu referencyjnym (1). Napięcie większe od napięcia referencyjnego (V_{REF}) wymusza napięcie na katodzie większe o 2V od ujemnego napięcia zasilania i przepływ prądu przez czerwoną strukturę LED D1. Świecąca na czerwono D1 sygnalizuje przesterowanie. Ponieważ suma napięć „nasyceń” U2 i V_F czerwonej struktury D1 jest mniejsza od sumy napięć zielonej struktury D1 i V_Z DZ1 zielona struktura D1 przestaje świecić. Po zmniejszeniu amplitudy sygnału do wartości mieszczącej się w „oknie” $\pm 7V$, T1 odetkany jest jeszcze przez czas ładowania C5 przez R8. Powoduje to dłuższe (1s) świecenie czerwonej struk-



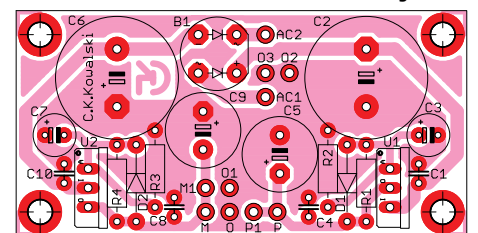
tury LED D1, realizując tym sposobem detektor szczytu. Po naładowaniu C5 prąd kolektora T1 przestaje płynąć. Napięcie na wejściu referencyjnym U2 jest mniejsze od wewnętrznego napięcia odniesienia (V_{REF}) i na katodzie panuje napięcie zbliżone do plusa zasilania. Zaświecona zostaje zielona struktura D1, natomiast czerwona przestaje świecić. Wymagany do prawidłowego zasilania U2 prąd ($>1mA$) zapewnia rezystor R4. W trakcie uruchamiania okazało się, że w czasie przełączania struktur LED D1 powstałe na katodzie U2 oscylacje przenikają do toru sygnałowego. Aby temu przeciwdziałać, zastosowano kondensator C6 dolutowany od spodu PCB. Stąd rysunek PCB (z uwzględnionym C6) wskaźnika przesterowania różni się od jej fotografii.



Rys. 9



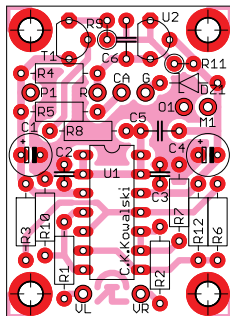
Rys. 10



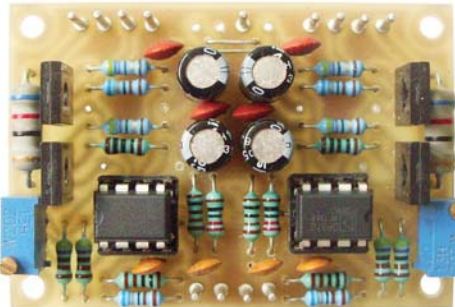
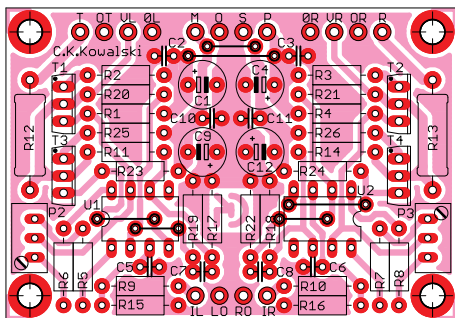
Montaż i uruchomienie

Poszczególne płytki najlepiej montować i uruchamiać w kolejności: zasilacz **rysunek 10**, wskaźnik przesterowania **rysunek 11**, wzmacniacz **rysunek 12**. Montaż elementów po wcześniejszym sprawdzeniu jakościowym PCB należy przeprowadzić w kolejności wyznaczanej przez kryterium gabarytowe lutowanych podzespołów, tj. od najmniejszych do największych. Na płycie wzmacniacza jako pierwsze należy wzlutować sześć zwrót. Uruchomienie zasilacza sprowadza się do pomiaru napięć wyjściowych. W przyłączeniowe punkty lutownicze warto wzlutować kołki lutownicze. W przypadku bliskiego rozmieszczenia płytek wzmacniacza i zasilacza w obudowie, punkty P, O, M na obu płytkach można połączyć bezpośrednio zworniami. Okablowanie urządzenia sprowadza się do połączenia przewodami jednakowo oznaczonych punktów poszczególnych płytek drukowanych. Trzymanie się oznaczeń punktów lutowniczych pozwoli uniknąć szkodliwych pętli mas, tj. ekran przewodów sygnałowych łączony jest z masą jedynie

Rys. 11



Rys. 12



na płycie wzmacniacza (jak na schemacie z **rysunku 4**). Zasada ta nie dotyczy gniazd wejściowych RCA, gdzie ekran ma być dołączony również od strony gniazd, oddzielnie dla prawego i lewego kanału. Wymagana jest izolacja mas gniazd wejściowych RCA i wyjściowego TRS od obudowy, gdy jest ona metalowa.

Przewody będące na potencjale sieci energetycznej 230V należy wykonać w podwójnej izolacji. Styk ochronny PE gniazda sieciowego koniecznie połączyć z obudową (gdy jest metalowa) i masą układu (punkt w PCB zasilacza). Zasilając wskaźnik przesterowania, sprawdzić reakcję LED, zwierając wejścia VR, VL do dodatniej i ujemnej szyny zasilania. Reakcja LED powinna być zgodna z opisem z poprzedniego śródtytułu. Uruchomienie płytki wzmacniacza można przeprowadzić „na ucho”, dołączając do gniazd źródło sygnału audio i słuchawki. Przed dołączeniem słuchawek warto sprawdzić woltomierzem wyjścia wzmacniacza pod kątem występowania składowej stałej. Jedyłą wymaganą regulacją jest korekcja napięcia niezrównoważenia wzmacniacza operacyjnych. Po ustabilizowaniu temperatur półprzewodników i przy zwartych do masy wejściach, potencjometrami montażowymi P2, P3 należy ustawić napięcie na obciążeniu (współpracujących słuchawkach) jak najbardziej zbliżone do zera. Zastosowana w prototypie obudowa pochodzi ze starego napędu CD-ROM (2001r.) z odzysku, gdy producenci nie stosowali jeszcze przetłoczeń usztywniających. Przetłoczenia w nowszych napędów (mniejsza grubość blachy) stawiają pod znakiem zapytania estetykę tak wykonanej obudowy. Ponieważ obudowa ma charakter jednostkowy, nie powstała do niej dokumentacja rysunkowa. Szczegóły obudowy mogące zainspirować Czytelników widoczne są na fotografiach. Kilka dodatkowych fotografii zostało też umieszczonych w Elporcie wśród materiałów dodatkowych do tego numeru EdW. Jak wykazują statystyki, **głośne i długie słuchanie**

Wykaz elementów

Wzmacniacz:

Wszystkie metalizowane o tolerancji 1%

R2,R3,R25,R26	4,7kΩ
R12,R13	62Ω/2W
R11,R14	100Ω
R1,R4,R23,R24	120Ω..180Ω
R17,R18	220Ω
R9,R10,R19,R22	1kΩ
R5,R6,R7,R8	4,7kΩ
R15,R16,R20,R21	6,8kΩ
P1	22kΩ-A pot. obrotowy stereo
P2,P3	2,2kΩ pot. montażowy RJ9W
C5,C6,C7,C8	27p ceramiczny
C2,C3,C10,C11	100n ceramiczny
C1,C4,C9,C12	100u/25V
T1,T2	BD140-16
T3,T4	BD139-16
U1,U2	OP37
J1	gniazda 2xRCA
J2	gniazdo TRS φ 6,3mm (1/4")

Zasilacz:

R1,R4	240Ω
R2,R3	2,7kΩ
C1,C4,C8,C10	100n ceramiczny
C3,C7	22u/25V
C5,C9	470u/25V
C2,C6	2200u/25V
B1	RB-1A lub 2x 1N4001
D1,D2	1N4001
U1	LM317
U2	LM337

Detektor szczytu:

R5,R9	2,2kΩ
R6	6,2kΩ
R1,R2,R3,R7,R10,R12	10kΩ
R4,R11	22kΩ
R8	2,2MΩ
C5	100n foliowy
C6	4,7n foliowy
C2,C3	100n ceramiczny
C1,C4	47u/25V
D1	LED φ 5mm RG wspólna anoda
DZ1	12V
T1	BC557C
U1	LM339
U2	TL431

Komplet płytek jest dostępny w Sklepie AVT jako AVT3217

audycji przy użyciu słuchawek może powodować znaczne ubytki słuchu, dlatego zalecane jest umiarkowanie (którego życzę Szanownym Czytelnikom) przy ustalaniu głośności potencjometrem regulacyjnym.

Cyprian Kamil Kowalski
c4v2@o2.pl



Zawsze znajdziesz, przejrzysz i kupisz aktualny numer „Elektroniki dla Wszystkich” (zarówno w wersji papierowej, jak i elektronicznej) na www.UlubionyKiosk.pl