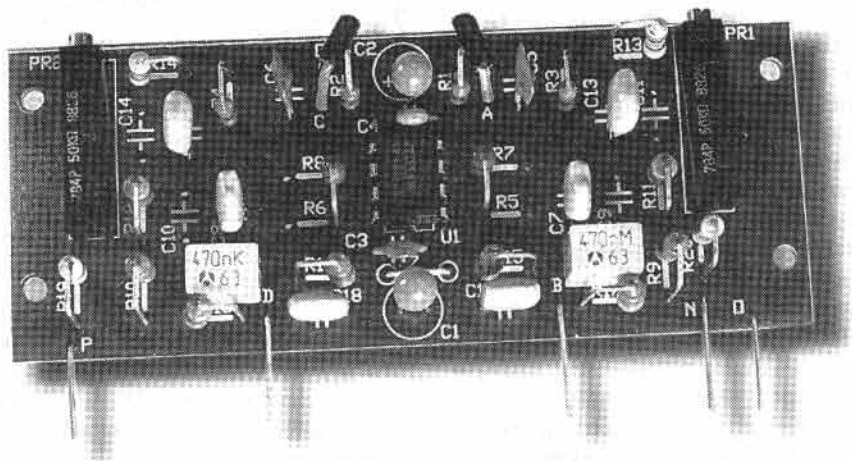


# Przedwzmacniacz gramofonowy RIAA

## AVT-145

*W artykule opisano prosty układ przedwzmacniacza gramofonowego o dobrych parametrach. Przedstawiony układ pomimo niewątpliwej prostoty umożliwia odwzorowanie charakterystyki RIAA z dokładnością  $\pm 0,1\text{dB}$ , co jest jego dużym atutem.*

*W części wstępnej przedstawiono analizę właściwości i wymagań stawianym wzmacniaczom korekcyjnym. Wiadomości te umożliwiają wyrobienie sobie poglądu na temat parametrów korekcyjnych wzmacniaczy gramofonowych.*



W cyklu modułów audio nie może zabraknąć przedwzmacniacza gramofonu z wkładką magnetyczną. Choć płyty analogowe są sukcesywnie wypierane przez płyty kompaktowe, współczesny zestaw muzyczny nadal powinien zawierać wejście dla gramofonu magnetycznego. W artykule przedstawiono przedwzmacniacz współpracujący z typowym przetwornikiem o ruchomym magnesie.

Przed przystąpieniem do budowy lub modernizacji przedwzmacniacza korekcyjnego RIAA należy rozważyć kilka ważnych zagadnień, które dość często powodują nieporozumienia lub wątpliwości. Do zagadnień tych należy zaliczyć:

- problem szumów,
- dokładność realizowania charakterystyki RIAA,
- parametry dynamiczne.

### Szumy własne przedwzmacniacza

Niektórzy konstruktorzy-hobbyści zupełnie pomijają problem szumów, inni przykładają do niego zbyt wielką wagę.

Jakiś czas temu w cyklu Notatnik Praktyka przedstawiliśmy szeroko temat szumów, dziś przypomnimy tylko dwa podstawowe wnioski:

- po pierwsze, każde rzeczywiste źródło sygnału szumi „samo

z siebie” - tym więcej, im większa jest rezystancja wewnętrzna tego źródła. Popularna wkładka - przetwornik o ruchomym magnesie ma dość dużą rezystancję wewnętrzną, rzędu 500...1000 $\Omega$ . Nie ma więc sensu stosowanie jakiegoś kosztownego ultraniskoszumnego wzmacniacza, bo nic on nie poprawi - i tak w całkowitym szumie w głośnikach dominować będzie szum powstający w rezystancji przetwornika.

Wystarczy więc zastosować przedwzmacniacz mający gęstość szumów napięciowych nie większą niż  $5\text{nV}/(\text{Hz})^{1/2}$  i gęstość szumów prądowych nie większą niż  $1\text{pA}/(\text{Hz})^{1/2}$ . Jest wiele tanich kostek mających takie parametry szumowe: między innymi podwójny wzmacniacz operacyjny NE5532.

Inaczej ma się sprawa z przetwornikami z ruchomą cewką (moving coil), stosowanymi w gramofonach wysokiej klasy. Rezystancja wewnętrzna jest tu znacznie mniejsza, rzędu 10...100 $\Omega$ . Mniejszy jest także sygnał wyjściowy. W tym przypadku rzeczywiście trzeba stosować przedwzmacniacze o skrajnie małych szumach. Jeśli opisany dalej układ miałby być używany do współpracy z wysokiej klasy przetwornikiem o ruchomej cewce, powinien być poprzedzony ultraniskoszumnym przedwzmacniaczem o płaskiej

charakterystyce, np. z układem AD797, SSM2016, SSM2017 lub LT1028;

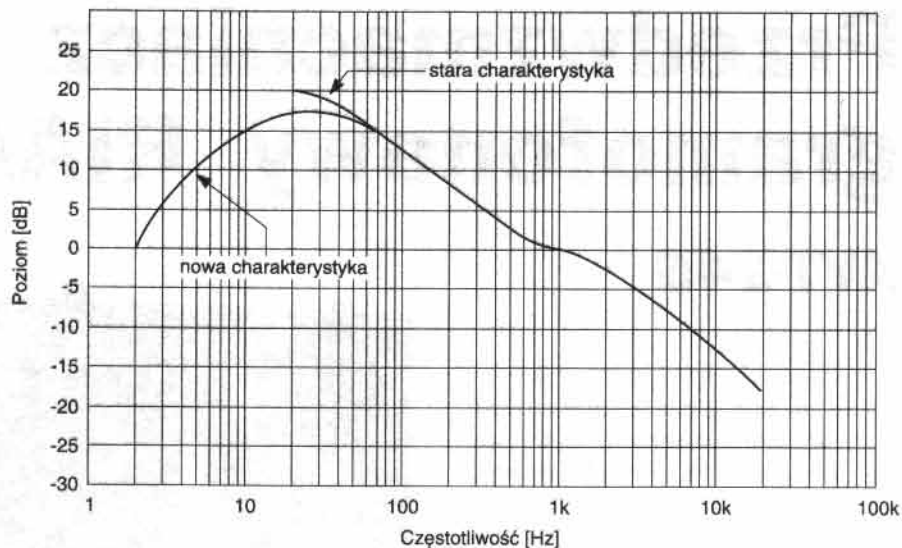
- po drugie - ważną sprawą jest wpływ charakterystyki częstotliwościowej na szumy. Charakterystyka wzmacniacza korekcyjnego (tzw. krzywa RIAA) pokazana jest na **rysunku 1**. Na rysunku tym przyjęto umowny poziom 0dB dla częstotliwości 1kHz. W rzeczywistości przy tej częstotliwości wzmocnienie przedwzmacniacza dla wkładki z ruchomym magnesem wynosi zwykle 30...40dB (30...100x), a z ruchomą cewką - 60...70dB (1000...3000x). Nie to jednak jest najważniejsze: istotne jest, że ze wzrostem częstotliwości wzmocnienie zmniejsza się. Tymczasem szumy mają największą energię w górnej części pasma.

A więc w gramofonowym wzmacniaczu korekcyjnym mamy sytuację znacznie lepszą niż we wzmacniaczu mikrofonowym - przebiegi o większych częstotliwościach, w tym najdokuczliwsze szumy, są wzmacniane tylko w niewielkim stopniu, uzyskuje się więc korzystny stosunek sygnał/szum.

Te dwa czynniki decydują, że budowa dobrego przedwzmacniacza współpracującego z typowym przetwornikiem o ruchomym magnesie jest znacznie łatwiejsza niż konstrukcja dobrego wzmacniacza mikrofonowego. Naprawdę nie jest konieczne używanie najdroższych podzespołów. Wystarczy niezły wzmacniacz operacyjny i porządne metalowe rezystory i kondensatory foliowe.

### Przebieg charakterystyki częstotliwościowej

Rysunek 1 pokazuje idealny przebieg charakterystyki przedwzmacniacza. Dotyczy on obu wymienionych rodzajów przetworników. Płyty są nagrywane w ten sposób, żeby po takiej właśnie korekcji odtworzyć dokładnie to, co zostało nagrane. W praktyce krzywą RIAA charakteryzuje się podając wartość kilku stałych czasowych (7950ms, 3180ms, 318ms i 75ms). Nie jest to potrzebne przeciętnemu elektronikowi, ponieważ korzysta on z gotowych schematów. Dla niego ważniejsze są odpowiedzi na pytania: z jaką



Rys. 1. Charakterystyka RIAA.

dokładnością realizuje się w praktyce przebieg charakterystyki częstotliwościowej? Czy obydwa kanały stereofoniczne są rzeczywiście identyczne?

W sprzecznie wysokiej klasy przebieg charakterystyki wzmacniacza nie powinien odbiegać od wzorcowej krzywej więcej niż o ułamek decybel.

W sprzecznie popularnym różnice są znacznie większe, choćby z uwagi na powszechne stosowanie elementów (kondensatorów) o tolerancji 10 lub nawet 20%.

### Inne parametry

Spośród pozostałych parametrów, niebagatelną rolę odgrywają właściwości dynamiczne. Zapis na płycie analogowej oczywiście nie dorównuje zapisowi cyfrowemu, jednak i czarna płyta może być źródłem przebiegów o dużej stromości. Sygnał na wyjściu przedwzmacniacza ma amplitudę rzędu jednego, a nawet kilku woltów. Żeby nie zniekształcić takich szybkich, impulsowych przebiegów, użyty wzmacniacz powinien mieć odpowiednie parametry wyjściowe - szczególnie chodzi tu o katalogowy parametr Slew Rate (SR wyrażany w V/ms). Aby utrzymać zniekształcenia nieliniowe na niskim poziomie, pasmo użytego wzmacniacza powinno być jak najszersze. Z drugiej strony, ponieważ wzmocnienie maleje ze wzrostem częstotliwości, należy zastosować wzmacniacz skompensowany dla wzmocnienia równego jeden.

Nie są to jednak wymagania

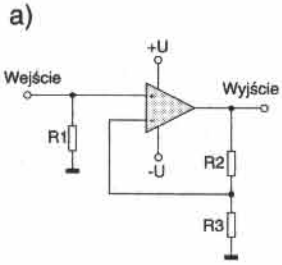
ostre i wiele popularnych wzmacniaczy operacyjnych znakomicie je spełnia.

Inny problem, z którego nie wszyscy sobie zdają sprawę, wynika przy stosowaniu modnego obecnie sprzężenia stałoprądowego - gdy wejście wzmacniacza jest połączone z wkładką bez pośrednictwa kondensatorów. Wtedy dokładnej analizy wymagają stałoprądowe parametry wejścia wzmacniacza. W zasadzie nie ma argumentów przeciwko sprzężeniu stałoprądowemu, wręcz przeciwnie - poważnym argumentem na jego rzecz jest wyeliminowanie z obwodów małosygnałowych kondensatorów elektrolitycznych, które nie są mile widziane w sprzężeniu lepszej klasy.

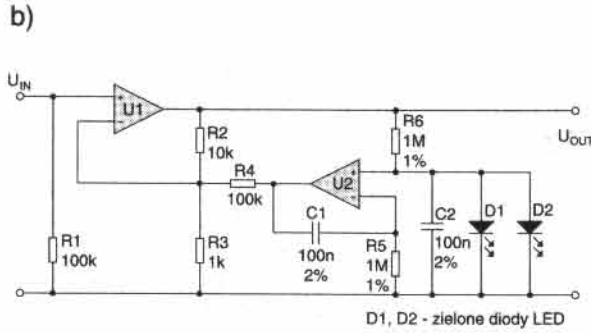
Bezpośrednie sprzężenie galwaniczne wywołuje jednak szereg kłopotów ze stałoprądowymi punktami pracy wzmacniacza. Przyczyną są: prąd polaryzacji wejścia, wejściowe napięcie niezrównoważenia i dryft tego napięcia. **Rysunek 2** pokazuje w dużym uproszczeniu trzy wersje przedwzmacniacza: ze sprzężeniem stałoprądowym (2a, 2b) i zmiennoprądowym (2c).

W wersji stałoprądowej wzmacniacz ma wzmocnienie dla prądu stałego rzędu 500...1000. Tymczasem napięcie niezrównoważenia typowego wzmacniacza wynosi kilka miliwoltów - a więc napięcie stałe na wyjściu wzmacniacza w układzie 2a (po pięćset- czy tysiącrotnym wzmocnieniu) może wynieść nawet kilka woltów!

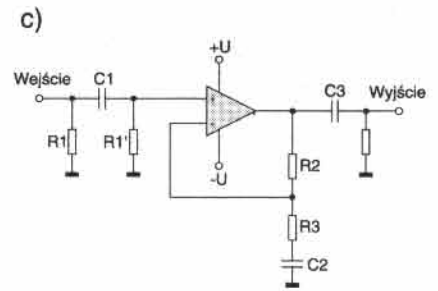
Ponadto przepływ wejściowego



Rys. 2a. Wzmacniacz ze sprzężeniem stałoprądowym.



Rys. 2b. Wzmacniacz ze sprzężeniem stałoprądowym + serwo.



Rys. 2c. Wzmacniacz ze sprzężeniem zmiennoprądowym.

prądu polaryzującego o wartości około 1mA wywoła na rezystancji wkładki spadek napięcia rzędu miliwolta, co też niebagatelnie wpłynie na napięcie wyjściowe.

Przy tak dużym wzmocnieniu stałoprądowym nie można też pominąć dryftu wejściowego napięcia niezrównoważenia, który w tanich wzmacniaczach operacyjnych wynosi około 10mV/K.

Aby pokonać wymienione problemy stosuje się generalnie dwie metody:

- użycie najnowszych układów scalonych o znakomitych parametrach (napięcie niezrównoważenia rzędu kilkudziesięciu mikrowoltów, dryft tego napięcia rzędu 1mV/K, znikomy prąd polaryzujący),
- dodanie układu korygującego napięcie stałe (DC servo amplifier).

Układ wyposażony w tak wane serwo pokazany jest na rysunku 2b. Dodatkowy wzmacniacz operacyjny U2 porównuje średnie napięcie wyjściowe wzmacniacza U1 z potencjałem masy. Jeśli napięcie to nie jest równe napięciu masy (z dokładnością kilku mV, wynikającą z napięcia niezrównoważenia wzmacniacza U2), to zmienia się napięcie na wyjściu wzmacniacza U2 i pojawia się prąd w obwodzie R4-R3-masa. Napięcie na wejściu odwracającym wzmacniacza U1 zmienia się, aż napięcie na wyjściu U1 osiągnie potencjał masy. Dzięki obecności kondensatorów układ serwo jest bardzo powolny i zupełnie nie wpływa na działanie głównego wzmacniacza U1 w zakresie częstotliwości akustycznych.

W wersji przedwzmacniacza o sprzężeniu zmiennoprądowym (rysunek 2c), dzięki obecności

kondensatora C2 wzmacniacz ma dla prądu stałego wzmocnienie równe 1. W tym wypadku napięcie niezrównoważenia typowego wzmacniacza wynoszące kilka miliwoltów, jego dryft i napięcie wynikające z przepływu prądu polaryzującego nie mają żadnego znaczenia. Podstawową wadą takiego rozwiązania jest obecność kondensatorów elektrolitycznych pracujących przy zerowym napięciu polaryzującym. W takich warunkach kondensatory elektrolityczne mogą być źródłem szumów, zniekształceń, a nawet kłopotów ze stałoprądowym punktem pracy. Przeszkodą w stosowaniu kondensatorów innych niż elektrolityczne jest wymagana duża pojemność, potrzebna głównie ze względu na szumy.

Generalnie sprzężenie stałoprądowe wcale nie jest niezbędne - stosuje się je dla wyeliminowania

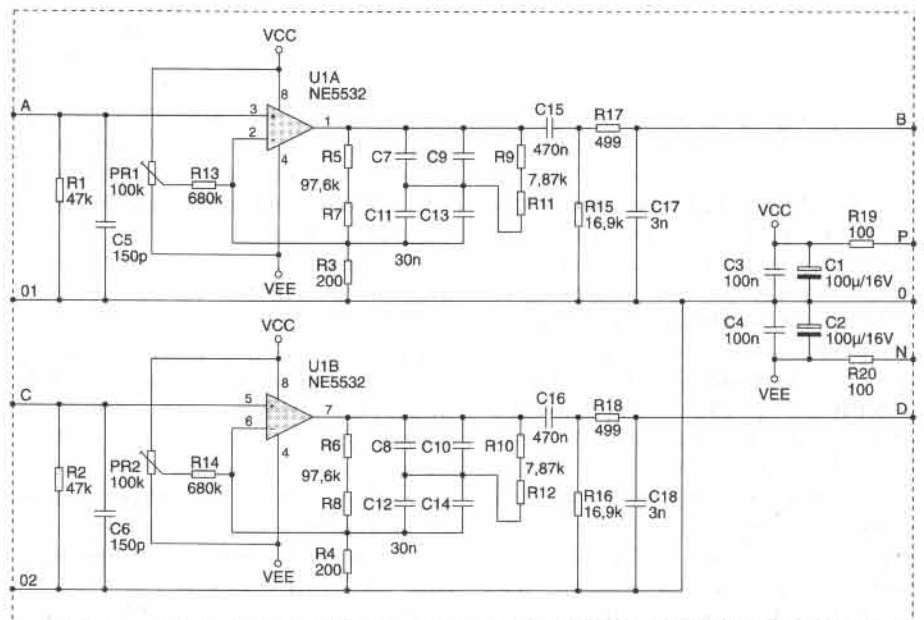
kondensatorów elektrolitycznych, co rzeczywiście jest sensowne, albo też ze względów reklamowych, co dla kieszeni użytkownika jest już mniej sensowne.

Przedstawione dalej rozwiązanie jest kompromisem między wadami i zaletami poszczególnych wersji.

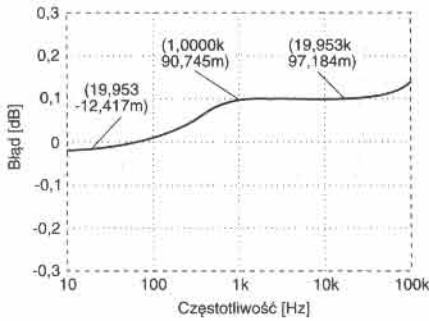
### Opis układu

Schemat ideowy modułu pokazany jest na rysunku 3. Moduł przeznaczony jest do zasilania napięciem symetrycznym w zakresie  $\pm 10V \dots \pm 15V$ . Sercem układu jest podwójny wzmacniacz operacyjny. W wersji podstawowej jest to popularna kostka NE5532, mająca zupełnie wystarczające parametry szumowe ( $u_{ni} = 5nV/(Hz)^{1/2}$ ,  $i_{ni} = 0,7pA/(Hz)^{1/2}$ ) i dynamiczne ( $SR = 9V/ms$ ).

Od strony wejścia układ jest sprzężony stałoprądowo. Obciąże-



Rys. 3. Schemat ideowy.



Rys. 4. Odchyłki kształtu charakterystyki opisywanego układu (w stosunku do zaleceń RIAA).

niem wkładki jest rezystancja R1 (R2) połączona równolegle z pojemnością C5 (C6) i pojemnością ekranowanego przewodu połączeniowego. Zastosowano typową wartość pojemności obciążenia (C5, C6). Jeśli producent wkładki zaleca inną pojemność, należy ją zastosować, uwzględniając pojemność przewodów połączeniowych (nawet 100pF/m).

Ponieważ prąd polaryzacji wejścia kostki NE5532 jest znaczny - typowo wynosi 200nA, maksymalnie 800nA, a wejściowe napięcie niezrównoważenia może sięgać 4mV, wprowadzono potencjometry PR1 i PR2 do korekcji napięcia niezrównoważenia. W zasadzie nie są one niezbędne, bowiem w normalnych warunkach pracy, po przyłączeniu współpracującej wkładki na wyjściach wzmacniacza operacyjnego napięcie stałe (wynikające ze wzmocnienia napięcia niezrównoważenia i przepływu prądów wejściowych) nie powinno być większe niż  $\pm 3V$ , co przy napięciach zasilających powyżej  $\pm 10V$  byłoby do przyjęcia. Potencjometry pozwalają zmniejszyć to napięcie stałe do wartości kilku, kilkudziesięciu miliwoltów przez co zwiększy się użyteczny zakres napięć wyjściowych. Należy jednak pamiętać, iż jeśli do wejść nie będzie dołączony przetwornik (lub odpowiadająca mu rezystancja), to wskutek przepływu prądów wejściowych przez duże rezystancje R1 i R2, napięcie stałe na wyjściu wyniesie ponad 5V, a nawet wyjście może się nasycić. Regulacja potencjometrami PR1 i PR2 nie miałaby wtedy żadnego sensu - regulację powinno się przeprowadzać po dołączeniu do wejść

rezystancji wkładki.

Elementy R3 - R12 i C7 - C14 decydują o wzmocnieniu i kształcie charakterystyki częstotliwościowej. Nabywcy zestawu AVT-145 otrzymają elementy o wartościach podanych w wykazie elementów. W tej wersji podstawowej zawierającej kondensatory o tolerancji 10% należy się liczyć z odchyłkami od wzorcowej krzywej RIAA rzędu  $\pm 1dB$ .

Jak widać na schemacie, każdą rezystancję i pojemność w obwodzie kształtowania charakterystyki można uzyskać łącząc dwa elementy. We własnym zakresie można więc z pomocą miernika dobrać rezystory oraz kondensatory i uzyskać dokładność charakterystyki rzędu  $\pm 0,1dB \dots \pm 0,2dB$ ! **Rysunek 4** pokazuje odchyłki charakterystyki uzyskanej przy symulacji komputerowej układu o wartościach elementów, jak na schemacie ideowym.

Rezystory stosowane w obwodach małosygnałowych powinny być rezystorami metalowymi, a nie węglowymi, o tolerancji najlepiej 1%. W obwodach korekcyjnych w żadnym wypadku nie należy stosować kondensatorów ceramicznych ferroelektrycznych. W zasadzie najlepsze byłyby kondensatory polipropylenowe ewentualnie polistyrenowe (styroflexowe) o tolerancji 1...2%. Niewiele ustępują im popularne kondensatory poliestrowe - krajowe MKSE lub zagraniczne MKT.

Wyjaśnienia wymaga obecność elementów R15, C15 (R16, C16). Po pierwsze jest to prosta realizacja stałej czasowej 7950ms z wymaganej w „nowej” krzywej RIAA. Jest to filtr górnoprzepustowy o częstotliwości granicznej 20Hz, ograniczający zakłócenia najniższej częstotliwości.

Po drugie, obecność tych elementów powoduje, że na wyjściu modułu (punkty oznaczone B, D) napięcie stałe jest zawsze równe potencjałowi masy, niezależnie od napięcia stałego na wyjściu wzmacniaczy operacyjnych. Od strony wyjścia układ jest więc sprzężony zmiennoprądowo, ale co ważne, w torze sygnału nie zastosowano żadnych kondensatorów elektrolitycznych.

Po trzecie włączenie filtra górnoprzepustowego za wzmacnia-

czem zmniejsza wpływ szumów typu 1/f wzmacniacza operacyjnego, co w przypadku kostki NE5532 ma duże znaczenie.

Kolejny filtr R17, C17 (R18, C18) uzupełnia działanie obwodu kształtowania charakterystyki częstotliwościowej w zakresie najwyższych częstotliwości. Należy zauważyć, że wzmacniacz operacyjny pracuje w konfiguracji nieodwracającej, a więc dla żadnej częstotliwości wzmocnienie nie może być mniejsze od jedności. Tymczasem dla precyzyjnego odwzorowania krzywej RIAA wzmocnienie w zakresie powyżej 100kHz powinno być mniejsze od jedności. Błąd wynikający z przyjętej konfiguracji nieodwracającej jest niewielki - przy częstotliwości 20kHz wynosi tylko około 0,3dB. I właśnie obwód R17C17 (R18C18) koryguje ten niewielki błąd do wartości poniżej 0,1dB.

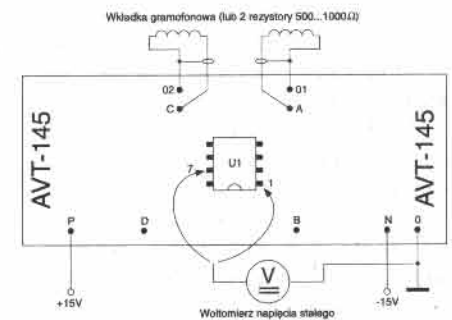
Jak z tego widać, w wersji podstawowej nie jest konieczne stosowanie elementów R17, R18, C17, C18.

Zastosowanie elementów R15 - R18 i C15 - C18 na wyjściu modułu powoduje pewną niewielką wrażliwość parametrów na zmianę rezystancji obciążenia. Dlatego należy zadbać, by rezystancja wejściowa następnego stopnia wzmacniacza nie była mniejsza niż 47k $\Omega$ , a najlepiej by wynosiła 220k $\Omega \dots 1M\Omega$ .

## Montaż i uruchomienie

Układ można zmontować na płytce pokazanej na wkładce. Najpierw należy wlutować jedyną zworę oznaczoną Z, a potem w dowolnej kolejności elementy bierne i układ scalony.

Ponieważ w zestawie AVT-145 w obwodzie kształtowania charak-



Rys. 6. Układ do korekcji napięcia na wyjściach wzmacniaczy operacyjnych.

terystyki częstotliwościowej występuje tylko po jednym rezystorze (zob. wykaz elementów), rezystory R5 i R6 należy montować „na skrót“, a rezystory R11 i R12 „na leżąco“, w otwory wyróżnione na płytce kółkami.

Układ zmontowany ze sprawnych elementów nie wymaga uruchamiania, powinien od razu pracować poprawnie. Należy tylko skontrolować i ewentualnie zlikwidować napięcia stałe na wyjściach obu wzmacniaczy operacyjnych przy pomocy potencjometrów PR1, PR2. Pokazano to na **rysunku 6**. Napięcie mierzy się nie na wyjściach modułu oznaczonych literkami B i D, tylko na wyjściach kostki, czyli na nóżkach 1 i 7 układu U1. Ponieważ na wejściu zastosowano rezystory o rezystancji 47k $\Omega$ , a prąd wejściowy wzmacniaczy operacyjnych ma znaczną wartość, regulację potencjometrów należy przeprowadzić, gdy do wejścia dołączona zostanie ta wkładka, która stale będzie współpracować z przedwzmacniaczem. Gdy nie jest to możliwe, na czas regulacji zamiast wkładki należy dołączyć do wejść rezystory o wartości 500W...1kW. Potencjometrami należy zmniejszyć napięcie stałe na nóżkach 1 i 7 kostki U1 do wartości nie większej niż  $\pm 100$ mV. Nie ma jednak żadnej potrzeby zerowania z większą dokładnością, ponieważ pod wpływem zmian temperatury napięcie stałe na wyjściu i tak będzie się zmieniać w granicach kilkudziesięciu miliwoltów. Takie zmiany punktu pracy nie mają żadnego praktycznego wpływu na wzmocnienie sygnałów zmiennych.

Nie ma natomiast żadnego sensu przeprowadzenie regulacji, gdy do wejść nie dołączono rezystancji wkładki. Wtedy bowiem przepływ prądu wejściowego wzmacniacza przez rezystancję 47k $\Omega$  (R1, R2) da na wyjściu wzmacniaczy napięcia stałe rzędu kilku woltów.

### Możliwości zmian

Przy współpracy z krajową wkładką MF-105 podczas odtwarzania przeciętnej płyty gramofonowej, uzyskuje się na wyjściu przedwzmacniacza sygnał o wartości około 1,2V<sub>pp</sub>. Jest to zupeł-

nie wystarczające do większości zastosowań. Jeśli jednak potrzebny byłby większy sygnał, można zmniejszyć rezystancje R3 i R4 do 100W albo zastosować dodatkowy stopień wzmacniający.

W wersji podstawowej stosuje się kostkę NE5532, bądź równoważną LM833. Zamiast nich można oczywiście wstawić lepsze, ale i znacznie droższe kostki np. OP-249, OP-270, OP-275, OP-285 czy SSM-2135 (-2139).

Można też przeprowadzić próbę z popularną i taną kostką TL072. Nie ma natomiast sensu próba wykorzystania szumiących i powolnych układów takich jak TL082, TL062 czy LM358.

### Uwagi końcowe

Prawidłowe działanie modułu przedwzmacniacza korekcyjnego nie oznacza jeszcze końcowego sukcesu. Układ o tak dużej czułości jest wrażliwy na zewnętrzne zakłócenia, przydźwięk itp. Otrzymujemy od naszych Czytelników sygnały, iż często mają kłopoty z przydźwiękiem. Nie sposób przewidzieć wszystkich sytuacji, ale zawsze należy zwracać uwagę na sposób prowadzenia i połączenia obwodu masy. Temat ten jest bardzo obszerny i nie mieści się w ramach niniejszego artykułu. Należy przeprowadzić szereg prób. Wcześniej trzeba jednak wyeliminować przydźwięk przenikający przez pola elektryczne i magnetyczne.

Jeśli przydźwięk przedostaje się przez pole elektryczne, wtedy wystarczy moduł zaekranować, używając jakiegokolwiek cienkiej blachy lub choćby folii aluminiowej (ekran należy oczywiście połączyć w odpowiednim punkcie z masą układu).

Jeśli przydźwięk przedostaje się przez pole magnetyczne, to ekranowanie niewiele pomaga. Blacha aluminiowa lub miedziana nie daje zupełnie nic, blacha stalowa lub inna magnetyczna trochę zmniejsza przydźwięk, ale naprawdę niewiele. W takiej sytuacji należy przede wszystkim oddalić płytkę od transformatora sieciowego i próbować umieszczać ją w różnym położeniu w stosunku do transformatora. To rzeczywiście pomaga. Dla uniknięcia kłopotów z polem magnetycznym,

### WYKAZ ELEMENTÓW

#### Rezystory

PR1, PR2: 100k $\Omega$  helitrim  
R1, R2: 45,3...46,4...51,1k $\Omega$  1%  
R3, R4: 200 $\Omega$  1%  
R5, R6: 97,6...100k $\Omega$  1%  
R7, R8, R9, R10: (dobierane we własnym zakresie do wersji precyzyjnej)  
R11, R12: 7,5...7,87...8,06k $\Omega$  1%  
R13, R14: 680k $\Omega$   
R15, R16: 16,9...17,4k $\Omega$  1%  
R17, R18: 487...499...511 $\Omega$  1%  
R19, R20: 100 $\Omega$

#### Kondensatory

C1, C2: 47...100 $\mu$ F/16V tantalowe  
C3, C4: 100nF ceramiczne  
C5, C6: 150pF  
C7, C8: 10nF followe 5...10%  
C9, C10, C11, C12: (dobierane we własnym zakresie do wersji precyzyjnej)  
C13, C14: 33nF followe 5...10%  
C15, C16: 470nF followe 5...10%  
C17, C18: 3,3nF followe 5...10%

#### Półprzewodniki

U1: NE5532A, NE5532, LM833

z zasady należy stosować transformatory toroidalne, bowiem mają one niewielkie pole rozproszenia.

**Piotr Górecki, AVT**