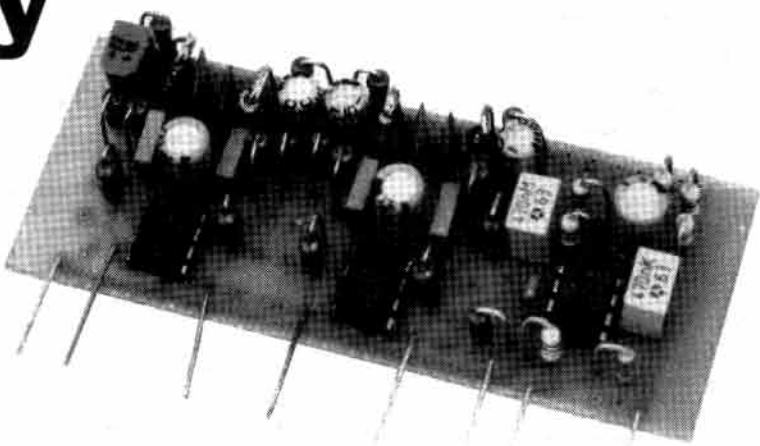


# Superniskoszumny przedwzmacniacz mikrofonowy

## kit AVT-193

Zgodnie z obietnicą zawartą w artykułach o szumach (z cyklu Notatnik praktyka) przedstawiamy konstrukcję będącą praktycznym uzupełnieniem tamtych dość trudnych rozważań teoretycznych. Proponujemy oto wykonanie niskoszumnego przedwzmacniacza o bardzo dobrych parametrach. Do budowy posłużą powszechnie znane i dostępne elementy.

Osiągnięte parametry zachęcają wielu naszych Czytelników do budowy tego prostego układu. Moduł jest kolejnym „klockiem” w serii audio. Znajdzie szereg zastosowań przy budowie urządzeń elektroakustycznych wysokiej jakości. Niewielkie wymiary umożliwiają wbudowanie modułu do posiadanego sprzętu, dzięki czemu można radykalnie polepszyć parametry aparatury. Wykonanie i „odsluchanie” takiego przedwzmacniacza będzie też mieć ważny walor poznawczy. Poziom szumów jest tu bliski teoretycznej granicy wynikającej z podstawowych praw fizyki. Zapoznanie się z takim wzmacniaczem pozwoli wyrobić sobie pogląd na możliwości i ograniczenia superniskoszumnych wzmacniaczy. W środowisku elektroników-amatorów powszechne są bowiem nadmierne oczekiwania w tym zakresie.



W serii modułów audio przedstawiamy niskoszumny wzmacniacz wykorzystujący kostkę NE542. Ten układ scalony ma od lat swój krajowy odpowiednik UL1322. Zacznijmy od parametrów kostki.

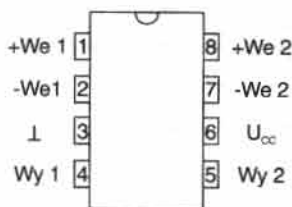
### Układ scalony NE542

Kostka zawierająca dwa niezależne, jednakowe wzmacniacze jest przeznaczona do zasilania pojedynczym napięciem.

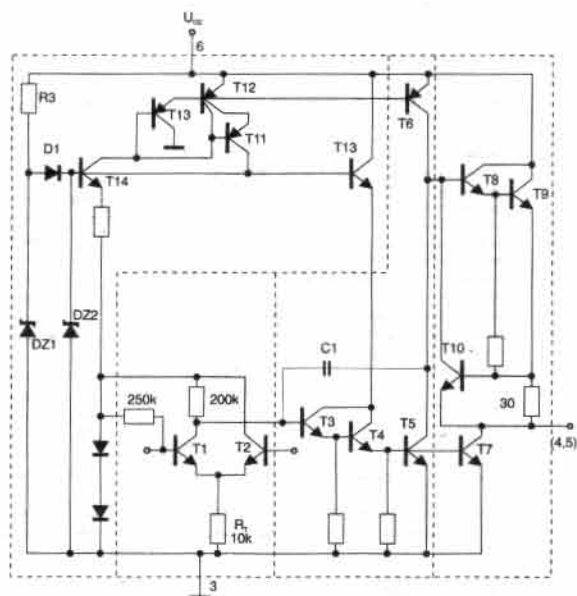
Wejście nieodwracające posiada wewnętrzny układ polaryzacji napięciem około +1,3V, nie wymaga więc zewnętrznej polaryza-

cji - sygnał wejściowy jest podawany na nie przez kondensator. W zamian za to bardziej rozbudowany musi być obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego, który decyduje o wartości napięcia stałego na wyjściu oraz o wzmacnieniu sygnału zmiennego.

Zastosowano wewnętrzne obwody kompensacji częstotliwościowej. Elementy kompensacji zapewniają stabilność przy wzmacnieniu większym niż 3x - układ nie nadaje się więc do pracy jako wtórnik - w typowym układzie pracy przy wzmacnieniu 1 na pewno się wzbudzi. W zamian za



Rys. 1. Struktura wewnętrzna i rozkład wyprowadzeń układu NE542



## Podstawowe parametry układu NE542

Zakres napięć zasilania:	+9...+24V
Pobór prądu:	typ. 9mA, max 15mA
Rezystancja wejścia nieodwracającego:	typ. 100kΩ
Wejściowy prąd polaryzujący wejścia odwracającego:	typ. 0,5μA
Zalecany zakres prądów wyjściowych:	0...3mA
Szybkość zmian napięcia wyjściowego:	typ. 5V/μs
Pasma przenoszenia (Uwy=15Vpp):	100kHz
Wzmocnienie napięciowe (100Hz):	typ 160000x
Tłumienie tętnień zasilania (w całym pasmie akustycznym):	>90dB
Tłumienie przestuchu między kanałami:	typ. 70dB
Zniekształcenia nieliniowe:	typ. 0,1%
Gęstość napięcia szumów wejściowych (1kHz):	7nV/(Hz) <sup>1/2</sup>
(100Hz):	12nV/(Hz) <sup>1/2</sup>
Gęstość prądu szumów wejściowych (1kHz):	0,3pA/(Hz) <sup>1/2</sup>
(100Hz):	0,75pA/(Hz) <sup>1/2</sup>
Napięcie szumów wejściowych (100...10000Hz):	0,7μV

to wzmacniacz jest szybki i ma duże wzmocnienie.

Budowę wewnętrzną i rozkład wyprowadzeń pokazano na **rysunku 1**.

Na uwagę zasługują tu dobre parametry dynamiczne - wzmocnienie i szybkość wzmacniacza. Stosunkowo niewielki jest też poziom szumów. Gęstość napięcia szumów (7nV/(Hz)<sup>1/2</sup>) i częstotliwość „kolana“ (kilkaset Hz) nie są wprawdzie rewelacyjne, ale prąd szumów jest niewielki w porównaniu z innymi wzmacniaczami z tranzystorami bipolarnymi.

Przy współpracy ze źródłami sygnału o rezystancji od około 2kΩ do około 90kΩ szumy własne układu są mniejsze niż szumy termiczne rezystancji źródła. Na podstawie podanych parametrów można też wyliczyć, iż najlepsze właściwości szumowe można osiągnąć przy rezystancji źródła około 22kΩ (en/in). Wprawdzie przy użyciu typowego mikrofonu

o rezystancji 200Ω nie uzyska się rewelacyjnych wyników, ale w dalszej części artykułu podamy sposób na zdecydowane obniżenie poziomu szumów wejściowych.

Podstawowy układ aplikacyjny pokazany jest na **rysunku 2**. Stosunek rezystancji R1 do R2 decyduje o wartości napięcia stałego na wyjściu. Aby uzyskać możliwie duży niezniekształcony sygnał wyjściowy wspomniane napięcie stałe powinno być zbliżone do połowy napięcia zasilającego.

Pomocą w doborze tych elementów może być wzór (1):

$$R2 = \left( \frac{U_{cc}}{2,8V} - 1 \right) \cdot R1 \quad (1)$$

Ponieważ prąd polaryzacji wejścia odwracającego wynosi typowo 0,5μA, więc prąd dzielnika R1, R2 nie może być zbyt mały, dlatego rezystancja R2 nie powinna być większa niż 240kΩ.

Wzmocnienie sygnału zmiennego jest ustalane stosunkiem R1 do równoległego połączenia R2 i R3 (o ile C1 i C2 mają odpowiednio dużą pojemność). Tak więc w praktyce wzmocnienie zmiennoprądowe regulujemy war-

tością R3.

Dolna częstotliwość graniczna zależy przede wszystkim od pojemności C2. Dla spadku o trzy decybele:

$$f_d = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R3 \cdot C2} \quad (2)$$

Z uwagi na szumy termiczne rezystorów wartość równoległego połączenia R1,R2,R3 (a w praktyce po prostu wartość R3) nie powinna przekraczać 1kΩ. W przeciwnym wypadku szumy termiczne rezystorów sprzężenia zwrotnego będą większe niż szumy własne samego wzmacniacza. Oczywiście, nie powinny to być też popularne rezystory węglowe, konieczne trzeba użyć rezystorów metalizowanych, co najmniej typu MŁT, a lepiej MFR lub podobnych.

Jako C2 korzystnie jest zastosować tantalowy kondensator elektrolityczny, choć nie jest to konieczne.

C1 powinien być kondensatorem unipolarnym, całkowicie wystarczy tu popularny MKSE-020 o pojemności 100nF.

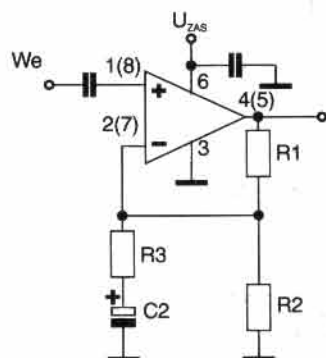
## Układ modelowy

Na **rysunku 3** pokazano schemat elektryczny modułu. W założeniu jest to czterokanałowy wzmacniacz mikrofonowy, dlatego na wejściu zastosowano filtry LC zapobiegające przenikaniu do wzmacniacza sygnałów radiowych, w szczególności radia CB.

Obwody zasilania kostek odprężone są za pomocą kondensatorów elektrolitycznych umieszczonych w ich pobliżu.

Na płytce umieszczono dodatkowo podwójny wzmacniacz operacyjny TL072. Może on być wykorzystany jako mikser, dodatkowy tor wzmocnienia lub element aktywnej regulacji barwy dźwięku.

Nasz moduł ma ostatecznie sześć kanałów, jest to więc druga wersja wzmacniacza wejściowego



Rys. 2. Podstawowy schemat aplikacyjny układu NE542

Tab. 1. Porównanie napięć szumów przy różnych rezystancjach źródła

R źródła	psfometryczne napięcie szumów wejściowych	
	NE542	UL1322
0Ω	0,475μV	0,67μV
200Ω	0,49μV	0,68μV
1kΩ	0,56μV	0,75μV
22kΩ	0,68μV	0,88μV
1MΩ	0,68μV	0,88μV

audio opisanego w EP9/94.

Przykłady zastosowania modułu podamy w jednym z najbliższych numerów EP. Przedstawimy kompletny przenośny zestaw nagłośnieniowy zasilany z baterii. W następnej kolejności proponujemy wykonanie prostego miksera o dobrych parametrach elektroakustycznych.

W modelu pokazanym na fotografii jako US1 zastosowano układ NE542 firmy Signetics (filia Philipsa), a jako US2 polski odpowiednik tego układu - UL1322.

W tabeli 1 przedstawiono zmierzone przy różnych rezystancjach źródła psfometryczne napięcie szumów odniesione do wejścia. Jak widać, krajowa kostka ma szumy większe o prawie 3 dB, natomiast osiągnięta przy 200Ω wartość całkowitego psfometrycznego napięcia szumów wzmacniacza z kostką NE542 (0,49μV) jest zupełnie przyzwoita.

Uzyskaliśmy więc prosty przedwzmacniacz o dobrych parametrach szumowych.

Niemniej jednak nawet kostka NE542 przy takiej rezystancji ma szumy mniej więcej dwukrotnie większe niż szumy termiczne rezystancji źródła.

Wcześniej mówiliśmy, że układ najlepiej się zachowuje przy rezystancji źródła w granicach 20kΩ. Nasz mikrofon ma tylko 200Ω, niektóre popularne mikrofony mają wprawdzie oporność 700Ω, ale ogólnie są one gorsze...

A może zastosować transformator?

Jak wiadomo, niektóre mikrofony mają wbudowany transformator podwyższający. Tonsil produkuje też kable mikrofonowe z transformatorem (a może transformatory z kablem...).

Jeśli przekładnia takiego transformatora wynosi 1:10, to mamy proste rozwiązanie. Ponieważ rezystancja transformuje się proporcjonalnie do drugiej potęgi przekładni, więc rezystancja transformatora i mikrofonu (200Ω), widziana od strony wejścia wzmacniacza, będzie równa:  
 $(10)^2 \times 200\Omega = 20k\Omega (!)$

Znaleźliśmy więc prostą drogę do zmniejszenia szumów!

Przy takiej rezystancji źródła widzianej od strony wejścia wzmacniacza w całkowitym szu-

Tab. 2. Porównanie szerokości pasma przenoszenia transformatora dla różnych wartości Robc

Robc	fd(-3dB)	maksymalne podbicie	fg(-3dB)
1MΩ	17,5Hz	+5,1dB przy 20kHz	24kHz
100kΩ	12,5Hz	+1,6dB przy 16kHz	30kHz
22kΩ	8,9Hz	charakterystyka płaska	24kHz

Tab. 3. Wpływ Cobc na górną częstotliwość graniczną

Cobc	maksymalne podbicie	fg(-3dB)
120pF	+2,7dB przy 14,5kHz	24,3kHz
270pF	+1,9dB przy 10,6kHz	18,2kHz
390pF	+1,3dB przy 8,4kHz	15,6kHz

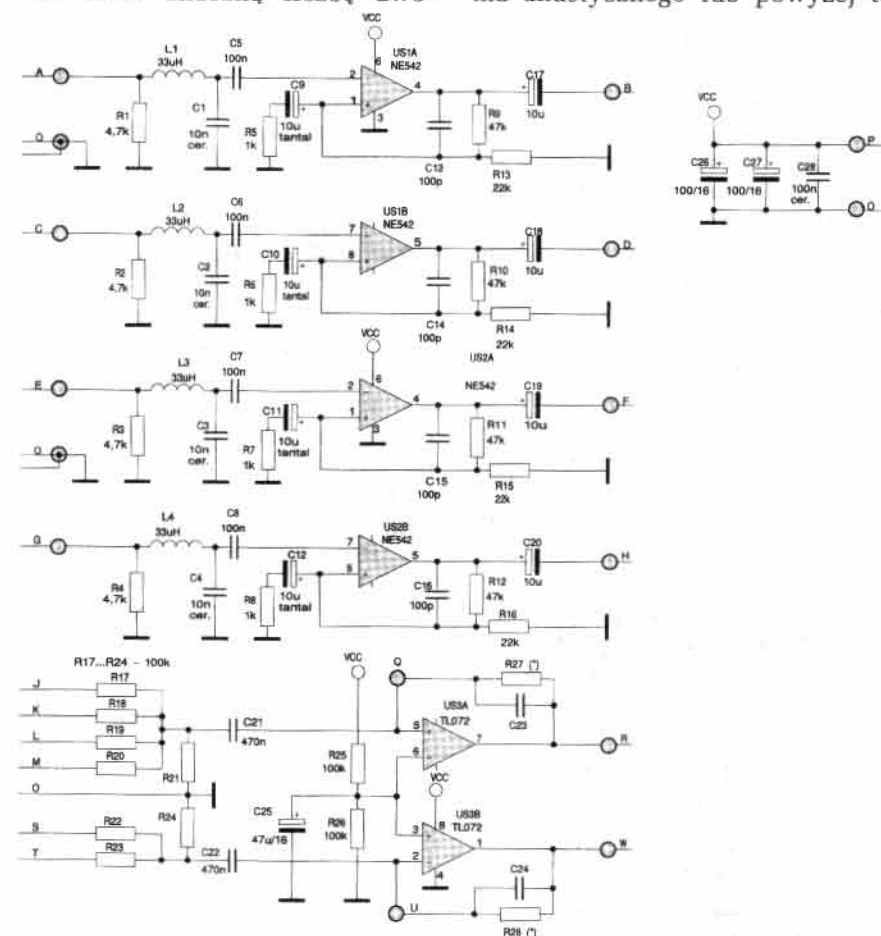
Tab. 4. Parametry przedwzmacniacza w zależności od wartości elementów R1, C1

R1	C1	maksymalne podbicie	fg(-1dB)	fg(-3dB)
100kΩ	120pF	+0,9dB	20kHz	24,3kHz
100kΩ	270pF	+0,8dB	15,3kHz	18,5kHz

mie dominować będzie szum termiczny tejże rezystancji. Otrzymamy wzmacniacz o współczynniku szumów F bliskim 0dB.

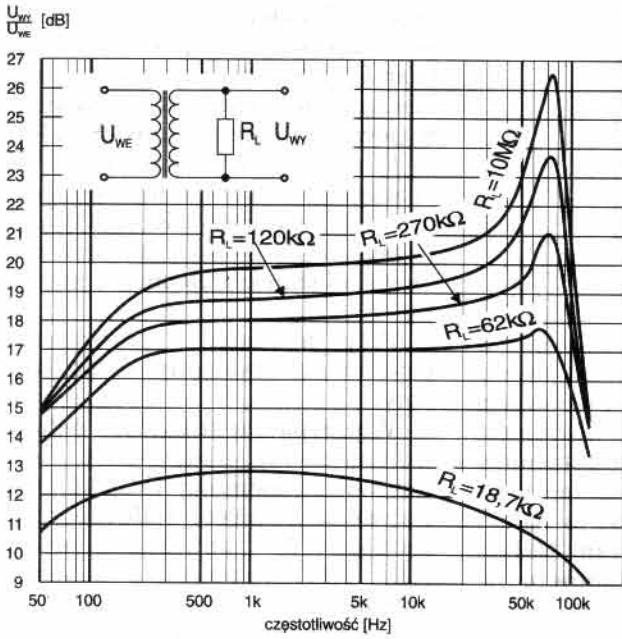
W praktyce sprawa jest nieco bardziej złożona. Transformator nie jest elementem idealnym. Dla osiągnięcia odpowiednio niskiej dolnej częstotliwości granicznej uzwojenie niskoomowe, a tym bardziej uzwojenie wysokoomowe, musi mieć znaczną liczbę zwo-

jów. Uzwojenia będą więc mieć znaczną pojemność. Dla prawidłowej pracy takiego transformatora niezbędne byłoby obciążenie obu stron odpowiednimi rezystancjami dopasowania. Gdy nie zastosuje się takiej rezystancji obciążenia, to wskutek występującego rezonansu wystąpi znaczne podbicie charakterystyki przenoszenia w zakresie górnych częstotliwości pasma akustycznego lub powyżej te-

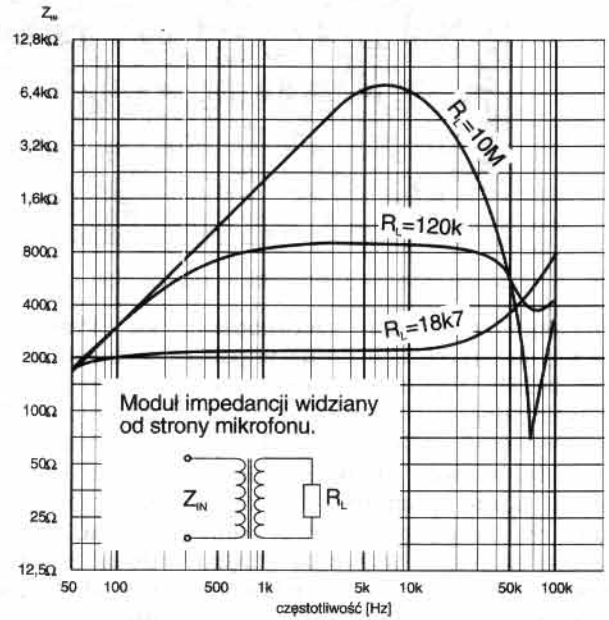


Rys. 3. Schemat elektryczny modułu przedwzmacniacza mikrofonowego





Rys. 4. Charakterystyka przenoszenia transformatora mikrofonowego



Rys. 5. Moduł impedancji widziany od strony mikrofonu

go pasma. Z drugiej strony, zastosowanie rezystancji dopasowania (200Ω, 20kΩ) zmniejszy realnie uzyskaną przekładnię o 6dB (dwukrotnie).

Na rysunkach 4 i 5 pokazano realnie uzyskaną przekładnię i moduł impedancji (widziany od strony mikrofonu) transformatora od mikrofonu MDO-IX przy różnych wartościach rezystancji zamykającej uzwojenie wysokoomowe.

Analogiczne, choć nieco lepsze wyniki uzyskano mierząc wspomniany transformator na kablu mikrofonowym. Egzemplarz transformatora z kablem przebadany przez autora miał przekładnię 1:8. Ponieważ w tym przypadku indukcyjność była większa niż w transformatorze od mikrofonu MDO-IX, pasmo sięgało w dół do częstotliwości poniżej 20Hz. Uzyskane wyniki przy rezystancji generatora równej 200Ω i przy trzech różnych rezystancjach obciążających uzwojenie wysokoomowe podane są w tabeli 2.

Taki transformator z kablem

podłączono wprost do wejścia układu NE542 i wzmacniacz wyglądał wtedy jak na rysunku 6. Dodatkową ceną zaletą takiego rozwiązania jest uzyskanie w pełni symetrycznego wejścia mikrofonowego. Ma to duże znaczenie dla redukcji zakłóceń zewnętrznych, w szczególności przydźwięku sieciowego.

Przed rozpoczęciem prób usunięto dławik, a także rezystor wejściowy R1 i kondensator C1.

Przeprowadzono pomiary tak powstałego przedwzmacniacza. Ponieważ usunięto równoległy rezystor wejściowy więc rezystancja obciążenia wyjścia transformatora była równa rezystancji wejściowej układu scalonego (około 100kΩ).

Następnie dołączono jako C1 kolejno kondensatory o wartości 120pF, 270pF i 390pF. Zmierzono pasmo i stopień podbicia charakterystyki. Wyniki znajdują się w tabeli 3.

Zastosowanie takiego kondensatora jest korzystne z uwagi na filtrację zakłóceń o wyższych czę-

stotliwościach.

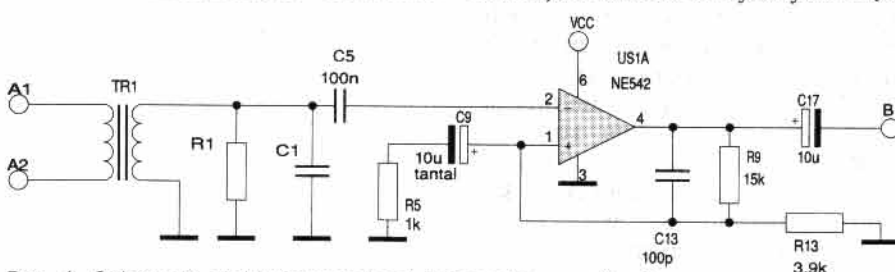
Po analizie tak otrzymanych wyników zastosowano równoległe na wejściu rezystor R1 o wartości 100kΩ i kondensator C1. Zmierzona dolna częstotliwość graniczna równa 30Hz wynika nie z właściwości transformatora, tylko pojemności sprzęgających układu. Natomiast przebieg charakterystyki w zależności od zastosowanych elementów przedstawiono w tabeli 4.

We wzmacniaczu mikrofonowym całkowicie wystarczy pasmo sięgające 18,5kHz, więc ostatecznie wybrano wersję drugą. Tak więc w praktyce pojemność obciążająca transformator powinna wynosić 220...330pF.

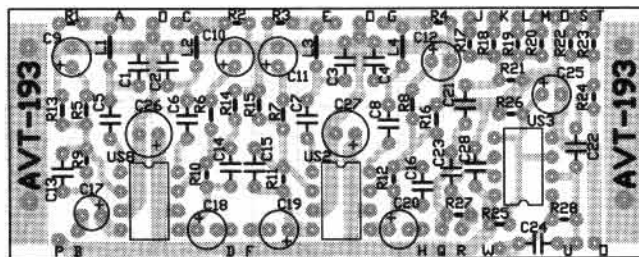
W takim właśnie układzie zmierzono psfometryczne napięcie szumów na wyjściu wzmacniacza przy zwarciu i rozwarciu wejścia (transformatora) oraz z rezystancją 200Ω udającą mikrofon. Całkowite wzmocnienie wzmacniacza i transformatora wyniosło 156x. Po podzieleniu zmierzonych napięć przez wartość wzmocnienia uzyskano następujące wartości psfometrycznego napięcia szumów odniesionego do wejścia:

- wejście zwarte ( $R_{źródła}=0\Omega$ ): 0,243μV
- ekwiwalent mikrofonu (200Ω): 0,265μV
- wejście rozwarne: 0,39μV

Należy wziąć pod uwagę, że napięcie nieodłącznego szumu ter-



Rys. 6. Schemat elektryczny przedwzmacniacza mikrofonowego z transformatorem



Rys. 7. Rozmieszczenie elementów na płytce drukowanej

micznego mierzone szerokopasmowo na rezystancji 200Ω w pasmie 20kHz wynosi 0,256μV. Ponieważ mierzyliśmy napięcia psometryczne, a więc uwzględniliśmy właściwości ludzkiego ucha, zatem nasze pomiary dotyczyły nieco węższego pasma. Uzyskane wyniki są mimo wszystko bardzo dobre. Prosty rachunek pokazuje bowiem, że nawet w pasmie 10kHz rezystor 200Ω będzie miał napięcie szumów termicznych 0,181μV.

Tak oto stosując transformator uzyskaliśmy mniejsze szumy, ale charakterystyka częstotliwościowa i fazowa pogorszyła się nieco w stosunku do wzmacniacza bez transformatora.

Zbliżyliśmy się oto w praktyce do granic możliwości.

Wzmacniacza o dużo mniejszych szumach przeznaczonego do pracy z mikrofonem o rezystancji 200Ω po prostu nie da się zbudować. Można jedynie wielkim nakładem środków zmniejszyć szumy jeszcze o jeden, dwa, może trzy decybele. A więcej nic nie da się zrobić, bo nie potrafimy zlikwidować wszechobecnego szumu termicznego pochodzącego z samego mikrofonu.

W naszych rozważaniach zakładaliśmy, że mikrofon szumi tyle co rezystor o wartości 200Ω. Nie jest to do końca prawdą, bo nie uwzględniliśmy szumów własnych mikrofonu wynikających choćby z przypadkowych uderzeń cząstek powietrza w membranę. Należy też wspomnieć, iż mikrofony z wbudowanym wzmacniaczem mogą mieć większy poziom szumów niż zwykle mikrofony dynamiczne.

Ostatecznie więc dochodzimy do wniosku, że do problemu szumów przedwzmacniaczy mikrofonowych trzeba podchodzić ze zrozumieniem całości zagadnienia.

Jak wspomnieliśmy w Notatni-

ku Praktyka, poziom szumów wzmacniacza nie jest ostateczną miarą jakości sprzętu i uzyskanego efektu. W sumie najważniejsze jest uzyskanie dużego stosunku sygnał/szum. Jeśli nie możemy już zmniejszać szumów, to należy szukać innych rozwiązań. Należy do nich użycie mikrofonów o dużej skuteczności. Przy tej samej głośności źródła dźwięku uzyskamy większy sygnał użyteczny.

W wielu sytuacjach nieocenione usługi dają mikrofony o wybitnie kierunkowej charakterystyce (tzw. „maczuga“).

Jak pokazuje praktyka, najprostszym, a jakże skutecznym sposobem zwiększenia stosunku sygnał/szum jest po prostu zbliżenie mikrofonu do źródła dźwięku.

Istnieje jeszcze jeden stosunkowo prosty sposób - można zastosować ekspander (opis modułu z układem NE572 zamieszczony był w EP5/94 i 6/94). Innym sposobem jest użycie układu redukcji szumów typu DNR - wyczerpujący opis takiego układu z kostką LM1894 zamieścimy w jednym z najbliższych numerów EP.

### Montaż i uruchomienie

Montaż podstawowego układu z rysunku 3 można wykonać na płytce drukowanej pokazanej na **rysunku 7**. W przeciwieństwie do wielu poprzednio opisanych modułów audio układ przeznaczony jest tylko do zasilania napięciem pojedynczym.

Układ modelowy przeznaczony jest do wykorzystania w zestawie nagłośnienia zawierającym także moduły wzmacniacza-ogranicznika AVT-180. Wszystkie moduły są tam zasilane napięciem 10...12V.

W innych zastosowaniach wzmocnienie poszczególnych kanałów powinno być większe.

Do zmiany wartości wzmocnienia służą rezystory R5...R8. Należy mieć na względzie, że reak-

tancje kondensatorów C9...C12 przy najniższych częstotliwościach pasma przenoszenia muszą być znacznie mniejsze od rezystancji odpowiednio rezystorów R5...R8.

W zależności od napięcia zasilającego korzystna może się okazać zmiana wartości R13...R16 dla uzyskania na wyjściu jak największego niezniekształconego sygnału.

Przy montażu i sprawdzaniu modułu nie wystąpiły żadne kłopoty.

W przypadku trudności należy woltmierzem o rezystancji wejściowej co najmniej 1MΩ kolejno sprawdzić napięcia stałe na nóżkach 1 i 8 - powinno wynosić 1,2... 1,4V. Takie samo napięcie powinno być też na nóżkach 2 i 7, natomiast wartość napięcia wyjściowego wynika ze stosunku rezystorów w gałęzi sprzężenia zwrotnego i powinna być zbliżona do Vcc/2.

**Piotr Górecki, AVT**

### WYKAZ ELEMENTÓW

#### Rezystory

- R1...R4: 4,7kΩ (2,2...10kΩ)
- R5...R8: 1kΩ
- R9, R12: 47kΩ
- R13, R16: 22kΩ
- R17...R26: 100kΩ
- R27, R28: 100kΩ (według potrzeb)

#### Kondensatory

- C1...C4: 10nF, ceramiczny
- C5...C8: 100nF
- C9...C12: 10μF/10V
- C13...C16: 100pF, nie stosować
- C17...C20: 10μF/16V
- C21, C22: 470nF
- C23, C24: 15pF (według potrzeb)
- C26, C27: 100μF/16V
- C28: 100nF, ceramiczny

#### Półprzewodniki

- US1, US2: NE542 Signetics
- US3: TL072 (TL082)

#### Różne

- L1...L4: 22...33μH