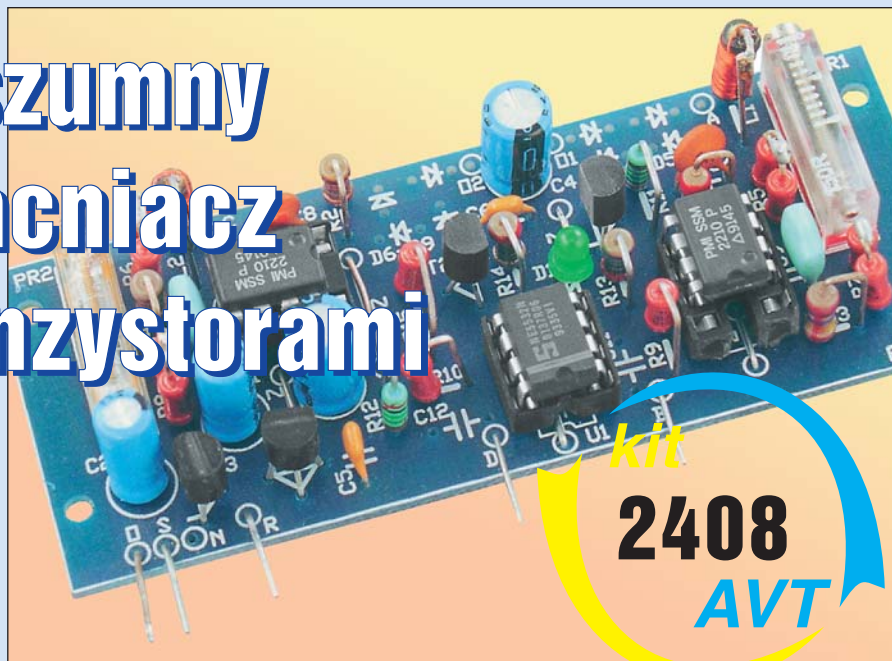




# Ultraniskoszumny przedwzmacniacz audio z tranzystorami SSM-2210



**Wielu Czytelników EdW żywo interesuje się wszelkimi układami audio wysokiej jakości. Do tej pory zostały zaprezentowane liczne moduły tego typu. Zaproponowano użycie w nich różnych układów scalonych, począwszy od NE5532, NE542 (UL1322), SSM2016 aż do SSM2017. Niniejszy projekt przedstawia jeszcze jedno bardzo interesujące rozwiązanie, zawierające specjalne ultraniskoszumne tranzystory. Kto nie zdecydował się na zakup specjalnych tranzystorów, wykona wersję uproszczoną, stosując powszechnie dostępne, niskoszumne tranzystory m.cz.**

Od wielu lat znana jest opinia, że najmniej szumiące przedwzmacniacze zbudowane są przy użyciu tranzystorów, a nie układów scalonych. W takim poglądzie jest dużo prawdy, choć trzeba przyznać, iż obecnie różnica między najlepszymi wzmacniaczami tranzystorowymi i scalonymi jest znacznie mniejsza niż przed laty.

Nie ulega jednak wątpliwości, że elektronik interesujący się układami audio powinien wykonać przynajmniej jeden tranzystorowy przedwzmacniacz wysokiej klasy. Dobrą okazją ku temu będzie niniejszy projekt i dodatkowe informacje zawarte w artykule.

Na początku należy przypomnieć, że o całkowitych szumach układu decydują jedynie szumy stopnia wejściowego. Jakość dalszych stopni nie ma praktycznie żadnego wpływu na poziom szumów, a jedynie wpływa na inne parametry, takie jak zawartość zniekształceń czy szybkość. W literaturze najczęściej można spotkać przykłady przedwzmacniaczy zawierających specjalnie selekcyjonowane, ultraniskoszumne tranzy-

story w stopniu wejściowym oraz wzmacniacz operacyjny. Znacznie rzadziej spotyka się przedwzmacniacze składające się wyłącznie z tranzystorów.

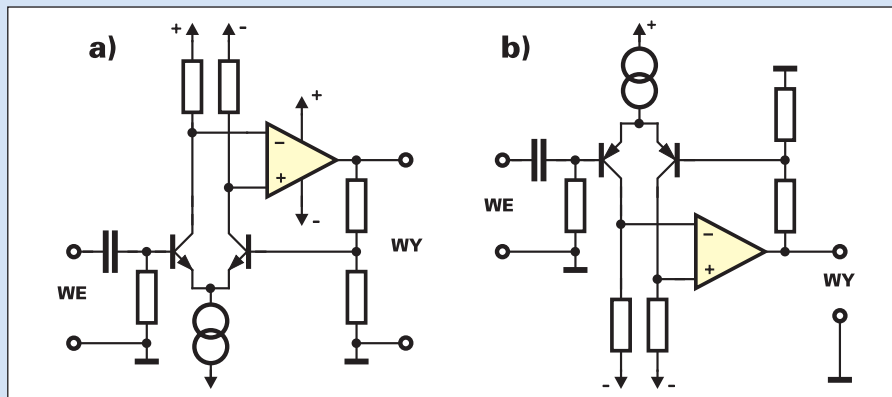
Uproszczony układ "tranzystorowo-operacyjny" pokazany jest na rysunku 1a. Ponieważ tranzystory PNP szumią odrobinę mniej, spotyka się również konfigurację z rysunku 1b. W takich układach można stosować pary dowolnych tranzystorów niskoszumnych, jednak w praktyce stosowano tu znane od lat znakomite tranzystory firmy PMI (obecnie wchodzi w skład Analog Devices) z rodziny MAT. Rodzina zawiera pary (MAT-01...MAT-03) i czwórkę (MAT-04). Najmniej szumiące tranzystory MAT-02 (NPN) i MAT-03 (PNP) mają gęstość szumów napięciowych  $1nV/\sqrt{Hz}$ . Obecnie tranzystory te zostały zastąpione jeszcze lepszymi, o oznaczeniach SSM-2210 (NPN) i SSM-2220 (PNP), których gęstość szumów wynosi odpowiednio  $0,8nV/\sqrt{Hz}$  i  $0,7nV/\sqrt{Hz}$ .

Problem szumów w układach tranzystorowych jest dość złożony. W konkretnym ukła-

dzie szumy zależą nie tylko od typu tranzystora, ale także od jego prądu kolektora oraz od rezystancji źródła sygnału. Przeciętny hobbysta nie zaprojektuje optymalnego układu bez znajomości wielu szczegółowych parametrów. Niemniej jednak podane informacje wskazują, że wymienione tranzystory SSM-2210 i SSM-2220 umożliwiają zbudowanie wzmacniacza o szumach jeszcze mniejszych niż słynny już układ scalony SSM-2017 ( $0,9...1nV/\sqrt{Hz}$ ).

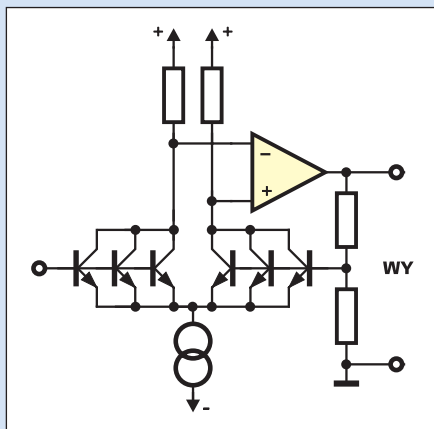
Wspomniane tranzystory pozwalają zbudować nawet przedwzmacniacze o szumach poniżej  $0,5nV/\sqrt{Hz}$ , co jest niewykonalne z użyciem jakiegokolwiek dostępnego dziś układu scalonego. Sposób na zmniejszenie szumów jest bardzo prosty: należy równolegle połączyć kilka par tranzystorów. Ideę pokazuje w uproszczeniu rysunek 2. Przy zastosowaniu dwóch par tranzystorów szumy zmniejszą się o  $\sqrt{2}$ , czyli 1,41, a przy trzech parach - o  $\sqrt{3}$ , czyli 1,73. Teoretycznie przy użyciu trzech elementów SSM-2220 o szumach  $0,7nV/\sqrt{Hz}$  uzyskany szum wyniósłby tylko  $0,4nV/\sqrt{Hz}$ . W rzeczywistości szum mógłby być nieco większy z kilku przyczyn.

Rys. 1 Układy podstawowe

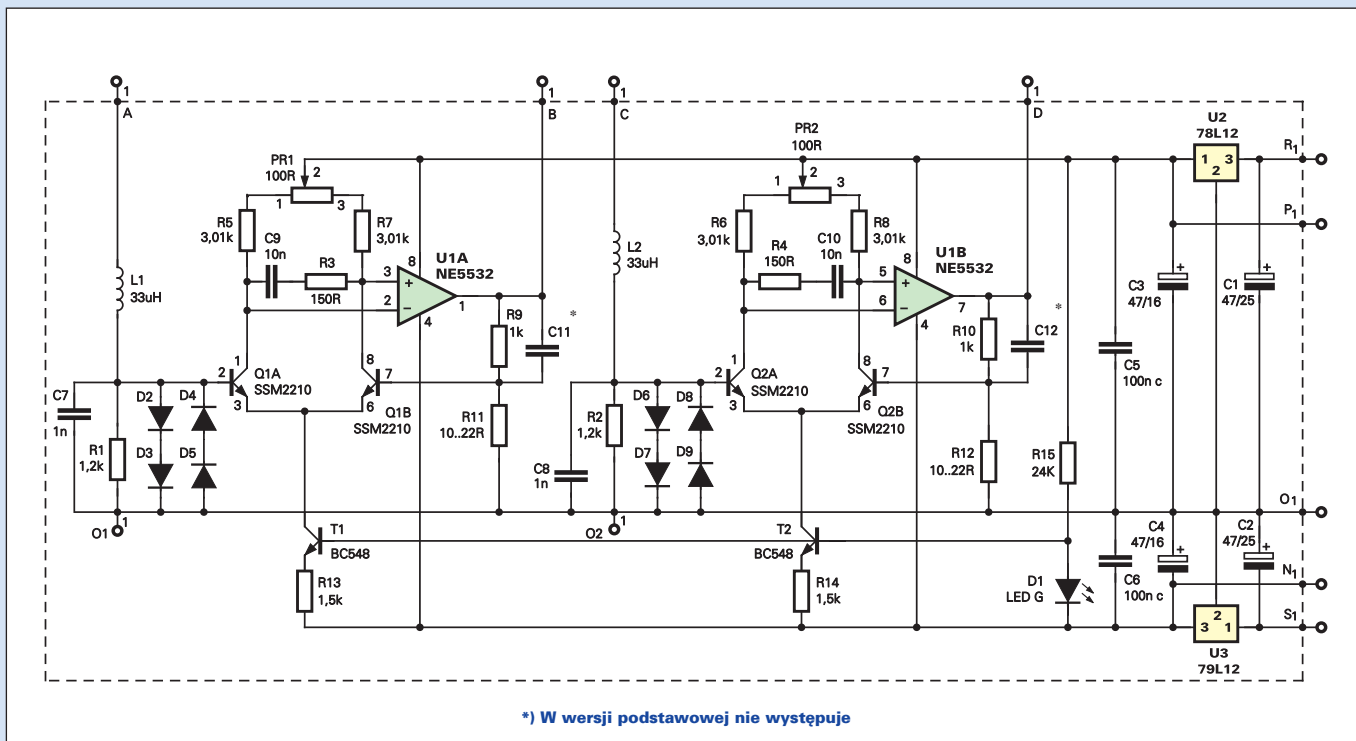


Trzeba tu wyraźnie zaznaczyć, że zalety takich skrajnie niskoszumnych wzmacniaczy dadzą się odczuć dopiero przy małej rezystancji źródła sygnału. Przy większych rezystancjach szumy własne źródła (np. mikrofonu) okażą się większe niż szumy przedwzmacniacza. Dlatego układy zbudowane według rysunku 2 warto budować jedynie wtedy, gdy źródło sygnału ma rezystancję rzędu 10...20Ω. Tymczasem typowy mikrofon dynamiczny dobrej klasy ma rezystancję 200Ω. Przy takiej rezystancji i wynikających z niej szumach całkowicie wystarczy układ według rysunku 1, ponieważ i tak szumy własne mikrofonu będą większe niż szumy przedwzmacniacza. (Osoby, które są zainteresowane szczegółami, powinny z pomocą miniankiety "zamówić" artykuł(-y) na temat szumów.)

Rys. 2 Wersja wzbogacona



Rys. 3 Schemat ideowy



\*) W wersji podstawowej nie występuje

## Opis układu

Schemat ideowy proponowanego układu pokazany jest na **rysunku 3**. Moduł jest zasilany napięciem symetrycznym. W zasadzie można nie stosować stabilizatorów U2, U3 i podać napięcie zasilające bezpośrednio na punkty P, O, N. Jednak w przypadku niskoszumnych układów warto stabilizować i filtrować napięcie zasilające, dlatego nie należy rezygnować ze stabilizacji. Napięcie zasilające, podawane na punkty R, O, S, powinno wynosić  $\pm 14... \pm 25V$ .

Moduł zawiera dwa identyczne torze wzmacnienia oraz obwody zasilające. Kluczowymi elementami w każdym torze jest para tranzystorów SSM-2210 oraz popularny wzmacniacz operacyjny NE5532. Działanie układu zostanie omówione w oparciu o tor z elementami Q1, U1A. Układ ma wejście niesymetryczne. Elementy L1, C7 tworzą filtr, zapobiegający przenikaniu do układu zakłóceń o częstotliwościach radiowych. Rezystor R1 określa rezystancję wejściową układu. Diody D2...D5 zabezpieczają przed pojawieniem się na wejściu dużych sygnałów, na przykład zakłóceń impulsowych, które w skrajnych przypadkach mogłyby uszkodzić lub pogorszyć parametry tranzystorów wejściowych Q1.

Para różnicowa Q1A, Q1B zasilana jest ze źródła prądowego zawierającego elementy T1, R13 oraz diodę D1. Prąd każdego z tranzystorów Q wynosi około 0,5mA. Obciążeniem są rezystory R5, R7. Helitrim PR1 umożliwia symetryzację całego układu. Elementy R3, C9 stanowią obwód kompensacji

częstotliwościowej. Bez nich układ mający ogromne wzmocnienie mógłby się wzbudzać.

Symetryczny sygnał z kolektorów tranzystorów Q1 jest podawany na wejścia wzmacniacza operacyjnego NE5532. Ten układ, przeznaczony do zastosowań audio, zapewnia wystarczającą szybkość i niewielkie zniekształcenia.

Sygnał z wyjścia podawany jest na bazę Q1B przez dzielnik R9, R11 ustalający wzmocnienie przedwzmacniacza. Przewidziano także miejsce na dodatkowy kondensator C11, który w wersji podstawowej nie będzie stosowany. Mógłby być potrzebny w przypadku modyfikacji układu lub zastosowania innych elementów. Stosując C11 należy pamiętać, że stała czasowa R9C11 wyznacza górną częstotliwość graniczną.

Działanie układu jest w sumie bardzo proste: tranzystory Q1 i układ U1A tworzą "superwzmacniacz operacyjny", pracujący w konfiguracji nieodwracającej, którego wypadkowe wzmocnienie wyznacza dzielnik R9, R11.

Jak wspomniano wcześniej, właściwości szumowe przedwzmacniacza określa przede wszystkim para tranzystorów wejściowych. Specjalne tranzystory SSM teoretycznie umożliwiają obniżenie szumów do teoretycznej granicy szumów cieplnych źródła sygnału. W rzeczywistości ze względu na szumy użytych rezystorów i niedoskonałe tłumienie tętnień zasilania wypadkowe szumy będą trochę większe.

Budując układ trzeba zwrócić szczególną uwagę na potencjalne źródła szumów. Właśnie dlatego w układzie przewidziano lokalne

stabilizatory U2, U3. Filtrowanie i stabilizowanie znacznie zredukuje przenikanie szumów z szyn zasilania na wyjście. Kto chciałby, może jeszcze bardziej stabilizować napięcie, używając lepszych stabilizatorów LM317L (dodając po dwa rezystory ustalające napięcie).

Wpływ na szumy mieć będą także rezystory. Jak podano w wykazie elementów, większość rezystorów to precyzyjne, 1-procentowe rezystory metalizowane. Nie znaczy to, że najważniejsza jest wartość rezystancji i tolerancja. W rzeczywistości tolerancja nie ma znaczenia, i na przykład w roli R1 zamiast rezystora o wartości 1,2kΩ (nie ma takiej wartości w szeregu E96) można zastosować jakikolwiek o zbliżonym nominalnie, np. 1,21kΩ, 1,33kΩ 1,47kΩ czy 1,05kΩ. Podobnie jest z rezystorem R9 (825Ω...1,54kΩ) czy rezy-

Tamb = 25°C

Tranzystor	SSM-2210	SSM2220
Maksymalny prąd kolektora	20mA	20mA
Dopuszczalne napięcie UCB	40V	36V
Dopuszczalne napięcie UCE	40V	36V
Różnica napięć między tranzystorami	40V	36V
Maksymalna moc strat (Tamb < 70°C)		500mW
Rezystancja termiczna Rthja	110K/W - DIP	
Zakres temperatur pracy	-40...+85°C	-40...+85°C
Wzmocnienie prądowe przy Ic=1mA	typ 605 min 300	typ 165 min 80
Wzmocnienie prądowe przy Ic=10μA	typ 550 min 200	typ 120 min 60
Rozrzut wzmocnienia pary tranzystorów	typ. 0,5% max 5%	typ. 0,5% max 6%
Napięcie niezrównoważenia	typ 10μV max 200μV	typ 40μV max 200μV
Prąd zerowy kolektora	typ 25pA max 500pA	typ 50pA max 400pA
Rezystancja baza-emiter	typ 0,3Ω max 1,6Ω	typ. 0,3Ω

storami R5, R7, które mogą mieć wartość większą, nawet 4,64kΩ. Ważne jest tylko to, by były to dobrej jakości rezystory metalizowane, których szumy są niewiele większe od teoretycznej granicy wyznaczonej przez szum termiczny. Zastosowanie popularnych rezystorów węglowych może radykalnie pogorszyć właściwości szumowe układu.

Także R3, R11, R13 powinny być rezystorami metalizowanymi.

Niektóre źródła zalecają stosowanie w układach ultraniskoszumnych kondensatorów tantalowych w miejsce zwykłych elektrolitów. W opisywanym układzie dotyczy to tylko kondensatorów C3, C4.

Zapewne wielu Czytelników zdecyduje się na nabycie rewelacyjnych, ale i dość drogiej tranzystorów SSM. Inni będą chcieli sprawdzić właściwości tego układu, zawierającego popularne niskoszumne tranzystory, dostępne w każdym sklepie. Nic nie stoi na przeszkodzie, by zamiast scalonej pary tranzystorów SSM-2210 zastosować parę zwykłych tranzystorów typu BC413, BC414, BC109, BC239, BC549, BC550, itd. Dobrze byłoby dobrać pary tranzystorów o w miarę jednakowych parametrach, choćby mierząc współczynnik wzmocnienia za pomocą multimetru. Nie jest to konieczne i można zastosować jakiegokolwiek dwa niskoszumne tranzystory NPN, licząc się z pogorszeniem parametrów.

Ponieważ tranzystory SSM-2210 bardzo zwiększyłyby cenę zestawu, nie ma ich w kicie AVT-2408. Kit zawiera popularne niskoszumne tranzystory BC414, BC549 lub

podobne. Chętni mogą zamówić SSM-2210 oddzielnie.

### Tranzystory

Pary tranzystorów SSM-22X0 znakomicie nadają się nie tylko do przedwzmacniaczy audio, ale także do budowy różnego rodzaju wzmacniaczy pomiarowych, źródeł prądowych, zwierciadeł prądowych oraz układów logarytmujących. Ponieważ wielu Czytelników zechce zastosować znakomite pary tranzystorów SSM-22X0 w takich aplikacjach, poniżej podane są podstawowe informacje o tych podzespołach. **Rysunek 4** pokazuje układ wyprowadzeń elementów SSM-2210 i SSM-2220. Warto również wiedzieć, że układ SSM-2210 jest odpowiednikiem LM394.

Podstawowe dane tranzystorów podane są w tabeli.

Karty katalogowe, dostępne m. in. w Internecie na stronie Analog Devices (www.analog.com), zawierają szereg dalszych informacji, w tym wiele wykresów.

Mniej zaawansowani nie muszą wgłębiać się w tajniki wszystkich parametrów. Najważniejsze jest, że oba tranzystory są niemal identyczne, nawet tak "kapryśny" parametr, jak współczynnik wzmocnienia prądowego ma praktycznie jednakową wartość. Tranzystory NPN mają dużą wartość współczynnika wzmocnienia prądowego: aż 600 przy 1mA, a przy 10μA jeszcze 120. Bardzo mała rezystancja rozproszona bazy gwarantuje logarytmiczną zależność napięcia od prądu w zakresie co najmniej do 1mA.

### Montaż i uruchomienie

Moduł wzmacniacza można zmontować na płytce drukowanej, pokazanej na **rysunku 5**. Montaż jest klasyczny i nie powinien sprawić trudności także mniej zaawansowanym. Nabywcy kitu AVT-2408 w miejsce Q1, Q2 wlutują klasyczne tranzystory. Dla wygody poszczególne punkty oznaczono literami C, B, E. Zamiast na stałe lutować tranzystory, można zastosować podstawki, które przydadzą się podczas eksperymentów z różnymi

## Wykaz elementów

### Rezystory

R1,R2	.....1,21kΩ 1% metalizowany
R3,R4	.....150Ω metalizowany
R5-R8	.....3,01kΩ 1% metalizowany
R9,R10	.....1kΩ 1% metalizowany
R11,R12	.....10...22Ω 1% metalizowany
R13,R14	.....1,5kΩ metalizowany
R15	.....24kΩ
PR1,PR2	.....100Ω helitrim

### Kondensatory

C1,C2	.....47μF/25V
C4,C3	.....tantalowe 47μF/16V
C5,C6	.....100nF ceramiczny
C7,C8	.....1nF ceramiczny
C9,C10	.....10nF foliowy
C11,C12	.....nie montować

### Półprzewodniki

D1	.....LED zielona 3mm
D2-D9	.....1N4148
Q1,Q2	.....* SSM2210 (patrz uwaga)
T1,T2	.....BC548
U1	.....NE5532
U2	.....78L12
U3	.....79L12

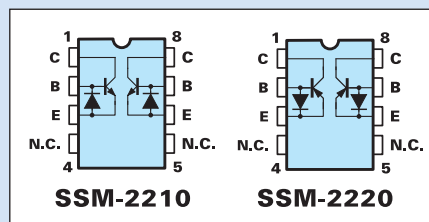
### Pozostałe

L1,L2	.....dławik 33μH (15...68μH)
-------	------------------------------

### Uwaga!

W zestawie AVT-2408 zamiast tranzystorów SSM-2210 występują cztery tranzystory niskoszumne (BC413, BC414, BC109, BC549, BC550). Tranzystory SSM-2210 można zamówić oddzielnie w Dziale Handlowym AVT lub u dystrybutora Analog Devices.

**Komplet podzespołów z płytką jest dostępny w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-2408**

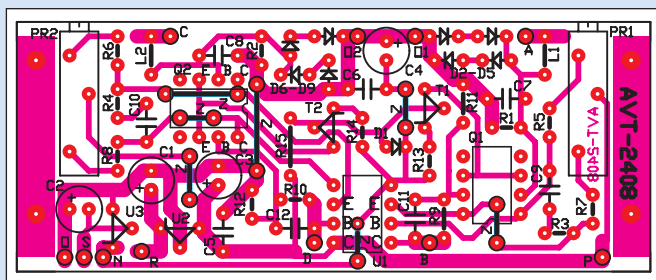


Rys. 4

tranzystorami oraz umożliwią szybką wymianę tranzystorów na układ SSM-2210.

Po zmontowaniu całości, a przed włożeniem Q1, Q2 warto sprawdzić, czy napięcie zasilające wynosi  $\pm 12V$ . Po skompletowaniu układu wzmacniacz jest gotowy do pracy. Jediną regulacją jest ustawienie na wyjściach (punkty B, D) za pomocą PR1 i PR2 napięcia stałego równego zeru (z dokładnością do kilkunastu miliwoltów).

Układ zmontowany ze sprawnych elementów będzie od razu działał poprawnie.



**Rys. 5 Schemat montażowy**

Stopień trudności projektu (dwie gwiazdki) absolutnie nie jest związany z montażem. Zmontować i uruchomić układ może każdy. Dwie gwiazdki wskazują, że moduł jest przeznaczone dla bardziej zaawansowanych elektroników, którzy potrafią go dobrze zagospodarować. Jak wspomniano, zalety układu dadzą o sobie znać jedynie w przypadku współpracy ze źródłem o rezystancji wewnętrznej poniżej  $1k\Omega$ .

## Możliwości zmian

Zaprezentowany układ daje znakomitą okazję do eksperymentów. Można na przykład na „własne uszy” sprawdzić wpływ rezystancji źródła. Do wyjścia opisanego przedwzmacniacza należy dołączyć jakiś czuły wzmacniacz mocy i głośnik, a następnie sprawdzać, jak zmieniają się szумы w głośniku. Najpierw dla pewności należy sprawdzić szумы własne i przydźwięk wzmacniacza mocy przy zwarcii jego wejścia. Następnie należy sprawdzić szумы własne przedwzmacniacza przy zwarcii wejścia. Potem należy rozwrzeć wejście i sprawdzić, o ile wzrośnie szum (wskutek obecności rezystancji R1, R2). A jaki będzie po dołączeniu źródła sygnału?

Można zamienić rezystory metalizowane na zwykłe, węglowe, zasilić układ napięciem niestabilizowanym i sprawdzić, jak zmieni się poziom szumów. Warto także sprawdzić, na ile szумы zależą od prądu pracy tranzystorów. W tym celu można zmieniać wartość R13, R14 w szerokich granicach  $150\Omega \dots 15k\Omega$ . Może się okazać, że przy zwiększeniu prądu tranzystora do  $1 \dots 2mA$  szумы jeszcze trochę się zmniejszą. Przy takich eksperymentach ostatecznym wskaźnikiem będzie głośnik i ucho. Nie ma sensu próba pomiaru napięcia szumów na wyjściu przedwzmacniacza czy wzmacniacza zwykłym miernikiem. Miernik nie tylko nie zmierzy wszystkich składowych z pasma akustycznego, ale także nie uwzględni charakterystyki fizjologicznej ucha. Do takich pomiarów potrzebny byłby psfometr.

Wyniki takich eksperymentów mogą być i najprawdopodobniej będą zaskakujące. Tym bardziej warto je przeprowadzić, by bliżej poznać problem szumów i pozbyć się fałszywych wyobrażeń.

**Piotr Górecki  
Zbigniew Orłowski**