



# „Diamantowy” bufor słuchawkowy

W Internecie można znaleźć wiele projektów wysokiej jakości wzmacniaczy słuchawkowych. Większość z nich to dosyć skomplikowane układy, bazujące na rozmaitych, mniej i bardziej interesujących topologiach, posiadających znaczne wzmocnienia napięciowe, wynoszące najczęściej od 2 do 10.

W wielu przypadkach sygnał audio pochodzi z odtwarzacza CD/DVD lub komputera. Taki sygnał ma duże napięcie, często przekraczające 1Vsk (czyli 2,83Vpp). Dla większości popularnych słuchawek (32-omowych) oznacza to moc wynoszącą około  $P=U^2/R=1V/32\Omega=31mW$ . Przy efektywności słuchawek na poziomie 95dB/mW taka moc oznacza wzrost natężenia dźwięku o około 15dB (względem 1mW), więc uzyskać można bardzo duże natężenie dźwięku rzędu 110dB. Słuchanie głośniejszej muzyki jest już niebezpieczne dla słuchu.

Jak widać na tym prostym przykładzie, dla słuchawek można zastosować bufor o wzmocnieniu 1 (0dB). Dodatkowe wzmocnienie sygnału 10x, 5x czy nawet 3x, najczęściej jest niepotrzebne. Dodatkowo konstrukcja wzmacniacza o wzmocnieniu napięciowym powyżej jedności wymusza stosowanie bardziej skomplikowanych układów i większej liczby stopni wzmacniacza, co często powoduje zwiększenie zniekształceń.

Z tych względów zdecydowaliśmy się na zaprojektowanie bufora o wzmocnieniu 1x. Część osób zapyta: po co stosować taki bufor, jeśli większość wyjść ma dostateczną wydajność prądową, żebyysterować słuchawki?

Teoretycznie tak. Jednak z pomiarów, które przeprowadziliśmy, wynika, że takie wyjścia często mają niewielkie zniekształcenia przy obciążeniu rezystancją powyżej 1k $\Omega$ , natomiast zniekształcenia te bardzo zwiększają się przy obciążeniach niskimi impedancjami, jakimi charakteryzują się współczesne słuchawki (standardowo 16–100 $\Omega$ ).

Podczas projektowania układu przyjęte zostało kilka założeń dotyczących parametrów układu, które w większości udało się zrealizować:

**koszt** – do 30 PLN za kanał,

**rezystancja wyjściowa:**  $R_{wy} < 1\Omega$ ; mała rezystancja wyjściowa oznacza współczynnik tłumienia co najmniej 32 (przy słuchawkach 32 $\Omega$ )

**pasmo przenoszenia** (–3dB): 5...100000Hz, żeby zapewnić dobrą odpowiedź impulsową; szersze pasmo najczęściej niczego już nie zmienia, ponieważ nawet przetworniki cyfrowo-analogowe (w odtwarzaczach lub kartach dźwiękowych) obsługują tylko dane o częstotliwościach próbkowania do 192kHz, co przekłada się na pasmo sięgające 96kHz.

**zniekształcenia:** każda z harmonicznych powinna mieć amplitudę poniżej –90dB (0,003%) względem napięcia wyjściowego 0,5Vsk i przy obciążeniu 32 $\Omega$ .

**zasilanie:** symetryczne od  $\pm 4V$  do  $\pm 15V$  (znamionowo  $\pm 9V$ ) albo niesymetryczne o wartości 8...24V

**wzmocnienie** napięciowe 0,5...1x.

I wszystko to przy użyciu łatwo dostępnych, popularnych i niedrogich elementów dyskretnych.

## Opis układu

Istnieje kilka powszechnie stosowanych topologii buforów audio. My zdecydowaliśmy się na konstrukcję typu *diamond buffer*, czyli bufor diamentowy. Jest to układ o dwóch stopniach, wykorzystujący dwie pary komplementarnych tranzystorów. W układzie nie ma wprawdzie żadnych diamentów (nieestety), a nazwa jest jedynie nawiązaniem do jeszcze ciekawszego układu opracowanego przez Texas Instruments i określanego mianem „diamentowy tranzystor”.

Wbrew nazwie „diamentowy tranzystor” to nie pojedynczy element, tylko układ scalony. Analizując jego schemat wewnętrzny potraktowany jako tranzystor, możemy wyróżnić w nim trzy wyprowadzenia, odpowiadające elektrodom tranzystora bipolarnego. I właśnie w tym miejscu przejawia się „diamentowość” tego „tranzystora”: prąd może zarówno wpływać, jak i wypływać z każdego wyprowadzenia i nie ma diodowego spadku napięcia między bazą a emiterem. Regulacja wzmocnienia możliwa jest poprzez wymianę tylko jednego rezystora (emiterowego), bez konieczności ingerencji w wartości pozostałych elementów zewnętrznych (jeśli poza obciążeniem, były w ogóle potrzebne!).

Więcej informacji na temat tego niezwykłego układu można znaleźć w nocie katalogowej Burr Browna (obecnie TI) pt. „DIAMOND TRANSISTOR OPA660”, dostępnego m.in. pod adresem:

<http://www.ti.com/lit/an/sboa071/sboa071.pdf>

w skrócie: <http://goo.gl/cxwCGx>.

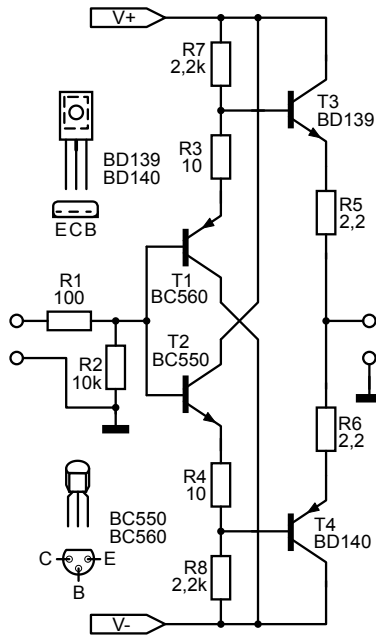
W naszym projekcie raczej nie chcieliśmy wprowadzać globalnej pętli sprzężenia zwrotnego, więc zrezygnowaliśmy z trzeciego stopnia diamentowego tranzystora. Został sam bufor wykonany z elementów dyskretnych. Ze względu na protoplastę tego bufora bardzo często określa się go mianem diamentowego.

Umożliwia on uzyskanie małej zawartości harmonicznych oraz niewielkiej impedancji wyjściowej przy niewielkich prądach spoczynkowych. Od samego początku zdecydowaliśmy się na tranzystory bipolarne, ponieważ ich „komplementarność”, a konkretnie podobieństwo charakterystyk jest znacznie lepsza niż tranzystorów polowych.

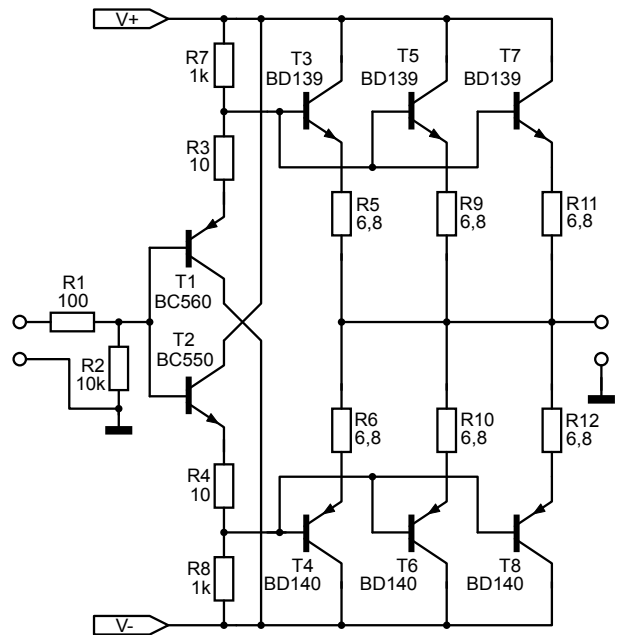
Projekt rozpoczęliśmy od przeprowadzenia symulacji. Umożliwia to bardzo szybkie otrzymanie wyników, łatwość wprowadzania modyfikacji oraz porównania między poszczególnymi wersjami układu.

Zaczelśmy od najprostszego układu, z wartościami elementów dobranymi tak, żeby układ pobierał niewielką moc w spoczynku – **rysunek 1**. Rezystory R7 i R8 tworzą wraz z tranzystorami T1 i T2 dwa wtórnik emiterowe pracujące jako pierwszy stopień. Wartość prądu spoczynkowego w tym przypadku została ustalona na poziomie 3,8mA (zasilanie ±9V). Rezystory R3, R4, R5 i R6 wprowadzają lokalne sprzężenia zwrotne poprawiające liniowość wtórników. Mają one także duży wpływ na stabilność temperaturową wzmacniacza, a ich proporcje ustalają prąd spoczynkowy stopnia wyjściowego (w tym przypadku 12,3mA).

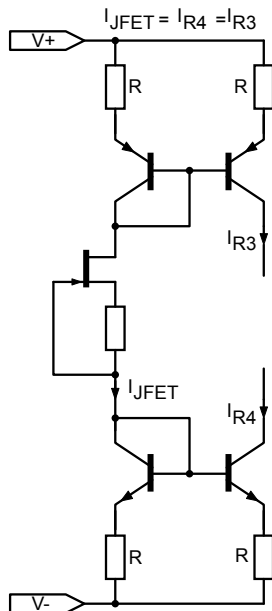
Tranzystory zostały wybrane na podstawie doświadczeń z układami audio. Może nie są to elementy wyszukane, ale przy odpowiedniej aplikacji zapewniają bardzo dobre parametry. Po wykonaniu pierwszych symulacji okazało się, że zawartość harmonicznych jest duża ( $h_2 = -85,5\text{dB}$ ,  $h_3 = -65\text{dB}$ , pozostałe poniżej  $-100\text{dB}$ ). Żeby poprawić parametry, spróbaliśmy zwiększyć głębokość sprzężeń zwrotnych (R3, R4, R5 i R6), przy czym jednocześnie konieczne okazało się zwiększenie wartości rezystorów R7 i R8 do  $10\text{k}\Omega$ , co pozwoliło na utrzymanie podobnego



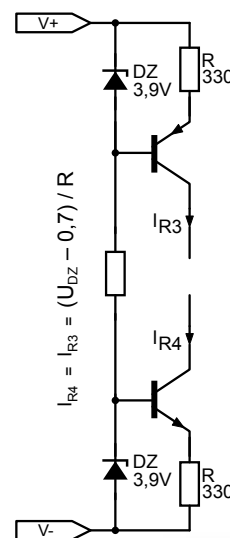
Rys. 1



Rys. 2



Rys. 3



Rys. 4

poboru prądu przez stopień

wyjściowy. Takie działania przyniosły skutek odwrotny do zamierzonego – zawartość harmonicznych wzrosła.

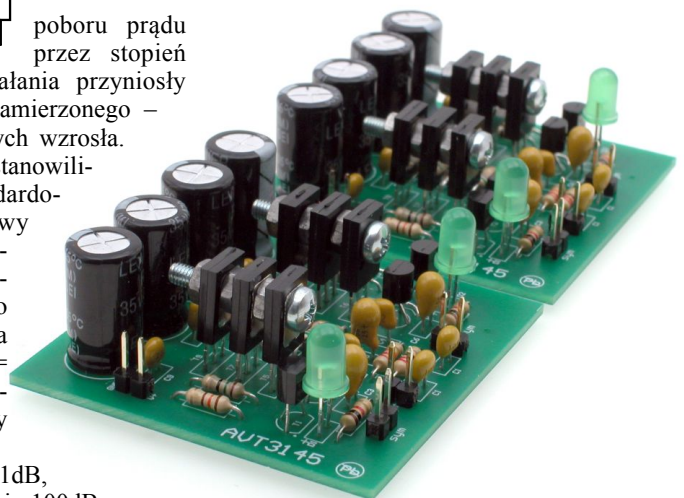
W takiej sytuacji postanowiliśmy zastosować standardowy „sposób” poprawy parametrów – zwiększyliśmy prądy spoczynkowe obu stopni do 8mA i 30mA (topologia bez zmian,  $R7 = R8 = 1\text{k}\Omega$ ). Tym razem wyniki symulacji wyglądały bardzo zachęcająco:

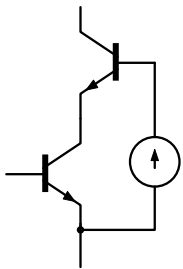
$h_2 = -96,5\text{dB}$ ,  $h_3 = -81\text{dB}$ , pozostałe znowu poniżej  $-100\text{dB}$ .

W celu dalszej poprawy postanowiliśmy zwielfokrotnie tranzystory wyjściowe – **rysunek 2**, co pozwoliło zmniejszyć zmiany wzmocnienia tranzystorów spowodowane zmianami prądu (amplituda zmian prądu zmniejszyła się trzykrotnie).

Ten zabieg wprowadził większy pobór prądu do około 55mA, ale przyniósł kolejną znaczącą poprawę:  $h_2 = -103\text{dB}$ ,  $h_3 = -78\text{dB}$ , pozostałe znowu poniżej  $-100\text{dB}$ . Niestety zmniejszeniu nie uległy ważne, nieparzyste harmoniczne (które są przez ludzki słuch gorzej tolerowane).

Kolejną modyfikacją mającą za zadanie dalszą poprawę parametrów była wymiana rezystorów R7 i R8 na aktywne źródła prądowe.





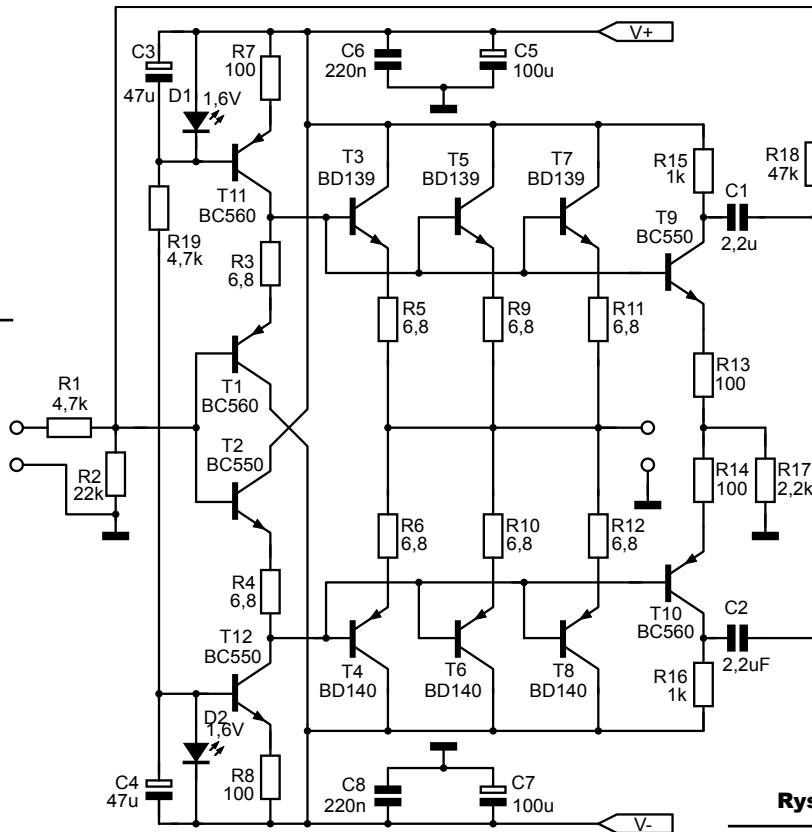
Rys. 5

Najpierw zastosowane było źródło prądowe zbudowane z tranzystora JFET oraz układ dwóch luster prądowych – rysunek 3.

Co ciekawe, taki układ nie poprawił parametrów. Postanowiliśmy jeszcze przetestować bardziej klasyczne źródła wykonane z tranzystorów bipolarnych – rysunek 4.

Po tej modyfikacji zawartość harmonicznych nie zmniejszyła się znacząco. Jednak zdecydowaliśmy pozostawić ten układ, ponieważ eliminuje on wpływ napięcia zasilania na prądy spoczynkowe tranzystorów. Następnie po raz kolejny zwiększony został prąd spoczynkowy obu stopni do 10mA dla pierwszego i 80mA dla drugiego. Zmieniliśmy tylko diody Zenera (źródła prądowych) na diody LED o napięciu przewodzenia około 2V (zielone), co pozwoliło rozszerzyć zakres napięć zasilania w stronę niższych napięć. Całkowity pobór prądu przez jeden kanał osiągnął teraz poziom 100mA. Ta na pozór niewielka zmiana pozwoliła zbliżyć się do docelowych parametrów – zawartość drugiej harmonicznej  $h_2$  obniżyła się do poziomu  $-105\text{dB}$  a  $h_3$  do  $-93\text{dB}$ . Impedancja wyjściowa osiągnęła około  $1,6\Omega$ .

Pomimo osiągnięcia naprawdę dobrych rezultatów postanowiliśmy przeprowadzić jeszcze kilka eksperymentów. Zastosowano układy kaskodowe dla

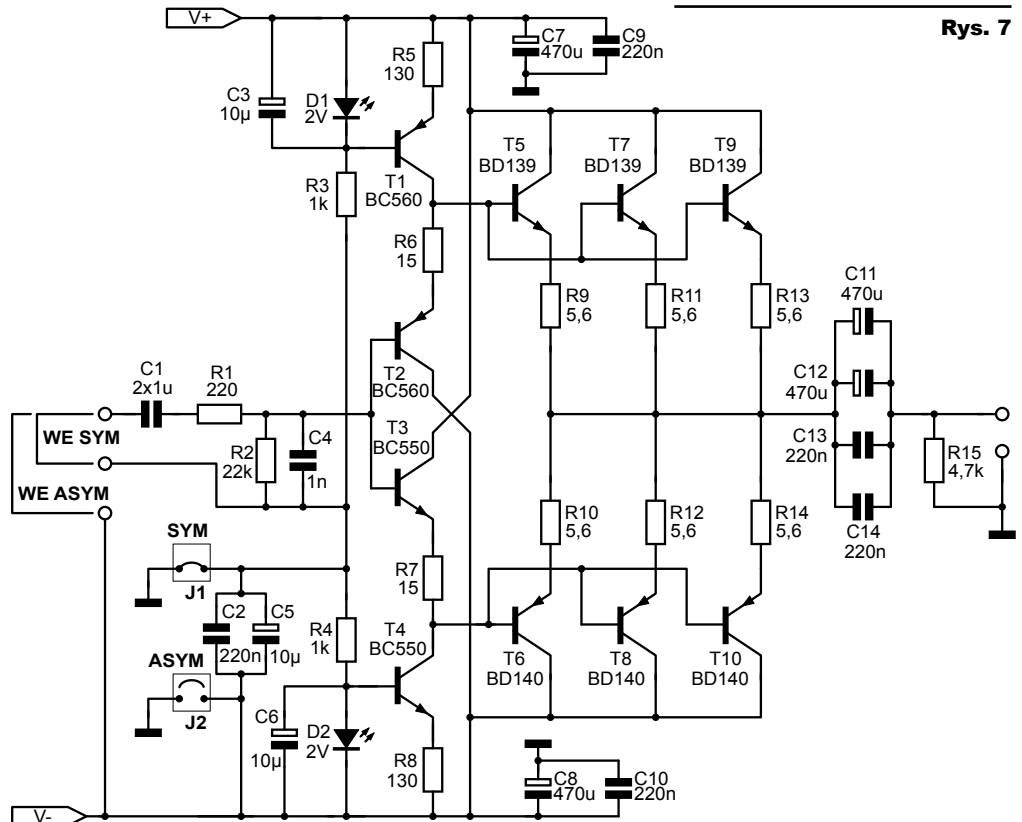


Rys. 6

każdego tranzystora według idei z rysunku 5. Oczywiście zamiast idealnego źródła napięciowego użyte zostały rzeczywiste elementy, np. buforowane napięcia

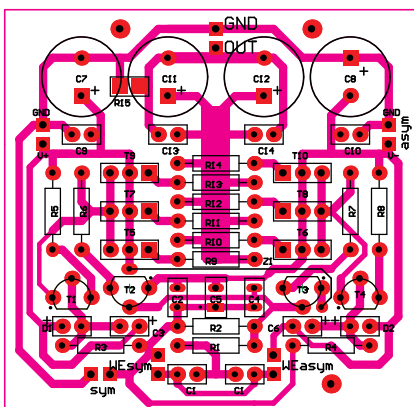
z innych części układu lub odpowiednio zasilane diody Zenera (stabilizacyjne). Niestety nie przyniosło to zauważalnej poprawy dla zawartości harmonicznych przy sygnale testowym 1kHz, a przy 10kHz poprawa była bardzo nieznaczna, więc zrezygnowaliśmy z tego rozwiązania.

Pozostał jeszcze jeden pomysł – sprzężenie zwrotne obejmujące oba stopnie. Jego wprowadzenie okazało się dosyć trudne, ponieważ układ nie ma stopni odwracających fazę (przynajmniej w użytecznym paśmie częstotliwości). Dlatego został dołożony jeden stopień zbudowany z dwóch wzmacniaczy ze wspólnym emiterem i głębokim lokalnym sprzężeniem zwrotnym (R13 i R14) – rysunek 6. Sygnały o odwróconej fazie są dostępne na kolektorach tranzystorów T9 i T10. Są one sumowane na rezystorze R18 i doprowadzane do wejścia bufora. Kondensatory C1 i C2 usuwają niepotrzebną składową stałą. Wartości elementów tego bloku zostały dobrane głównie doświadczalnie. Testowane były



Rys. 7

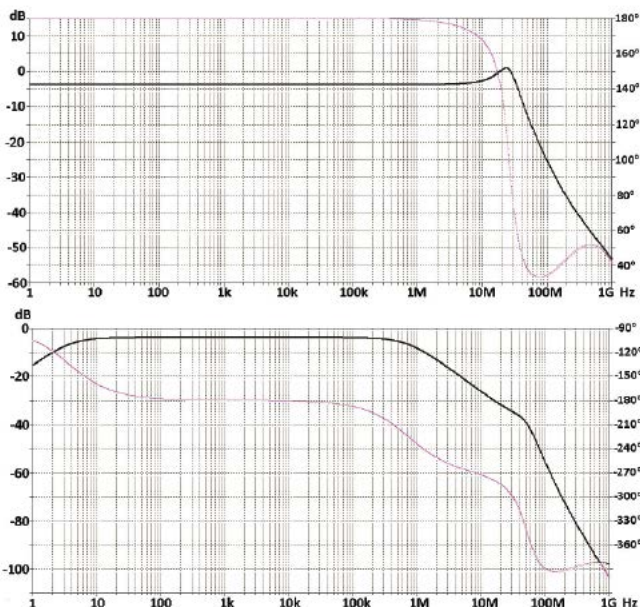
także różne sposoby dostarczania sygnału sprzężenia zwrotnego do pierwszego stopnia. Symulacje wykazały jednak, że poprawa jest znikoma. Dodatkowo fakt obniżenia wzmocnienia napięciowego do około 0,5...0,7 spowodował, że również ta koncepcja nie została zrealizowana w praktyce.



Rys. 10

Po wprowadzeniu kilku drobnych zmian powstał *ostateczny schemat układu*, pokazany na **rysunku 7**.

Symulacje wykazały, że pasmo przenoszenia osiągnęło 36MHz (-3dB). Zbyt duża szybkość układu może powodować problemy związane z zakłóceniami, ponieważ sygnały radiowe mogą się indukować w niektórych częściach układu, być wzmocniane i demodulowane, co może pogarszać parametry w paśmie akustycznym. W celu ograniczenia pasma na wejściu został dodany niewielki kondensator C4, który wraz z R1 tworzy filtr dolnoprzepustowy. Teraz 3-decybelowy spadek wzmocnienia osiągany jest przy 720kHz i nie występuje podbicie. Dodatkowo wejściowe kondensatory separujące składową stałą tworzą z rezystorem R2 filtr górnoprzepustowy o częstotliwości 3,6Hz. Charakterystykę częstotliwościową wzmacniacza przed i po dodaniu kondensatorów C1 i C2 przedstawiają wykresy z **rysunku 8** (węższa różowa linia reprezentuje przesunięcie fazowe).



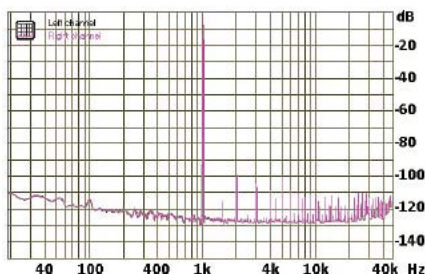
Rys. 8

ponieważ przy całkowitym prądzie spoczynkowym na poziomie 100mA zniekształcenia były nie wyższe niż zniekształcenia własne systemu pomiarowego. W celu uwypuklenia wpływu obciążenia (impedancji słuchawek) prąd spoczynkowy został obniżony do 50mA. Zebrane dane zostały zestawione w **tabeli 1**. Zgodnie z oczekiwaniami pogorszenie parametrów wystąpiło w przypadku obciążenia 30Ω. Z tego powodu przy współpracy

ze słuchawkami o impedancji 32Ω lub mniejszej jest zalecane zwiększenie prądu spoczynkowego do poziomu oszacowanego na podstawie symulacji, czyli około 100mA na kanał. W przypadku słuchawek powyżej 100Ω można pozostać przy niższym poborze prądu.

Zawartość harmoniczných i poziom szumu dla obciążenia 100Ω (50mA) wizualizuje wykres z **rysunku 9**. Poziom odniesienia (dla sygnału 1kHz) wynosi około -4dB. Można więc zauważyć, że wszystkie harmoniczne znajdują się poniżej 90dB względem niego.

Rys. 9



Tab. 1

	karta dźwiękowa	bufor, $R_L=30\Omega$ $I_{sp}=50mA$	bufor, $R_L=100\Omega$ $I_{sp}=50mA$
<b>pasmo przenoszenia (40 Hz - 15 kHz), dB</b>	+0.00, -0.06	<b>+0.01, -0.19</b>	+0.01, -0.09
<b>poziom szumów, dB (A)</b>	-96.7	-96.3	-96.3
<b>THD, %</b>	0.0030	<b>0.013</b>	0.0025
<b>THD + N, dB (A)</b>	-86.8	<b>-75.2</b>	-87.9
<b>IMD + Noise, %</b>	0.0053	<b>0.012</b>	0.0052
<b>IMD at 10 kHz, %</b>	0.0050	<b>0.011</b>	0.0048

## Pomiary

Przy pierwszych testach modelu użyto sygnału sinusoidalnego o częstotliwości  $f=1kHz$  i napięciu  $U_{sk}=0,85V$ . Do pomiarów wykorzystano kartę dźwiękową Creative SB X-fi, charakteryzującą się dobrymi parametrami. Bufor został zasilony napięciem niesymetrycznym, dostarczanym z akumulatora żelowego 12V. Pierwsze wyniki pomiarów okazały się dosyć zaskakujące,

R E K L A M A

## AVT 1879 Przekaznik czasowy start-stop

Moduł idealnie sprawdzi się w domowej automatyce, jako sterownik oświetlenia, ogrzewania, wentylacji czy sygnalizacji procesów. Jest an jednofunkcyjnym przekaznikiem z programowanym czasem wyzwalany przyciskiem z możliwością jego wyłączenia przed upływem odmierzonego czasu.

A: 17zł

B: 39zł

C: 49zł

POZIOM TRUDNOŚCI MONTAŻU





**Wykaz elementów (jeden kanał)**

R1	220Ω	C4	1nF
R2	22kΩ	C5, C6	10μF
R3, R4	1kΩ	C7, C8	470μF
R5, R8	130Ω	C9, C10	220nF
R6, R7	15Ω	C11, C12	470μF
R9-R14	5.6Ω	C13, C14	220nF
R15	4,7kΩ	T1, T2	BC560
C1	2x1μF	T3, T4	BC550
C2	220nF	T5, T7, T9	BD139
C3	10μF	T6, T8, T10	BD140
		D1, D2	LED green (2V)
		J1, J2	.jumper

Montaż układu jest prosty i nawet początkujący powinni sobie z nim poradzić. Należy jednak pamiętać o jednej zwrocie wykonywanej przewodem oraz rezystorze SMD, który umożliwi naładowanie kondensatorów wyjściowych, eliminując tym samym stuki przy podłączeniu słuchawek. Ambitni mogą dodatkowo sprzęgnąć termicznie (np. taśmą miedzianą) tranzystory obu stopni oraz diody LED i współpracujące z nimi tranzystory. Płytką drukowana została tak zaprojektowana, żeby było to możliwe.

W zależności od zastosowanych tranzystorów (producent, seria) mogą wystą-

pić różnice w parametrach układu. Ważne jest także, żeby w miarę możliwości selekcjonować tranzystory. Dotyczy to głównie wyjściowych BD139/140. Najlepiej, żeby wszystkie miały zbliżone wzmocnienie. W modelu zostały użyte trójki tranzystorów o różnicach wzmocnienia mniejszych niż 1% oraz różnicach między NPN a PNP około 6%. Małe tranzystory BC... również warto sprawdzić przed montażem, żeby zastosować elementy o podobnych parametrach. Dobrze jest wykorzystywać tranzystory z grup o dużym wzmocnieniu, czyli „C” dla BC550/560 oraz z najwyższej grupy „16” dla BD139/140.

**Komplet podzespołów z płytką jest dostępny w sieci handlowej AVT jako kit szkolny AVT-3145.**

Bufor można zasiląć napięciem symetrycznym lub pojedynczym; do zmiany trybu pracy służy zwora zakładana na jedno ze złączy goldpin oznaczonych jako SYM i ASYM. Przy zasilaniu niesymetrycznym punkt V- staje się masą układu (zworka założona na goldpiny ASYM łączy V- i GND).

**Jerzy Gołaszewski**  
jego@plusnet.pl  
**Michał Gołaszewski**