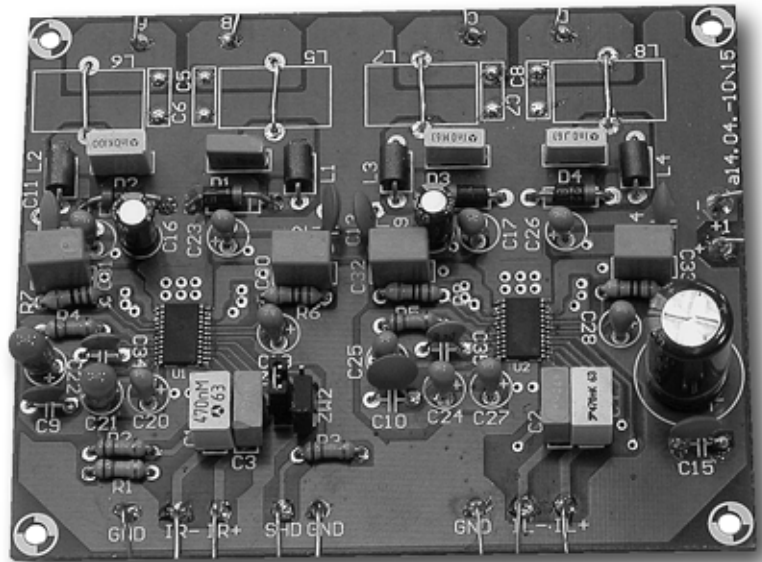


Stereofoniczny wzmacniacz klasy D

2x20W

AVT-550



Wzmacniacze klasy D zyskują od kilku lat coraz większą popularność mimo - co prawda coraz rzadszych - negatywnych opinii audiofilów. Kolejny, bardzo nowoczesny konstrukcyjnie wzmacniacz tego rodzaju przedstawiamy w artykule.

Rekomendacje: jest to wzmacniacz, który doskonale sprawdzi się zarówno w samochodzie, jak i jako stacjonarny w domowym zestawie audio.

Często wzmacniacze pracujące w klasie D są nazywane wzmacniaczami impulsowymi lub cyfrowymi, co odzwierciedla sposób ich pracy. Wzmacniacze pracujące impulsowo charakteryzują się niewątpliwą zaletą - ich sprawność sięga 90%, podczas gdy wzmacniacze liniowe mają sprawności co najwyżej 60%. Dzięki temu wzmacniacze pracujących w klasie D nie trzeba wyposażać w duże i ciężkie radiatory, a przy mniejszych mocach wzmacniacza żaden radiator nie jest potrzebny.

Wysoka sprawność wzmacniacza niekoniecznie musi być okupiona znacznym skomplikowaniem jego budowy. Nowoczesne, scalone wzmacniacze impulsowe pracują w otoczeniu zaledwie kilku dołączonych elementów zewnętrznych. Najważniejszą wadą większości wzmacniaczy impulsowych jest konieczność stosowania na jego wyjściu dolnoprzepustowych filtrów LC przystosowanych do obciążeń wysokoprądowych. Napisałem „większości wzmacniaczy“, bo istnieją wzmacniacze, w których udało się zmniejszyć rozmiary, a nawet wręcz wyeliminować filtry LC, zazwyczaj dużych rozmiarów i drogie. Przykładem takiego wzmacniacza (niepotrzebującego filtrów LC) jest układ

TPA3001D1 firmy Texas Instruments. W oparciu o ten układ wykonany został tytułowy wzmacniacz. Jego niewątpliwą zaletą jest brak konieczności stosowania jakiegokolwiek radiatora oraz filtrów LC. Możliwość zrezygnowania z filtru LC udało się uzyskać inżynierom z firmy Texas Instruments dzięki zastosowaniu zmodyfikowanego sposobu zasilania głośników, omówię go w dalszej części artykułu.

Prezentowany wzmacniacz, choć ma relatywnie niewielką moc wyjściową, może znaleźć sporo zastosowań. Można go wykorzystać jako multimedialny wzmacniacz montowany w obudowie komputera PC czy w obudowie głośników, a także jako wzmacniacz do samochodu. Sądzę, że zastosowań wzmacniacza może być wiele dzięki jego niewątpliwiej zaletce jaką jest prosta budowa oraz niewielka liczba elementów zewnętrznych.

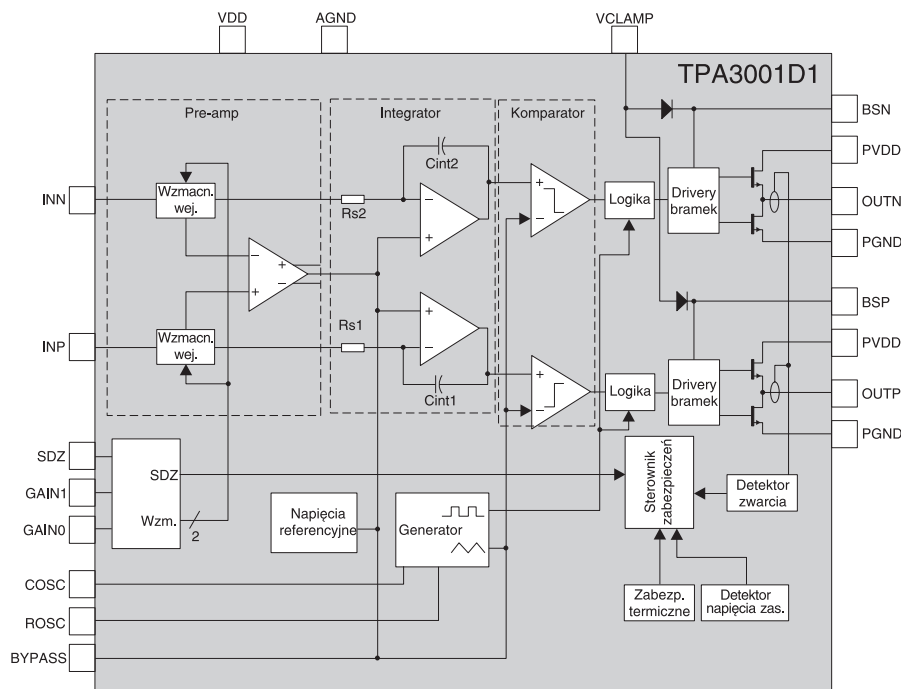
Podstawowe parametry wzmacniacza zawarto w **tab. 1**.

Nowoczesna klasa D

W klasie D wykorzystuje się modulację sygnału PWM, zamiast liniowego wzmacniania sygnału, typowego dla pracy w klasie A i AB. We wzmacniaczach im-

Tab. 1. Wybrane parametry stereofonicznego wzmacniacza klasy D 2x20W

- ◆ napięcie zasilania wzmacniacza 8...18 V,
- ◆ moc 20 W przy obciążeniu 8Ω lub 13 W przy 4Ω i napięciu zasilania 18 V (10% THD+N),
- ◆ THD+N 1% przy mocy 16 W/8Ω lub 10 W/4Ω,
- ◆ THD+N 0,3% przy mocy 2 W/8Ω i napięciu zasilania 18 V,
- ◆ częstotliwość oscylatora 250 kHz,
- ◆ pasmo przenoszenia 20 Hz do 20 kHz,
- ◆ ma wbudowany obwód zapobiegający stukom w głośnikach podczas włączania,
- ◆ wbudowane zabezpieczenie przeciwzwarciowe wyjść oraz termiczne,
- ◆ możliwość pracy w trybie mostkowym,
- ◆ zastosowana technika modulacji eliminuje zazwyczaj duży filtr LC oraz polepsza SNR i skuteczność wzmacniacza.



Rys. 1. Schemat blokowy układu scalonego TPA3001D1

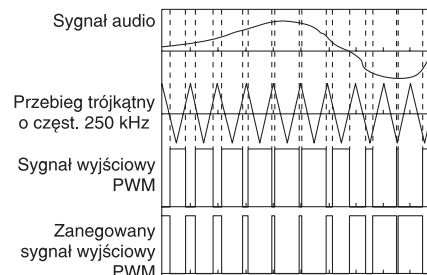
pulsowych sygnał audio jest przekształcany na zmodulowany przebieg PWM, którego uśredniona wartość niesie informację o chwilowej amplitudzie sygnału wejściowego. Wzmacniacz klasy D ma bardzo dużą sprawność energetyczną, gdyż tranzystory stopnia wyjściowego pracują wyłącznie jako klucze, czyli znajdują się w jednym z dwóch stanów: włączenia albo wyłączenia.

Najpierw postaram się opisać jak jest tworzony modulowany sygnał PWM oraz odpowiedzieć na pytania: dlaczego słyszy się sygnały akustyczne, a nie słyszy składowej sygnału o częstotliwości sygnału PWM, dlaczego przetwarzanie PWM jest bardziej skuteczne od wzmacniania liniowego, a także dlaczego niektóre wzmacniacze impulsowe potrzebują wyjściowych filtrów LC a inne nie.

Jak we wzmacniaczu klasy D tworzony jest przebieg PWM zawierający informację o sygnale akustycznym? Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy układu TPA3001D1, w oparciu o który został zbudowany wzmacniacz. Schemat ten pozwoli wy-

jaśnić jak kształtowany jest przebieg PWM. Sygnał wejściowy audio podawany jest na przedwzmacniacz, a dalej na integrator (będący filtrem dolnoprzepustowym), którego zadaniem jest od-

filtrowanie składowych o wyższych częstotliwościach. Filtracja tych składowych sygnału ma na celu zapobiegnięcie skutkom *aliasingu* oraz polepsza stabilność wzmacniacza. Następnie sygnał audio



Rys. 2. Ilustracja tworzenia przebiegu PWM

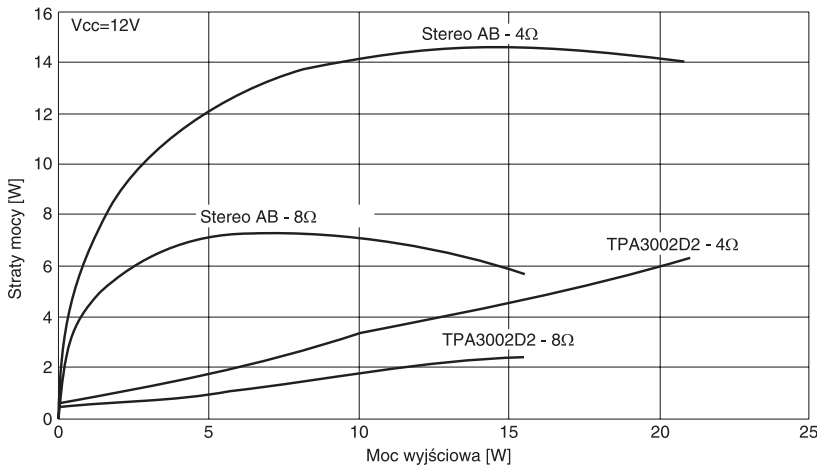
porównywany jest w komparatorze z wytwarzanym wewnątrz przebiegiem trójkątnym, tworząc na wyjściu modulowany przebieg PWM. Przebieg ten steruje tranzystorami mocy (kluczami prądowymi), których zadaniem jest dostarczenie wysokoprądowego sygnału wyjściowego. Na rys. 2 pokazano, w jaki sposób jest tworzony przebieg PWM przez komparator. Jak widać, analogowy sygnał wejściowy jest porównywany z przebiegiem trójkątnym o częstotliwości 250 kHz. Aby skutecznie przetworzyć sygnał audio na przebieg PWM, częstotliwość przebiegu trójkątnego powinna kilkakrotnie przewyższać pasmo sygnałów akustycznych. Kiedy napięcie sygnału audio jest większe od napięcia przebiegu trójkątnego, na wyjściu komparatora pojawi się sygnał o poziomie wysokim (napięcie dodatnie), natomiast w przeciwnym wypadku będzie poziom niski (napięcie zerowe).

Teoretycznie, wzmacniacz klasy D może mieć sprawność energetyczną blisko 100%, ponieważ kluczowane tranzystory powinny dostarczać do obciążenia taką samą moc jak pobrana z zasilacza. Żeby tak się stało, tranzystory MOSFET muszą mieć zerową rezystancję w stanie otwarcia oraz powinny być sterowane napięciowo (bez prądu bramki). Niestety, jeszcze nie opracowano idealnego tranzystora o takich parametrach, dlatego też trzeba liczyć się ze stratami mocy, aczkolwiek niewielkimi. Zazwyczaj tylko 10% pobieranej z zasilacza energii jest tracone.

Kłopoty z układami?

Wbrew opiniom malkontentów, układy TPA3001D1 są łatwo dostępne: można je otrzymać bezpośrednio z firmy Texas Instruments jako bezpłatne próbki. Zamówienia należy składać bezpośrednio na stronie internetowej producenta.





Rys. 3. Zależność mocy traconej we wzmacniaczach klasy D i AB w funkcji mocy wyjściowej

Dzięki dużej sprawności wzmacniacza nie występuje problem odprowadzania ciepła powstałego wskutek dużych strat mocy. Przy zasilaniu wzmacniacza impulsowym napięciem 12 V nie jest potrzebny żaden radiator. Przy zasilaniu napięciem 12 V wzmacniacza pracującego w klasie AB radiator jest już wymagany. Na rys. 3 pokazano straty mocy we wzmacniaczu w zależności od dostarczanej mocy, odpowiednio klas D i AB, przy obciążeniu 4 i 8Ω (rysunek zaczerpnięty z dokumentacji firmy Texas Instru-

ments). Dla przykładu, wzmacniacz klasy D przy mocy 10 W i obciążeniu 4 Ω ma straty mocy na poziomie ok. 3,7 W, a wzmacniacz klasy AB przy tej samej mocy wyjściowej ma aż 14 W strat! Jak widać różnice w mocy strat są spore.

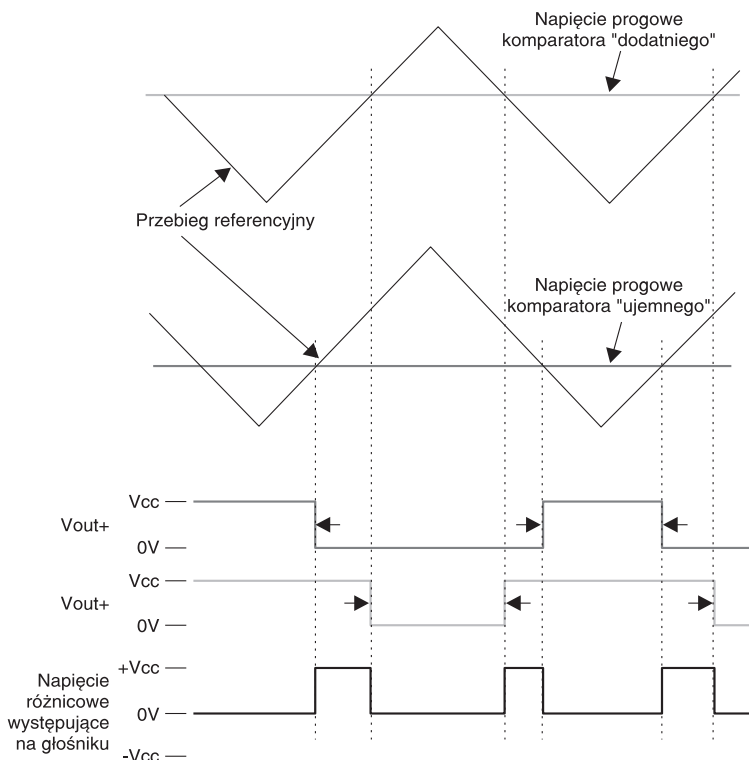
Modulacja *filter-free*, czyli jak pozbyć się filtra LC

Wzmacniacz TPA3001D1 używa trochę innego rodzaju modulacji PWM niż wcześniej przedstawiona, dzięki czemu nie jest

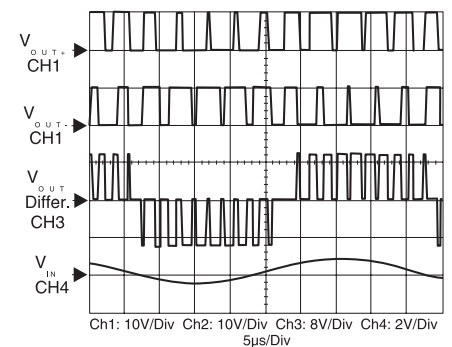
konieczne stosowanie filtrów LC. Przy modulacji tego rodzaju przebieg na wyjściu nieodwracającym jest uzyskiwany tak samo jak w klasycznym wzmacniaczu klasy D, ale już przebieg na wyjściu odwracającym nie jest już tylko inwersją przebiegu z wyjścia nieodwracającego. Dla ustalenia uwagi wyjście nieodwracające będzie oznaczane Vout+, a wyjście odwracające Vout-. Przy tej modulacji stosowane są dwa komparatory oraz dwa integratory. Komparator pierwszy porównuje przebieg z integratora tworząc przebieg Vout+, natomiast sygnał z drugiego integratora jest porównywany w przypisanym mu komparatorze, na wyjściu którego otrzymuje się sygnał Vout-. Na rys. 4 pokazano sygnały na wejściach oraz wyjściach komparatorów w opisywanym sposobie modulacji. Na rysunku pokazano także różnicowy sygnał występujący na głośniku. Jak widać, głośnik jest zasilany krótkimi, prostokątnymi impulsami prądowymi.

Na rys. 5 pokazano przebiegi na wyjściu wzmacniacza przy sygnale wejściowym o częstotliwości 20 kHz. Na rysunku da się zauważyć, że przy wzroście amplitudy sygnału wejściowego różnie wypełnienie przebiegu PWM.

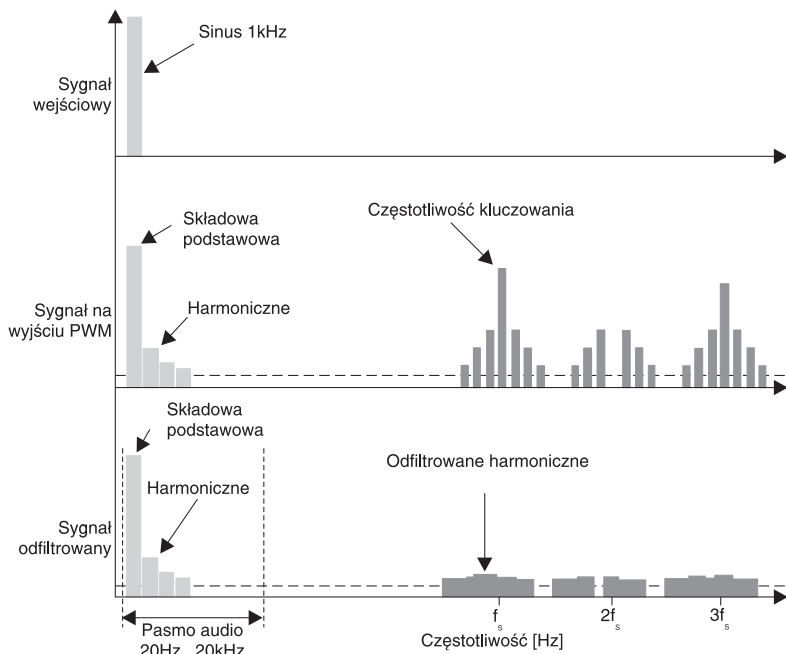
Sygnał audio występujący w przebiegu PWM jest łatwiej analizować w dziedzinie częstotliwości. „Zwykły“ sygnał PWM ma składowe o częstotliwości sygnału wejściowego, częstotliwości przebiegu PWM oraz częstotliwości harmonicznych sumy bocznej pasma. Na rys. 6 przedstawiono w dziedzinie częstotliwości sygnały: wejściowy, wyjściowy oraz



Rys. 4. Przebiegi sygnałów na wejściach i wyjściach komparatorów przy modulacji PWM "filter-free"



Rys. 5. Przebiegi na wyjściu wzmacniacza przy sygnale wejściowym o częstotliwości 20 kHz



Rys. 6. Rozkład widmowy sygnału wejściowego, wyjściowego oraz wyjściowego po odfiltrowaniu

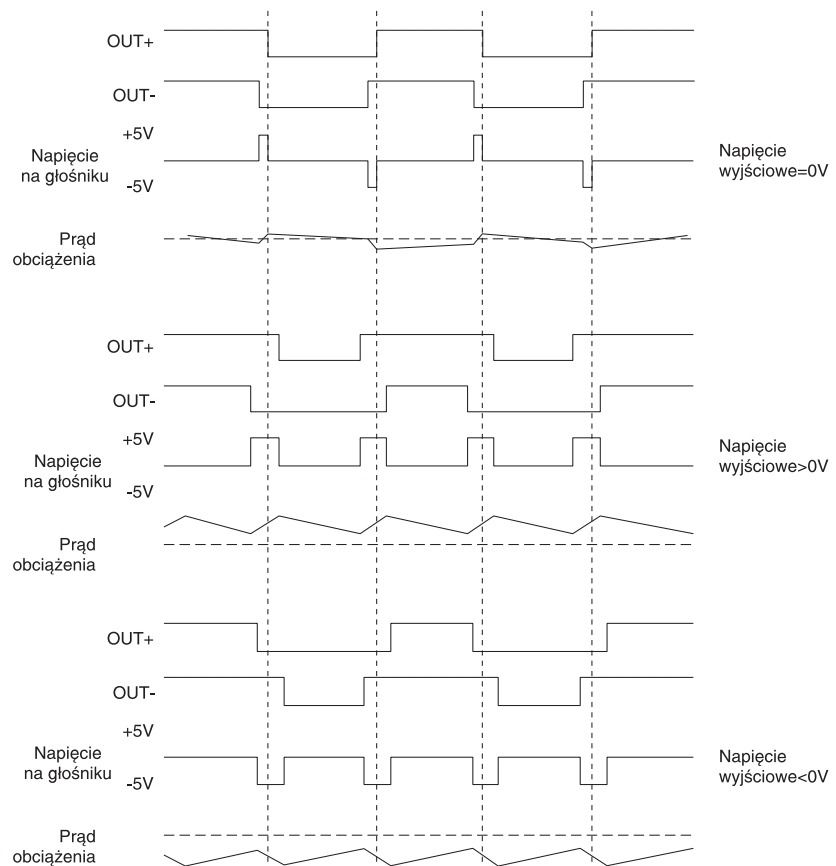
wyjściowy odfiltrowany. Rysunek ten pokazuje, jak z przebiegu PWM jest „wyciągany“ sygnał audio poprzez filtrację dolnoprzepustową. Otrzymany sygnał audio nie jest czystym sygnałem 1 kHz, lecz posiada liczne harmoniczne. Głośnik nie może odtwarzać częstotliwości sygnału PWM (250 kHz) i jego harmonicznych. Nawet jeśli byłoby to możliwe, to ucho ludzkie nie jest w stanie ich usłyszeć. Słuchacz nie byłby w stanie odróżnić sygnału odfiltrowanego od niefiltrowanego (pokazanego na rys. 5) jeśli oba zostałyby bezpośrednio wysłane na głośnik. Tę właściwość wykorzystali inżynierowie z Texas Instruments do pozbycia się wyjściowego filtra LC. Wykorzystali oni naturalną właściwość słuchu ludzkiego polegającą na tłumieniu sygnałów o wyższych częstotliwościach (czyli filtracji dolnoprzepustowej). Modułacja tego rodzaju określona jest przez producenta jako *filter-free*.

Można teraz zadać pytanie: dlaczego niektóre wzmacniacze klasy D wymagają filtrów wyjściowych a inne nie? Przecież można podać sygnał wyjściowy bezpośrednio na głośnik. Różnica jest w wartości prądu występującej podczas przełączania tranzystorów. W modulacji *filter-free* natężenie prądu podczas przełączania tranzystorów jest zmniejszone do

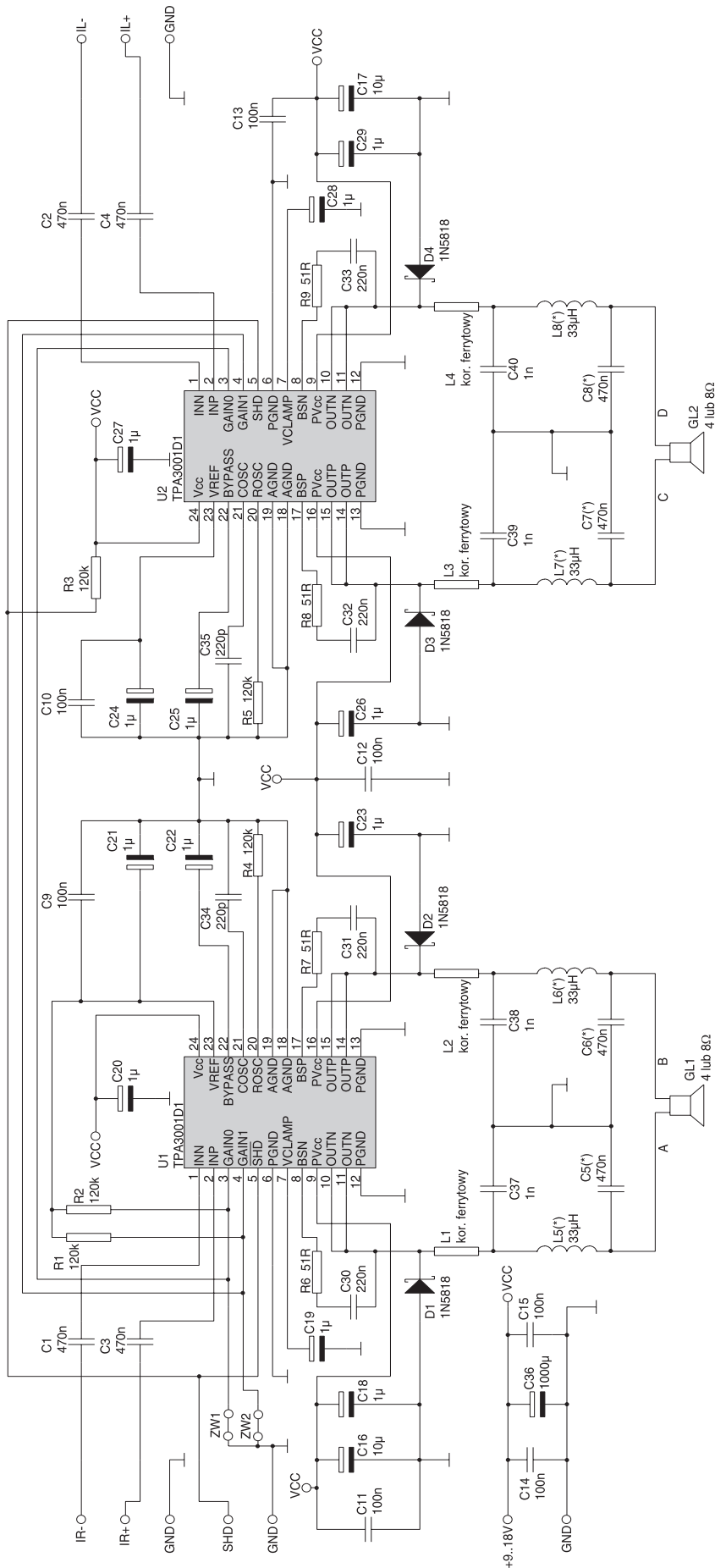
minimum. Właśnie zmniejszenie tego prądu pozwala na wyeliminowanie elementów filtra LC. W takim przypadku prostym filtrem będzie sam głośnik, którego jednym z głównych elementów

jest przecież cewka. Dzięki wyeliminowaniu filtrów LC wzmacniacz jest prosty w budowie, ma także wysoką sprawność.

Na rys. 7 przedstawiano przykłady przebiegów typowych dla modulacji typu *filter-free*. Dla przypomnienia, przebiegi na wyjściach VOUT+ oraz VOUT- w tym typie modulacji są w fazie. Przy napięciu na wejściu większym od 0, przebieg na wyjściu Vout+ ma wypełnienie większe od 50%, a Vout- mniejsze od 50%. W przypadku, gdy napięcie jest mniejsze od 0, Vout+ będzie mieć wypełnienie mniejsze od 50% a Vout- większe od 50%. W przypadku napięcia 0 V przebiegi na Vout+ i Vout- mają wypełnienie 50%, ale są trochę przesunięte, dlatego głośnik jest zasilany krótkimi szpilkami prądowymi. Takie sterowanie głośnika redukuje straty w samym filtrze LC oraz w głośniku. Pozwala także na stosowanie głośnika w roli filtra bez straty skuteczności wzmacniacza. Zniekształcenia powstające w wyniku zasilania głośników sygnałem prostokątnym są lokowane znacznie



Rys. 7. Przebiegi napięć dla modulacji filter-free



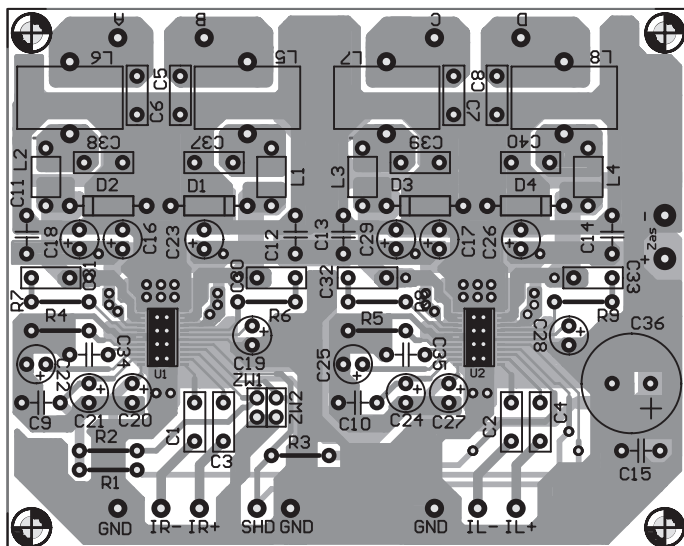
Rys. 8. Schemat elektryczny wzmacniacza

powyżej granicy słyszalności, czyli znacznie powyżej 20 kHz. Dla zmniejszenia emisji zakłóceń, producent zaleca w takim rodzaju modulacji zastosowanie w wyjściach wzmacniacza koralików ferrytowych, które zminimalizują emisję zakłóceń wysokoczęstotliwościowych o częstotliwościach większych niż 1 MHz. W przypadku potrzeby zmniejszenia emisji zakłóceń o częstotliwościach mniejszych niż 1 MHz producent zaleca zastosowanie filtra LC.

Opis działania układu

Schemat elektryczny wzmacniacza pokazano na rys. 8. Łatwo zauważyć, że wzmacniacz składa się z dwóch takich samych części (po jednej dla każdego kanału). Sygnały wejściowe są podawane na wejścia różnicowe. Aby skorzystać tylko z jednego wejścia (konfiguracja asymetryczna), wystarczy wejścia IR- oraz IL- zezwrzeć do masy. Wzmacniacz ma regulowane zworkami ZW1, ZW2 wzmocnienie wewnętrznego przedwzmacniacza. Wartości wzmocnienia odpowiadające pozycjom zwoerek zestawiono w tab. 2.

Rezystory R1...R3 podciągają wejścia GAIN0, GAIN1 oraz ISHD do napięcia 5 V, które występuje na wyjściu V_{REF}. Podanie poziomu niskiego (0 V) na wejście SHD wprowadza wzmacniacz w stan uśpienia, w którym pobierany prąd jest mniejszy niż 1μA. Elementy C34, R4 oraz C35 i R5 ustalają częstotliwości wewnętrznych oscylatorów na wartość 250 kHz, natomiast elementy R6, C30, R7, C31 i R8, C32, R9, C33 współpracują z obwodem *bootstrap*. Wyjścia wzmacniacza (OUTN i OUTP) sterują bezpośrednio głośnikiem, poprzez proste filtry składające się z koralika ferrytowego i kondensatora. Filtry te - jak wyżej wspomniano - zmniejszają emisję zakłóceń o częstotliwościach większych od 1 MHz. Elementy filtrów LC: L5, C5, L6, C6, L7, C7 oraz L8, C8 są typowe dla klasycznych wzmacniaczy klasy D, które w tym wzmacniaczu z wyjaśnionych przyczyn nie muszą być montowane. Pozostałe kondensatory odpowiedzialne są za filtrację napięć występujących we wzmacniaczu.



Rys. 9. Rozmieszczenie elementów na płycie drukowanej

Montaż i uruchomienie

Stereofoniczny wzmacniacz należy zmontować na płycie drukowanej zgodnie z rys. 9. Montaż wzmacniacza trzeba rozpocząć od wlotowania wzmacniaczy scalonych wykonanych w technologii SMD. Do montażu tych układów potrzebna będzie lutownica z cienkim grotem. Przydać się może cienka cyna najlepiej o średnicy 0,25mm lub pasta lutownicza. Wlotowanie elementów SMD na pierwszy rzut oka nie musi być trudne lub niewykonalne prostymi metodami. Układy U1, U2 dla lepszego odprowadzania ciepła zostały wyposażone od dolnej strony obudowy w metalową wkładkę. Kontakt tej wkładki z odpowiednio wyprofilowaną ścieżką na płycie drukowanej spowoduje

poprawienie odprowadzania ciepła z układu. By polepszyć kontakt z metalowej płytki wzmacniacza ze ścieżką płytki drukowanej, przed wlotowaniem układów, wkładki można posmarować pastą silikonową. Zanim wlotowane zostaną układy SMD, należy także ocynować przeznaczone dla nich punkty lutownicze. Po przyklejeniu do płytki układów SMD można je zacząć lutować. Do przyklejenia można użyć klejów, które mają dłuższy czas schnięcia. Nie nadają się do tego typu wszelakie Kropelki. Lutowanie układów SMD polegać będzie na podgrzaniu i dociśnięciu ich końcówek do płytki drukowanej. Cyna występująca na punktach lutowniczych powinna wystarczyć do zalutowania końcówek układów. Pozostałe elementy są do montażu przewlekane. Producent zaleca zastosowanie kondensatorów tantalowych, choć mogą to być także elektrolity. Ponieważ najczęściej nie będą montowane wyjściowe filtry LC, miejsca na elementy L5...L8 należy zewrzeć zworkami z drutu. Wzmacniacz po zasileniu napięciem z zakresu +9...18 V powinien od razu działać poprawnie.

WYKAZ ELEMENTÓW

Rezystory

R1...R5: 120kΩ

R6...R9: 51Ω

Kondensatory

C1...C4: 470nF

C9...C15: 100nF ceramiczny

C16, C17: 10μF/25V

C18...C29: 1μF najlepiej tantalowy

C30...C33: 220nF

C34, C35: 220pF

C36: 1000μF/25V

C37...C40: 1nF

Półprzewodniki

D1...D4: Dioda Schottky'ego 1N5818

U1, U2: TPA3001D1

Różne

L1...L4: koralik ferrytowy

W celu dodatkowego zmniejszenia zakłóceń, montować elementy C5...C8 oraz L5...L8 o wartościach odpowiednio 470nF i 33μH dla obciążenia 8Ω, i odpowiednio 1μF i 15μH dla obciążenia 4Ω.

Jak pisałem, wzmacniacz ma wejścia różnicowe, więc przy korzystaniu tylko z jednego wejścia, wejścia IR- i IL- należy dołączyć do masy. Wzmocnienie wzmacniacza można dobrać do własnych potrzeb zworkami ZW1 oraz ZW2.

Przy napięciu zasilania 18 V i impedancji głośnika 8Ω, wzmacniacz będzie w stanie oddać 20 W mocy, przy zniekształceniach 10%. Przy oddawanej do obciążenia mocy 15 W zniekształcenia THD będą utrzymywane na poziomie 0,1%. Zniekształcenia zwiększają się wraz z mocą przy mocach większych niż 15 W.

W przypadku montażu wzmacniacza w obudowie komputera, należy zasilić go dostępnym napięciem +12 V.

Marcin Wiązania, AVT
marcin.wiazania@ep.com.pl

Wzory płytek drukowanych w formacie PDF są dostępne w Internecie pod adresem: pcb.ep.com.pl oraz na płycie CD-EP12/2003B w katalogu PCB.

Tab. 2. Wzmocnienie wzmacniacza w zależności od położenia ZW1 i ZW2

ZW2	ZW1	Wzmocnienie wzmacniacza (dB)
1	1	12
1	0	18
0	1	23,6
0	0	36

Gdzie: "1" zworka założona
"0" zworka zdjęta