

Klasa T, czyli nowe i najnowsze wzmacniacze mocy



Artykuł z serii autorskich lekcji.

Szkolne podręczniki zawierają informacje o wzmacniaczach klas A, B i C. Co jednak ma zrobić elektronik, gdy napotka informację o wzmacniaczach pracujących w klasie G, H, E, S lub T? Co to za wzmacniacze? Gdzie szukać informacji na ich temat?

Jednym z prostszych rozwiązań jest sięgnięcie do niniejszego, artykułu, który obszernie opisuje spotykane obecnie klasy wzmacniaczy mocy.

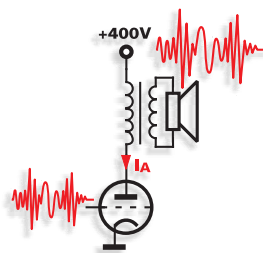
Klasa wzmacniacza - domyślnie: wzmacniacza mocy audio - określa przede wszystkim działanie (niekiedy także budowę) jego stopnia wyjściowego. Klasa wzmacniacza nie mówi o elementach czynnych, użytych do jego budowy (lampy, tranzystory bipolarne, IGBT MOSFET). Przykładowo wzmacniacz klasy A może być zbudowany z wykorzystaniem lamp bądź dowolnych tranzystorów. Jak się okazuje, klasyfikacja w istocie opiera się na... długości czasu. Ta intrygująca informacja o czasie zostanie stopniowo wyjaśniona w dalszej części artykułu, w trakcie omawiania poszczególnych klas.

Klasa A

Pierwsze wzmacniacze mocy audio (power audio amplifiers) zawierały jedną lampę elektronową, a stopień wyjściowy wyglądał mniej więcej tak, jak na rysunku 1. Na wejście (siatkę lampy) podawany był niewielki napięciowy sygnał audio. Sygnał ten, wzmocniony w lampie występował na głośniku. To, że na głośniku występują wzmocnione przebiegi (napięciowe) podawane na wejście, jest oczywiste. Tak działa każdy wzmacniacz i nie ma tu nic godnego uwagi. Przy omawianiu poszczególnych klas potrzebna jest informacja, co dzieje się z prądem (prądami) w stopniu wyjściowym.

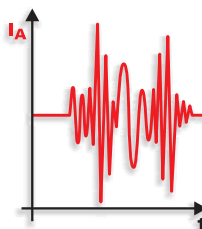
Przez lampę i uzwojenie pierwotne transformatora z rysunku 1 przepływał jakiś znaczny spoczynkowy prąd stały. Sygnał audio modulował ten prąd spoczynkowy – przykładowy przebieg prądu lampy pokazany jest na rysunku 2. Jak widać, podczas

normalnej pracy prąd nie powinien zmniejszać się do zera. Przez element czynny (w tym wypadku lampę) prąd powinien płynąć przez cały czas. I to właśnie jest wzmacniacz klasy A – prąd płynie przez element czynny nieprzerwanie.



Rys. 1 Prosty wzmacniacz lampowy

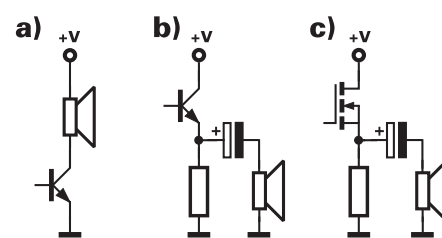
Rys. 2 Przebieg prądu we wzmacniaczu klasy A



Już tu trzeba podkreślić, że na rysunku 2 zaznaczono **przebieg prądu w stopniu wyjściowym**, natomiast podobne kształtem krzywe z rysunku 1 pokazują **przebiegi napięć** wejściowego i wyjściowego. Jak widać, przebieg prądu w stopniu wyjściowym odpowiada przebiegom napięć.

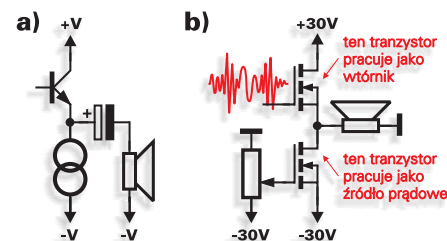
Wzmacniacz klasy A można też zbudować z użyciem tranzystorów, jak pokazuje rysunek 3.

W praktyce dość często buduje się wzmacniacze klasy A o stałym poborze prądu, oznaczane **single ended class A**. Różnica w budowie w stosunku do schematów z rysunku 3b, 3c polega na zastosowaniu źródła prądowego zamiast rezystora – pokazuje to rysunek 4.



Rys. 3 Tranzystorowe wzmacniacze klasy A

Rys. 4 Wzmacniacz class A single ended



A, B, C...

Zastosowanie dwóch lamp i transformatora z dzielonym uzwojeniem pierwotnym pozwala zbudować wzmacniacz symetryczny według rysunku 5. Zamiast lamp można wykorzystać tranzystory i zbudować tranzystorowy odpowiednik układu z rysunku 5 – pokazany jest on w uproszczeniu na rysunku 6a. Takie wzmacniacze, z tranzystorami germanowymi PNP były budowane na początku ery tranzystorowej. Potem pojawiły się inne konfiguracje obwodów wyjściowych, nie zawierające dużego i kosztownego transformatora wyjściowego. Kolejne wersje pokazane są na rysunkach 6b...6f. Obecnie wykorzystywane są przede wszystkim konfiguracje z rysunku 6e i 6f oraz pochodne.

O ile wzmacniacze z rysunków 1, 3, 4 z natury muszą pracować w klasie A, o tyle budowa stopni wyjściowych z rysunków 5 i 6

nie mówi absolutnie nic o klasie wzmacniacza. Na zamieszczonych uproszczonych schematach nie zaznaczono obwodów polaryzacji. Tymczasem muszą one występować w każdym wzmacniaczu i to właśnie one decydują o klasie wzmacniacza. **Rysunek 7** pokazuje bardzo uproszczony (nigdy nie stosowany w praktyce) obwód polaryzacji tranzystorowego stopnia wyjściowego. W rzeczywistości układy takie mają dodatkowe niewielkie rezystory emiterowe według **rysunku 7b**. W stanie spoczynku (przy braku sygnału audio) przez tranzystor T1 płynie jakiś prąd stały I_P . Prąd ten wywołuje jakiś spadek napięcia na rezystancji Rx. Pomijamy tu prądy baz, upraszczamy problem napięć, zakładając iż na bazach i emiterach tranzystorów T2, T3 napięcie jest równe połowie napięcia zasilającego (tak jest w rzeczywistych wzmacniaczach), czyli przez głośnik nie płynie prąd ($I_G=0$). Interesować nas teraz będzie jedynie spadek napięcia na rezystancji Rx i związany z tym prąd tranzystorów T2, T3, oznaczony I_S .

Uwaga! Teraz bardzo ważna informacja: w tym prostym układzie **rezystancja Rx wyznacza, w jakiej klasie będzie pracował wzmacniacz**.

Jeśli rezystancja ta będzie duża, to przez oba tranzystory T2, T3 będzie płynął duży (jednakowy) prąd spoczynkowy. Na rysunku 7 oznaczony jest on I_S . Gdy pojawi się sygnał audio, chwilowa wartość prądu będzie się zmieniać w takt sygnału, a co ważne - prądy tranzystorów T2, T3 nie będą już jednakowe, bo przez głośnik popłynie prąd I_G .

Jeśli spoczynkowy prąd I_S będzie odpowiednio duży, wtedy w żadnej chwili prądy tranzystorów nie zmaleją do zera - wzmacniacz będzie pracował w klasie A. Przykładowe napięcia spoczynkowe (względem masy) oraz przebiegi prądu obu elementów czynnych podczas pracy w klasie A pokazuje **rysunek 8a**. W pierwszej chwili zdziwienie może budzić fakt, że prąd tranzystora T3 zaznaczono jako ujemny - wyjaśni się to już przy omawianiu klasy B.

Natomiast rysunek 8a pokazuje najważniejszy fakt: **w wzmacniaczu klasy A ele-**

mentów (lamp, tranzystorów), a nie układów scalonych. Choć rzeczywiście ogromna większość wzmacniaczy klasy A jest budowana z elementów dyskretnych, jednak, jak wykazano, pojęcie klasy nie ma prawie nic wspólnego z budową, a jedynie z faktem, że prąd przez elementy czynne płynie przez cały czas.

Klasa B

Jeśli rezystancja Rx z rysunku 7 zostanie tak dobrana, by w spoczynku (przy braku sygnału) oba tranzystory nie przewodziły prądu, ale były na granicy przewodzenia, wtedy wzmacniacz będzie pracował w klasie B. Po pojawieniu się sygnału zmiennego tranzystory będą włączane na przemian. Podczas pracy wzmacniacza **klasy B każdy z dwóch elementów czynnych przewodzi prąd dokładnie przez 50% cyklu**. Przykładowe napięcia spoczynkowe i przebiegi prądu podczas pracy pokazuje **rysunek 8b**. Początkujący powinni koniecznie zwrócić uwagę na fakt, że prąd każdego z tranzystorów jest inny. Ściślej biorąc, dopiero „złożenie” obu prądów przypomina przebieg wejściowy. Dzięki temu

(przynajmniej teoretycznie) wzmacniacz klasy B pozwala uzyskać na obciążeniu (głośniku) prawidłowy, niezniekształcony sygnał i to przy stosunkowo dużej sprawności energetycznej, wynoszącej niemal 80%.

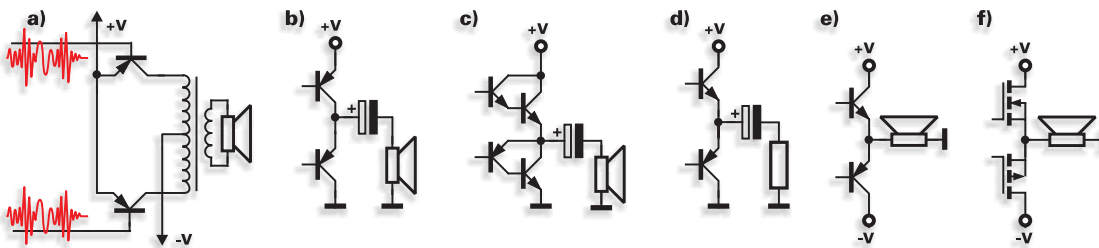
W praktyce okazuje się jednak, iż przy małych sygnałach występują znaczne zniekształcenia, dlatego wzmacniacze audio pracujących w „czystej” klasie B nigdy się nie spotyka.

Klasa C

Jeśli rezystancja Rx byłaby jeszcze mniejsza, na przykład rów-

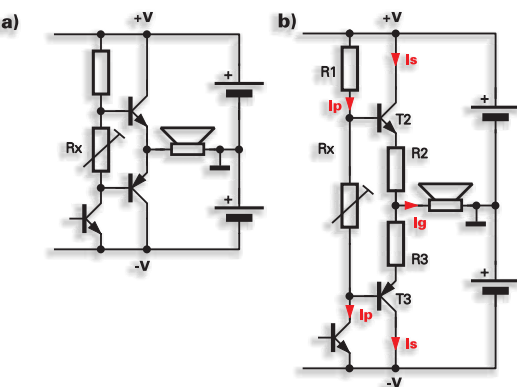
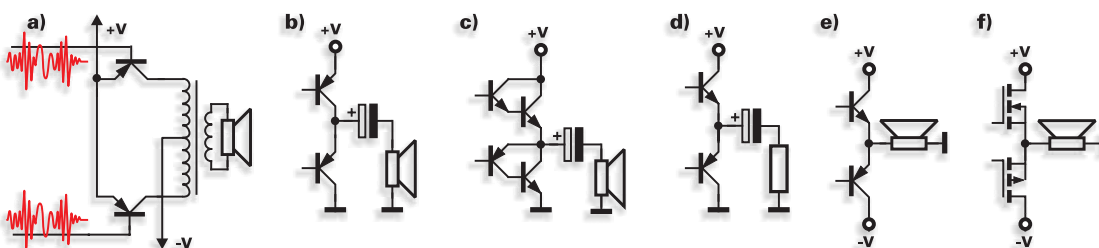
na zero, wtedy nie tylko w spoczynku, ale i przy małych sygnałach żaden z tranzystorów nie będzie przewodził. Przykładowe (niezbyt realne, ale ilustrujące zasadę działania) napięcia i prądy pokazuje **rysunek 8c**. I właśnie to jest przykład wzmacniacza **klasy C, gdy dany element czynny przewodzi prąd krócej niż przez 50% cyklu**.

W klasie B możliwe jest (przynajmniej teoretycznie) uzyskanie na wyjściu sygnału o kształcie dokładnie takim samym, jak na wejściu. We wzmacniaczu klasy C jest to niemożliwe, bo „obciążone” przebiegi prądu zupełnie nie przypominają przebiegu wejściowego. Sygnał wyjściowy za pewno jest bardzo



Rys. 5 Wzmacniacz symetryczny

Rys. 6 Tranzystorowe stopnie końcowe

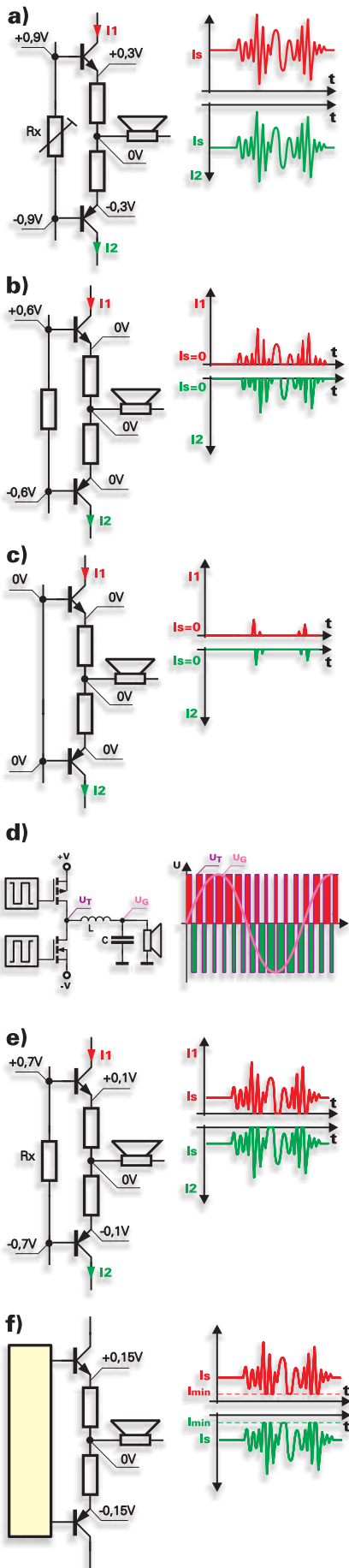


Rys. 7 Uproszczony stopień wyjściowy

ment, bądź elementy czynne przewodzą prąd przez cały czas.

Ogólnie znaną zaletą wzmacniaczy klasy A są małe zniekształcenia, natomiast poważną wadą - mała sprawność energetyczna, rzędu 10...20%. W praktyce oznacza to konieczność stosowania dużych zasilaczy i ogromnych radiatorów.

Na marginesie można wspomnieć o pewnych błędnych wyobrażeniach. Niektórzy niezorientowani elektronicy uważają, że wzmacniacz klasy A musi być zbudowany z pojedynczych ele-



Rys. 8 Klasy wzmacniaczy

silnie zniekształcony, a mniejsze sygnały w ogóle przezeń nie przechodzą. Oczywiście wzmacniacze klasy C nie są wykorzystywane w technice audio (stosowane są tylko w układach alarmowych, gdzie ważna jest głośność a nie zniekształcenia oraz w układach w.cz., zazwyczaj we współpracy z obwodem rezonansowym).

Klasa D

Jeśli oba tranzystory będą na przemian albo całkowicie otwierane, albo całkowicie zamykane, układ będzie pracował w klasie D. Wbrew pozorom, jest to użyteczny tryb pracy. Stosując między wzmacniaczem a głośnikiem prosty filtr LC można uzyskać prawidłowy niezniekształcony sygnał. Pod warunkiem jednak, że otwieranie i zamykanie będzie odbywać się z częstotliwością kilkadziesiąt kilkunastokrotnie większą od najwyższej częstotliwości sygnału audio, i że współczynnik wypełnienia impulsów będzie proporcjonalny do chwilowej wartości sygnału audio. We wzmacniaczu klasy D elementy czynne pełnią jedynie rolę kluczy (otwarty/zamknięty) i dlatego zazwyczaj stopień wyjściowy zawiera tranzystory MOSFET. Wzmacniacz klasy D jest więc przetwornikiem (chwilowej wartości) napięcia na współczynnik wypełnienia impulsów o ponadakustycznej częstotliwości. Przykładowe przebiegi napięć na wyjściu tranzystorowego „siekacza” oraz na filtrze LC pokazane są na rysunku 8d. Rysunek 9 pokazuje zasadę działania wzmacniacza klasy D.

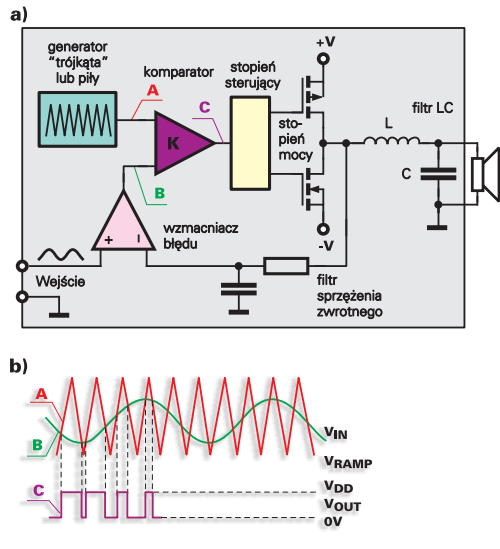
Ponieważ tranzystory wyjściowe są albo w pełni otwarte, albo zamknięte, nie wydzielają się w nich moc strat. Teoretyczna sprawność wzmacniacza klasy D wynosi 100%, co znaczy, że cała moc pobrana z zasilacza jest doprowadzana do głośnika. W praktyce wzmacniacze klasy D osiągają sprawność 90...95% co i tak jest rewelacyjnym wynikiem w porównaniu ze sprawnością wzmac-

niacza klasy B, wynoszącą teoretycznie 78%, oznacza bowiem kilkukrotne zmniejszenie mocy strat (i wielkości radiatorów).

Wzmacniacz klasy D można słusznie nazywać **wzmacniaczem impulsowym** (switching power amplifier). Często spotyka się także określenie **PWM amplifiers**, gdzie PWM to Pulse Width Modulation, czyli modulacja szerokości impulsu. Znacznie mniej trafne, za to częściej stosowane ze względów reklamowych jest określenie **wzmacniacz cyfrowy** (digital amplifier). Słowo cyfrowy (D jak digital) kojarzy się z wysoką jakością, tymczasem wzmacniacze klasy D wcale nie wyróżniają się szczególnie dobrą jakością. Ich najważniejszą zaletą jest wysoka sprawność energetyczna, przez co możliwa jest daleko posunięta miniaturyzacja (małe radiatory), a bateryjne wzmacniacze klasy D pozwalają przedłużyć żywotność baterii nawet trzykrotnie. Wzmacniacze klasy D nie realizują więc „odwiecznego” marzenia audiofilów: jednocześnie wysokiej wierności odtwarzania i dużej sprawności energetycznej. O ile sprawność jest rzeczywiście imponująca (często przekracza 90%), o tyle zniekształcenia nieliniowe i intermodulacyjne są rzędu 1%, do w urządzeniach wyższej klasy jest nie do przyjęcia.

Klasy pośrednie

Wzmacniacze klasy A są wykorzystywane rzadko, a wzmacniacze „czystszej” klasy B – nigdy. Ogromna większość typowych wzmacniaczy mocy audio pracuje w tak zwanej klasie AB. Stopnie wyjściowe wzmacniacza klasy AB w spoczynku przewodzą jakiś niewielki prąd – na rysunku 7 odpowiada to pośredniej wartości Rx, pomiędzy klasą A i B. Każdy tranzystor przewodzi przez czas dłuższy niż połowa cyklu. W rezultacie przy małych sygnałach wzmacniacz pracuje w klasie A, przy dużych – podobnie jak w klasie B. Przykładowe napięcia i prądy pokazane są na rysunku 8e. Wzmacniacze klasy

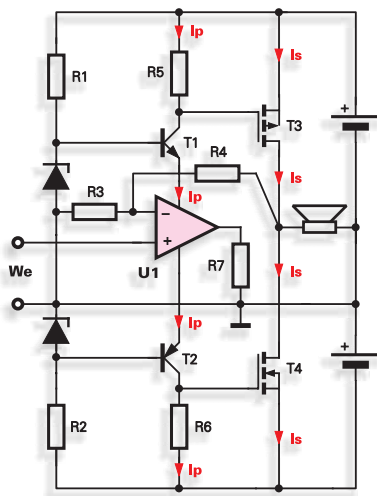


Rys. 9 Wzmacniacz klasy D

AB łączą zalety klas A i B: mają nieduże zniekształcenia oraz stosunkowo dobrą sprawność energetyczną, rzędu 50...70%. W zależności od wartości prądu spoczynkowego mówi się o płytszej lub głębszej klasie AB. Czym większy prąd spoczynkowy, tym mniejsza sprawność, ale i mniejsze zniekształcenia. Typowe wzmacniacze (scalone i tranzystorowe) pracują przy niewielkich prądach spoczynkowych rzędu 20...100mA, podczas gdy maksymalny prąd tranzystorów w szczytach wysterowania wynosi kilka amperów.

Powszechnie znana (przytoczona również w tym artykule) jest opinia, że wzmacniacz klasy A ma małe zniekształcenia, bo elementy czynne cały czas przewodzą prąd. Wielu elektronikom nasuwa to wniosek, że aby

pozbyć się zniekształceń wystarczy zmodyfikować obwody polaryzacji wzmacniacza klasy AB tak, by tranzystory nigdy nie zostały zatkane, a prąd nie był nigdy mniejszy od jakiejś wartości I_{min} . Przebiegi napięć i prądów wyglądałyby wtedy jak na **rysunku 8f**. Nie można tego zrealizować w typowych układach polaryzacji pracujących na zasadzie pokazanej na rysunku 7, bo mówiąc w największym uproszczeniu, do zatkania tranzystora wystarczy mniejsza różnica napięcia niż do jego otwarcia. Można to jednak zrealizować zupełnie inaczej, na przykład na zasadzie pokazanej w wielkim uproszczeniu na **rysunku 10**. Przez końcówki wzmacniacza operacyjnego U1 płynie jakiś prąd spoczynkowy I_p . Wywołuje on na rezystorach R5, R6 spadek napięcia, który nieco otwiera tranzystory T3, T4, powodując przepływ prądu spoczynkowego IS. Pojawienie się zmiennego napięcia wejściowego powoduje przepływ prądu przez rezystor R7. Prąd ten przepływa albo przez R5, albo przez R6 i otwiera jeden z tranzystorów mocy T3, T4.



Rys. 10 Nietypowy wzmacniacz klasy AB

Spotyka się takie wzmacniacze – tak z grubsza biorąc, zbudowany jest wzmacniacz Vellemana o oznaczeniu K4010.

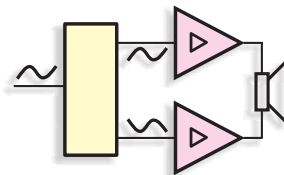
Ze względów reklamowych wzmacniacze tego typu zalicza się do kategorii określanej jako *ekonomiczna klasa A*, a czasem nawet *klasa AA*. Nie znaczy to, że wzmacniacz taki można zaliczyć do „prawdziwej” klasy A. Co prawda warunek ciągłości prądu jest spełniony, jednak trzeba bardzo wyraźnie podkreślić, że poziom zniekształceń zależy od wielu czynników, nie tylko od ciągłości prądu. Może się okazać, i często okazuje, że dopracowany wzmacniacz klasy AB z MOSFET-ami daje dźwięk zdecydowanie lepszy niż najprawdziwszy wzmacniacz klasy A. Sam fakt, że stopień wyjściowy pracuje w klasie A nie świadczy o jakości dźwięku tego wzmacniacza. Właśnie ze względu na fakt, że warunek ciągłości prądu nie decyduje o wszystkim,

wzmacniacze o właściwościach pokazanych na rysunku 8f należy zaliczyć do klasy B. Określenie *klasa A* powinno pozostać zarezerwowane do układów, gdzie przebieg prądu (a nie tylko napięcia na obciążeniu) wiernie odzwierciedla kształt sygnału audio.

Jak wynika z podanych informacji, uzyskanie optymalnych właściwości umożliwiła klasa AB. Właściwości te są wynikiem kompromisu między wadami i zaletami klas A i B. Okazuje się też, że zniekształcenia można redukować stosując odpowiednie konfiguracje układowe, konstrukcyjne, oraz elementy: szybkie tranzystory, wysokiej jakości rezystory i kondensatory, zwłaszcza kondensatory elektrolityczne. Rzekomo rewelacyjnie brzmiące wzmacniacze klasy A zazwyczaj są budowane jedynie dla ciekawości, albo co gorsze, dla „szpanu” przed znajomymi. Nie cieszą się zbytnią popularnością, głównie ze względu na kosztowne wielkie straty ciepłne. Właśnie problem mocy i strat ciepłnych stał się bezpośrednią przyczyną opracowania wzmacniaczy klas G i H.

Wzmacniacze klas E, F, G, H, S, T oraz inne ciekawsze koncepcje

Przed omówieniem klas G i H, które pojawiły się one w drugiej połowie lat siedemdziesiątych (1977), konieczne trzeba wspomnieć o skrócie BTL. Nie jest to nazwa klasy wzmacniaczy, jak uważają niewtajemniczeni. BTL (Bridge Tied Load) to po prostu układ mostkowy. Połączenie dwóch najwykleszych wzmacniaczy (np. klasy AB) i stopnia odwracającego fazę sygnału według **rysunku 11** pozwala uzyskać na obciążeniu moc czterokrotnie większą niż w przypadku pojedynczego wzmacniacza. Układy mostkowe są powszechnie stosowane we wzmacniaczach dużej mocy (powyżej 100W) oraz w urządzeniach samochodowych, zasilanych napięciem akumulatora, wynoszącym w czasie jazdy około 14,4V.



Rys. 11 Układ mostkowy

Klasa G

Przez ostatnie trzydzieści lat moc wyjściowa wzmacniaczy stale rośnie. Producenci wabią klientów coraz to większą mocą swych zestawów. Pomijając nieprzyzwoite chwytły reklamowe, polegające na podawaniu „wziętej z sufitu” niebotycznej mocy PMPO, trzeba rzetelnie stwierdzić, że wzmacniacze czołowych firm naprawdę mają zadziwiająco dużą moc wyjściową, rzędu

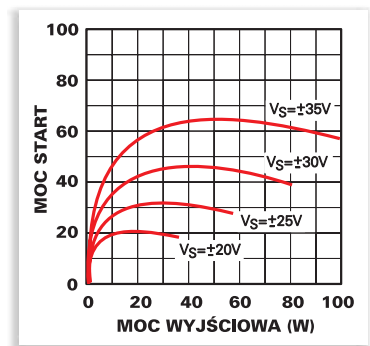
kilkuset watów. Ze wzrostem mocy maksymalnej rośnie poważny problem mocy strat. Teoretyczna sprawność wzmacniacza klasy AB rzędu 65...75% dotyczy pełnego wystęrowania. Okazuje się jednak, że przy mniejszym wystęrowaniu moc strat jest większa(!) niż przy maksymalnym sygnale – pokazuje to **rysunek 12**.

Rysunek 12 pokazuje również, iż moc strat bardzo silnie zależy od napięcia zasilającego – mniejsze napięcie zasilania to wprawdzie mniejsza maksymalna mocy wyjściowa, ale i mniejsza moc strat. W rzeczywistych programach audio przez większość czasu poziom sygnałów jest nieduży, a jedynie co jakiś czas występują silniejsze fragmenty. Tym samym przez większość czasu wzmacniacz pracuje w niekorzystnych warunkach, z dużą mocą strat.

Przed większość czasu wystarczyłyby wzmacniacz niewielkiej mocy (i małej mocy strat), a tylko w krótkich chwilach potrzebny byłby potężny wzmacniacz dysponujący pełną mocą. I tu zaczyna się historia klasy G.

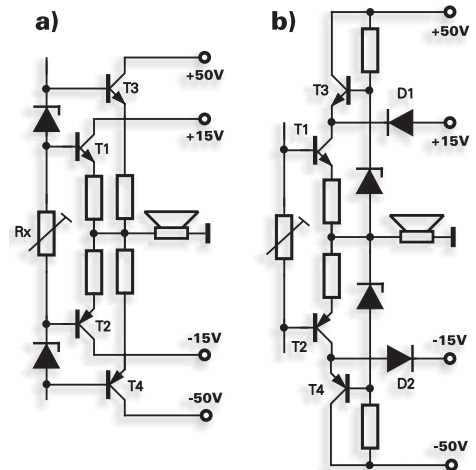
Jak połączyć dwa wzmacniacze w jeden? Czy w ogóle potrzebne są dwa wzmacniacze? Może wystarczy jeden o zmiennym napięciu zasilania?

Sercem wzmacniacza klasy G jest klasyczny stopień wyjściowy pracujący w klasie



Rys. 12 Zależność mocy strat od mocy wyjściowej

Rys. 13 Wzmacniacze klasy G



AB. Dwa bardzo uproszczone przykłady realizacji wzmacniacza klasy G są pokazane na **rysunku 13**. Pierwszy zawiera dwa stopnie klasy AB, zasilane napięciami o różnej wartości. Przy małych sygnałach pracuje tylko część zasilana niższym napięciem (T1, T2).

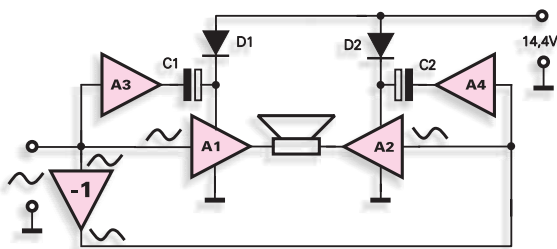
W drugim rozwiązaniu (rys. 13b) występuje tylko jeden stopień wyjściowy klasy AB (T1, T2). Przy niewielkich sygnałach zasilany jest on obniżonym napięciem przez diody D1, D2. Jedynie w chwilach, gdy jest to konieczne (silny sygnał wejściowy), dodatkowe tranzystory T3, T4 zwiększają napięcie zasilające, by w szczytachysterowania uzyskać na obciążeniu potrzebną dużą moc.

Jak wskazuje rysunek 12, wzmacniacze klasy G umożliwiają znaczącą redukcję średniej mocy strat. I to jest ich istotna, ale jedyna zaleta – zniekształcenia nie są wcale mniejsze od zniekształceń analogicznych wzmacniaczy klasy AB.

Klasa H

Jak wiadomo ($P = (U_{sk})^2 / R$), samochodowy wzmacniacz mostkowy BTL przy napięciu zasilania 14,4V umożliwia uzyskanie mocy 12W na obciążeniu 8Ω i 25W na 4Ω. Ponieważ w wielu wypadkach to nie wystarcza, stosowane są różne sposoby uzyskania większej mocy. Najprostsze jest zmniejszenie oporności obciążenia do 2Ω co umożliwia uzyskanie ponad 40W mocy, jednak głośniki o oporności 2Ω nie są popularne. Innym sposobem jest zastosowanie przetwornicy, dającej napięcie np. ±25V i klasycznego wzmacniacza. Jeszcze innym sposobem jest zastosowanie wzmacniacza klasy H, którego uproszczony schemat blokowy pokazany jest na **rysunku 14**. Wzmacniacz klasy H jest modyfikacją, a raczej rozwinięciem koncepcji wzmacniacza klasy G. Podstawą jest tu układ mostkowy (wzmacniacze A1, A2). Normalnie jest on zasilany napięciem akumulatora przez diody D1, D2 i pracuje jak najwykleszy wzmacniacz klasy AB. Przy silniejszych sygnałach napięcie zasilające jednego ze wzmacniaczy jest chwilowo zwiększane za pomocą pomp ładunku zawierających dodatkowe wzmacniacze A3, A4 i kondensatory C1, C2. Można powiedzieć, że pracujący wzmacniacz klasy H sam wytwarza w szczytachysterowania wyższe napięcie, które umożliwia uzyskanie znacznie większej mocy wyjściowej. Warto zauważyć, że napięcie

Rys. 14 Wzmacniacz klasy H



zasilające zwiększane jest w takt sygnału tylko w tym kanale i tylko wtedy, gdy jest to konieczne.

Oprócz zwiększenia mocy wyjściowej, praca przy zmieniającym się dynamicznie napięciu zasilania niejako przy okazji daje poprawę sprawności energetycznej, co umożliwia zastosowanie mniejszego radiatora. Przykładem realizacji może być układ scalony Philipsa TDA1562Q, umożliwiający uzyskanie mocy 70W na obciążeniu 4Ω przy napięciu akumulatora 14,4V (100W w szczycie przy zasilaniu 17V) – rysunek 14 pokazuje uproszczony schemat tego wzmacniacza.

Klasy E, F, S

Oprócz klas A, AB, B, C, D istnieje wiele innych. Nie wszystkie mają związek ze wzmacniaczami audio. Jak wspomniano, wzmacniacze klasy C stosowane są przede wszystkim w technice w.cz. Również tylko w technice w.cz. i to rzadko, spotyka się wzmacniacze klas E oraz F. **Rysunek 15** pokazuje zasadę działania i przykład realizacji wzmacniacza **klasy E**. Element czynny pracuje tu jako klucz – w jednym z dwóch stanów: otwarty, zamknięty. Filtr wyjściowy usuwa wyższe harmoniczne i pozwala uzyskać na wyjściu sygnał sinusoidalny.

Nieoficjalna **klasa F** obejmuje wzmacniacze podobne jak w klasie E, ale z obwodami rezonansowymi strojonymi nie na jedną częstotliwość (podstawową), tylko na dwie lub więcej (np. podstawową i trzecią harmoniczną).

W literaturze spotyka się też wzmianki o **klasie S**. Wykorzystuje się tam zasadę modulacji współczynnika wypełnienia impulsów i amplitudy. Klasa S została po raz pierwszy opisana w roku 1932(!). Można śmiało powiedzieć, że dawna klasa S to obecna klasa D.

Trochę inaczej jest z najnowszą klasą T.

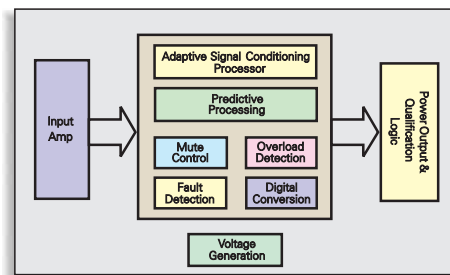
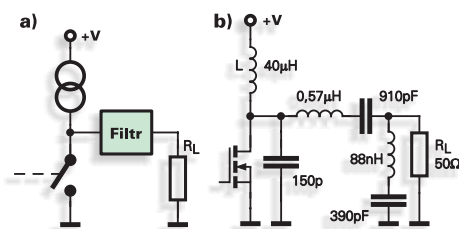
Klasa T

Obecnie w całej prasie elektronicznej głośno mówi się o wzmacniaczach klasy T. W roku 1998 amerykańska firma Tripath zaprezentowała pierwszy opracowany przez siebie wzmacniacz klasy T. Dziś ma w swej ofercie wzmacniacze o mocach do 1000W.

Ze względów komercyjnych firma Tripath nie wyjawia wszystkich szczegółów dotyczących swych wzmacniaczy. Wiadomo tylko, że są to wzmacniacze impulsowe, podobne budową do wzmacniaczy klasy D. Stopień wyjściowy, zawierający tranzystory MOSFET jest również sterowany przebiegiem prostokątnym. W odróżnieniu od wzmacniaczy klasy D, częstotliwość impulsów nie jest stała - zmienia się w granicach 50kHz...1,5MHz, wynosząc średnio 600...700kHz.

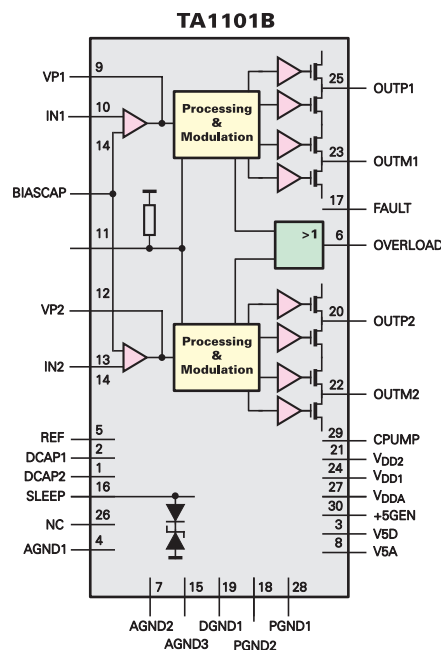
Nieporównanie bardziej skomplikowane są też stopnie sterujące. Częstotliwość i wypełnienie impulsów wyjściowych są wyznaczane przez skomplikowany w procesie cyfrowej obróbki z wykorzystaniem zaawansowanej teorii sygnałów, stosowanej wcześniej w telekomunikacji. **Rysunki 16 i 17** pokazują wewnętrzne schematy blokowe wzmacniacza klasy T. Wzmacniacz klasy T jest więc w istocie procesorem sygnałowym, sterującym wyjściowymi tranzystorami MOSFET w sposób wyznaczony przez sygnał wejściowy i sygnał sprzężenia zwrotnego według

Rys. 15 Wzmacniacz klasy E



Rys. 16 Schemat funkcjonalny wzmacniacza klasy T

Rys. 17 Schemat wewnętrzny układu scalonego wzmacniacza klasy T



skomplikowanego algorytmu. Podstawą jest tu opracowana przez Tripath tak zwana technologia DPPT™ (Digital Power Processing), łącząca osiągnięcia cyfrowej obróbki sygnałów i techniki sterowników dużej mocy. Jedną z przyczyn występowania zniekształceń we wzmacniaczach klasy D jest niedoskonałość i rozrzut parametrów wyjściowych tranzystorów MOSFET. Sterownik wzmacniacza klasy T niejako „uczy się” parametrów współpracujących tranzystorów (opóźnienie, charakterystyka przełączania, różnice parametrów) i potem kompensuje ich niedoskonałości, wytwarzając odpowiednie impulsy sterujące.

Efektom zastosowania we wzmacniaczu klasy T takiej zaawansowanej obróbki cyfrowej jest lepsza liniowość, mniejszy poziom szumów własnych, szerszy zakres dynamiki, bardziej płaska charakterystyka przenoszenia i opóźnienia grupowego, mniejsze zakłócenia elektromagnetyczne generowane przez układ oraz możliwość stosowania prostszych filtrów.

Przykładowo udaje się uzyskać współczynnik zniekształceń nieliniowych (THD+N) poniżej 0,08%, a współczynnik zniekształceń intermodulacyjnych (IMD) poniżej 0,04%, co stawia wzmacniacze klasy T na równi z bardzo dobrymi wzmacniaczami klas A i AB. **Rysunek 18** pokazuje zmierzone współczynniki zniekształceń nieliniowych wzmacniaczy T i D o podobnej mocy. Dzięki pracy impulsowej, sprawność energetyczna jest niewiele gorsza, od sprawności wzmacniaczy klasy D i wynosi 80...92%. Tym samym klasa T łączy zalety klas A, AB i D.

Fotografia 19 pokazuje zaskakująco mały wzmacniacz TA0104A klasy T o mocy 2x500W (1500W w połączeniu mostkowym). Niewykluczone, że właśnie wzmacniacze klasy T z czasem całkowicie zdominują rynek wzmacniaczy audio. Nic więc dziwnego, że firma Tripath reklamuje swoje opracowania, a jednocześnie zazdrośnie strzeże tajemnic technicznych. Producenci sprzętu audio, m.in. Alpine, Sony, Matsushita już wykorzystują te nowe wzmacniacze w swoim sprzęcie.

Klasy mieszane

Oprócz wzmacniaczy „czystych klas”, oznaczanych jedną pojedynczą literą, istnieje wiele wzmacniaczy, których można zakwalifikować do klas mieszanych.

Przykładowo **rysunek 20** pokazuje zasadę pracy wzmacniacza, zawierającego połączone równolegle stopnie klas AB oraz C. Przy małych sygnałach pracują (w klasie AB) tranzystory T1, T2, natomiast przy dużych, gdy napięcie na rezystorach R1, R2 sięga 0,6V, otwierają się normalnie zatkane tranzystory T3, T4.

Rysunek 21 przedstawia koncepcję wzmacniacza „super class A”, stosowaną od 1978 roku przez firmę Technics. Główny wzmacniacz A1 pracuje tu w „czystej” klasie A. Aby radykalnie zmniejszyć moc strat, zastosowano bardzo ciekawy sposób - całkowite napięcie zasilające ten wzmacniacz nie jest stałe, tylko zmienia się w takt sygnału. Oprócz dwóch 15-woltowych źródeł B1, B2 (są to zasilacze) wykorzystuje się też napięcie ±50V. Drugi wzmacniacz A2, pracujący

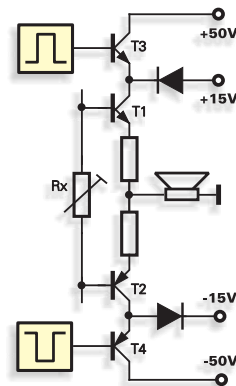
w klasie AB lub B zmienia napięcia zasilające. Ponieważ jego zadaniem jest tylko zmiana napięcia zasilania w takt sygnału, takie parametry jak liniowość nie są istotne, więc z powodzeniem może to być wzmacniacz pracujący w klasie B.

Nietrudno sobie wyobrazić kolejną modyfikację układu z rysunku 17, polegającą na zastąpieniu wzmacniacza klasy B przez jeszcze ekonomiczniejszy wzmacniacz klasy D bądź specjalny zasilacz impulsowy o napięciu zależnym od wielkości sygnału.

Podobnie wzmacniacz klasy G z rysunku 13b może być zmodyfikowany wg **rysunku 22**.

Wtedy „zewnątrzne” tranzystory T3, T4 nie są otwierane płynnie w takt sygnału, tylko pracują w sposób charakterystyczny dla klasy D: są albo w pełni otwarte, albo w pełni zatkane. Podane informacje nie wyczerpują tematu klas i koncepcji układowych wzmacniaczy.

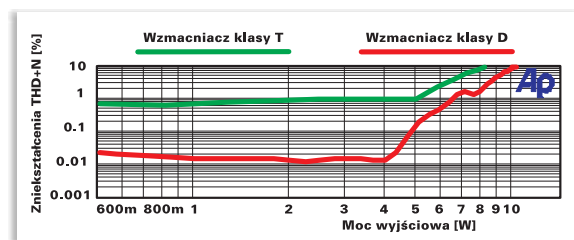
Rys. 22 Wzmacniacz AB+D



Podsumowanie

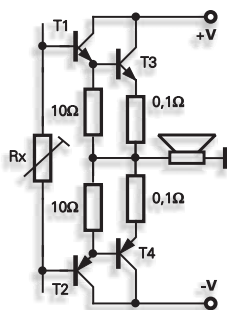
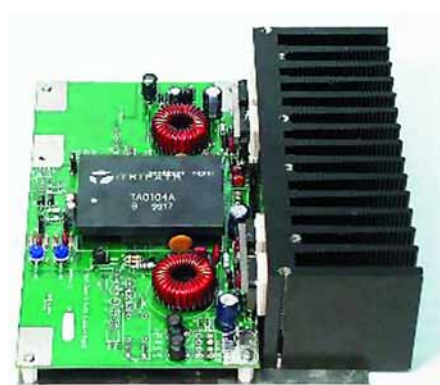
Obecnie ogromna większość dostępnych wzmacniaczy pracuje w klasie AB. Klasa A pozostaje domeną audiofilów, eksperymentatorów i snobów. Wzmacniacze klasy G i H po ponad dwudziestu latach od ich pojawienia się na rynku, nie są wcale historyczną ciekawostką. Niemniej przy obecnych tendencjach do miniaturyzacji oraz ze względu na oszczędność energii świetlaną przyszłość otwiera się przed wzmacniaczami klasy D. Będą znajdować coraz szersze zastosowanie w sprzęcie elektronicznym, zwłaszcza miniaturowym i zasilanym bateryjnie. Co do tego nie ma wątpliwości. Trudniej natomiast przewidzieć, czy ulepszone wzmacniacze impulsowe wyprą wzmacniacze klasy AB ze sprzętu przeznaczonego dla bardziej wymagających i zamożniejszych słuchaczy. O sukcesie lub porażce „cyfrowych” wzmacniaczy w tym obszarze rynku mogą zdecydować powody bardzo dalekie od racjonalnych. Wiadomo, że już obecnie mało kto potrafi rozróżnić poszczególne wzmacniacze klas A i AB na podstawie ich brzmienia. Podobnie będzie ze wzmacniaczami impulsowymi. Można się więc spodziewać, że nieco gorsze brzmieniowo, ale modne wzmacniacze „cyfrowe” (D - jak digital) upowszechnią się także w droższym i najdroższym sprzęcie.

Piotr Górecki



Rys. 18 Zniekształcenia nieliniowe

Fot. 19 Wzmacniacz klasy T 2x500W



Rys. 20 Wzmacniacz klasy AB+C

Rys. 21 Wzmacniacz klasy A ze zmiennym napięciem zasilania

